JESÚS DE LA CASA HERNÁNDEZ

INSTALACIONES ELÉCTRICAS

Universidad de Jaén
2001

PRÓLOGO

Las instalaciones eléctricas constituyen la base para el empleo directo de la electricidad por parte del hombre. A lo largo de los años, el avance de la técnica ha permitido una ampliación de su uso y cada vez de forma más segura.

La presente edición, Instalaciones Eléctricas, surge después de varios años de enseñanza de la materia en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Jaén.

El proyecto de una instalación eléctrica de baja tensión obliga al diseñador a la consulta de multitud de reglamentos, normas y manuales para un adecuado planteamiento. La diversidad de fuentes de información, necesarias para un apropiado diseño, conduce a veces a conflictos o posibles interpretaciones erróneas dependiendo de las fuentes analizadas. Por tanto, el trabajo de síntesis para la obtención de un manual que englobe la mayor parte de los campos puestos en juego es arduo.

La redacción de esta obra ha sido concebida para abordar con un conocimiento teórico los problemas específicos a los que se enfrenta el diseñador, instalador y personal de mantenimiento ayudando a encontrar la solución óptima. No obstante, para madurar las ideas, lo que es realmente importante es la práctica. La resolución de casos concretos, sacados de la realidad, plantea al alumno una situación muy adecuada para su aprendizaje. En esta tesitura, es necesario ordenar las diferentes ideas para una resolución óptima.

Por último, quiero agradecer a todas las personas que han colaborado, directa o indirectamente conmigo, en la elaboración de esta obra.

Jesús de la Casa Hernández

ÍNDICE GENERAL

UNIDAD DIDÁCTICA I
REGLAMENTACIÓN Y REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS.

TEMA 1. INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN B.T.

1.- INTRODUCCIÓN 13
2.- REGLAMENTACIÓN 13
3.- INSTALACIONES PROVISIONALES 17
4.- INSTALACIONES DEFINITIVAS 17
5.- SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A EDIFICIOS
- 5.1.- Tramites con las empresas eléctricas.
  - 5.1.1.- Documentación.
  - 5.1.2.- Previsiones.
- 5.2.- Tramites municipales.
- 5.3.- Tramites con la administración autonómica.
  - 5.3.1.- Documentación y tramitación con presentación de proyecto.
  - 5.3.2.- Documentación y tramitación sin presentación de proyecto.
- 5.4.- Realizaciones.
- 5.5.- Verificación y contractación.
  - 5.5.1.- Contratación.
- 5.6.- Suministros para rehabilitación de edificios.

6.- PROYECTO DE UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA EN UN EDIFICIO 24
- 6.1.- Directrices del proyecto.
- 6.2.- Datos técnicos del proyecto.
  - 6.2.1.- Dimensionado de la instalación eléctrica.
  - 6.2.2.- Componentes y características del proyecto.

TEMA 2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS.

1.- ESQUEMAS ELÉCTRICOS 29
2.- ESQUEMAS EXPLICATIVOS 29
3.- ESQUEMAS DE CONEXIONES 29
4.- ESQUEMAS UNIFILARES 30
5.- ESQUEMAS MULTIFILARES 30
6.- RELACIONES ENTRE ESQUEMAS 31

UNIDAD DIDÁCTICA II
PREVISIÓN DE POTENCIA EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA.

TEMA 3. PREVISIÓN DE LA POTENCIA TOTAL NECESARIA EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA.

1.- INTRODUCCIÓN 35
2.- DISEÑO DE LA INSTALACIÓN DE VIVIENDAS 35
- 2.1.- Niveles o grados de electrificación.
- 2.2.- Previsión de huecos y espacios.
- 2.3.- Trazado.

3.- DISEÑO EN INSTALACIONES DE OFICINAS Y COMERCIOS 41
4.- DISEÑO EN INSTALACIONES DE EDIFICIOS INDUSTRIALES 42
5.- PREVISIÓN DE CARGA EN LA INSTALACIÓN DE VIVIENDAS 42
6.- PREVISIÓN DE CARGA PARA EDIFICIOS DESTINADOS A OFICINAS 47
7.- PREVISIÓN DE CARGA PARA EDIFICIOS DESTINADOS A INDUSTRIAS 48
8.- PREVISIÓN DE CARGA PARA EDIFICIOS DESTINADOS A USOS DIVERSOS 52

UNIDAD DIDÁCTICA III
CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN REDES TRIFÁSICAS.

TEMA 4. CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN REDES TRIFÁSICAS. INTRODUCCIÓN.
1.- INTRODUCCIÓN 53
2.- CLASIFICACIÓN DE CORTOCIRCUITOS 55
3.- CONSECUENCIAS DEL CORTOCIRCUITO 56

TEMA 5. CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS.
1.- INTRODUCCIÓN 57
2.- DEFECTO ALEJADO DE LOS GENERADORES 58
3.- DEFECTO EN LA PROXIMIDAD DE LOS GENERADORES 60
4.- NORMAS DE CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO 64
5.- CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO POR EL MÉTODO DE LAS IMPEDANCIAS 66
5.1.- Determinación de las diversas impedancias de cortocircuito.
6.- SISTEMA EN POR UNIDAD (P.U.) 79
6.1.- Relaciones entre las impedancias de los diferentes niveles de tensión de una instalación eléctrica.
6.2.- Sistemas en p.u.
7.- CÁLCULOS EN SISTEMAS DE GRAN DIMENSIÓN 81
7.1.- Matriz de admitancia de nudos.
7.2.- Matriz impedancias (Z_{BUS}).
7.3.- Cálculo de la intensidad de cortocircuito.

UNIDAD DIDÁCTICA IV
LA DISTRIBUCIÓN EN B.T. PROTECCIÓN DE PERSONAS.

TEMA 6. LA DISTRIBUCIÓN EN B.T. PROTECCIÓN DE PERSONAS.
1.- RIESGOS DE LA UTILIZACIÓN DE LA ELECTRICIDAD 87
2.- ESQUEMAS DE DISTRIBUCIÓN 92
3.- PROTECCIÓN DE PERSONAS 94
3.1.- Protección contra contactos directos.
3.2.- Protección contra contactos indirectos.
4.- PROTECCIÓN DIFERENCIAL 100
4.1.- Interruptor diferencial.
4.2.- Relé y transformador diferencial e interruptor automático.
4.3.- Utilidades de la protección diferencial.
4.3.1.- Protección contra contactos directos.
4.3.2.- Protección contra incendios.
4.3.3.- Protección contra contactos indirectos.

TEMA 7. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INSTALACIONES SELECTIVAS EN DEFECTOS INDIRECTOS.
1.- INTRODUCCIÓN 105
2.- REDES CON EL NEUTRO CONECTADO DIRECTAMENTE A TIERRA (TT) 105
2.1.- Estudio de un defecto de aislamiento.
2.2.- Sensibilidad de los dispositivos de protección en el esquema TT.
2.3.- Situación de los dispositivos de protección en el esquema TT.
2.4.- Selectividad entre los dispositivos de protección en el esquema TT.
3.- REDES CON PUESTA AL NEUTRO (TNC ó TNS) 112
3.1.- Estudio de un defecto de aislamiento.
3.2.- Protección asegurada por los dispositivos de protección contra las sobreintensidades (interruptor automático o fusibles).
3.3.- Protección contra sobretensiones en el esquema TN.
4.- RED CON NEUTRO AISLADO 120
4.1.- Introducción.
4.2.- Protección contra las sobretensiones.
4.3.- Estudio de un defecto de aislamiento.
4.4.- Estudio de un defecto doble.
4.5.- Protección del defecto doble asegurada por los dispositivos de protección de sobrecorrientes (interruptores automáticos o fusibles).

UNIDAD DIDÁCTICA V
PROTECCIÓN DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE BAJA TENSIÓN CONTRA SOBRECARGA Y CORTOCIRCUITOS.

TEMA 8. PROTECCIÓN DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE BAJA TENSIÓN CONTRA SOBRECARGAS Y CORTOCIRCUITOS.

1.- INTRODUCCIÓN 131
2.- PROTECCIÓN CONTRA SOBRECARGAS 131
3.- PROTECCIÓN CONTRA CORTOCIRCUITOS 132
4.- ELEMENTOS DE CORTE O PROTECCIÓN FRENTE A CORTOCIRCUITOS 133
- 4.1.- Interruptores automáticos de baja tensión.
  - 4.1.1.- Definición de interruptor automático.
  - 4.1.2.- Tipos de interruptores automáticos.
  - 4.1.3.- Funciones de los interruptores automáticos.
  - 4.1.4.- Ventajas acerca de la utilización de los interruptores automáticos frente a fusibles.
  - 4.1.5.- Elementos constituyentes de un interruptor automático.
  - 4.1.6.- Clasificación atendiendo a la función de protección.
  - 4.1.7.- Curvas de disparo.
  - 4.1.8.- Normativa interruptores automáticos.
    - 4.1.8.1.- Introducción.
    - 4.1.8.2.- CEI 947-2.
    - 4.1.8.3.- Diferencias CEI 947-2 y CEI 157-1.
    - 4.1.8.4.- Norma EN 60.898. Interruptores automáticos para la protección contra sobreintensidades para instalaciones domésticas y análogas.
- 4.2.- Fusibles.
  - 4.2.1.- Modelos de cortocircuitos fusibles.
  - 4.2.2.- Normas UNE sobre cortocircuitos fusibles en B.T..

TEMA 9. SELECTIVIDAD DE LAS PROTECCIONES DE SOBREINTENSIDAD.

1.- DEFINICIÓN E INTERÉS DE LA SELECTIVIDAD 175
2.- SELECTIVIDAD EN LA ZONA DE SOBRECARGAS 175
3.- SELECTIVIDAD EN LA ZONA DE PROTECCIÓN CONTRA LOS CORTOCIRCUITOS 176
4.- MÉTODOS DE SELECTIVIDAD 176
- 4.1.- Selectividad amperimétrica.
- 4.2.- Selectividad cronométrica.
- 4.3.- Selectividad lógica.
- 4.4.- Sistema SELLIM.
- 4.5.- Selectividad energética.
  - 4.5.1.- Ruptura con limitación.
  - 4.5.2.- Representación de energías.
  - 4.5.3.- Características de un interruptor automático.
  - 4.5.4.- Características de los relés.
  - 4.5.5.- Ejemplo.
  - 4.5.6.- Ventajas de la selectividad energética.

5.- REGLAS PRÁCTICAS DE SELECTIVIDAD 191
- 5.1.- Selectividad en redes radiales.
  - 5.1.1.- Selectividad entre fusibles conectados en serie.
  - 5.1.2.- Selectividad entre interruptores automáticos conectados en serie.
  - 5.1.3.- Selectividad entre un interruptor automático y un fusible en serie.
  - 5.1.4.- Selectividad entre un fusible y un interruptor automático en serie.
  - 5.1.5.- Selectividad entre interruptores automáticos rápidos y fusibles.
  - 5.1.6.- Selectividad entre interruptores automáticos rápidos.
  - 5.1.7.- Selectividad entre interruptores automáticos rápidos e interruptores automáticos selectivos.
  - 5.1.8.- Selectividad entre interruptores automáticos selectivos.
  - 5.1.9.- Selectividad en caso de dos o más alimentaciones paralelas.
  - 5.1.10.- Selectividad y protección contra caída de tensión.
- 5.2.- Selectividad en redes malladas.

6.- FILIACIÓN 204

TEMA 10. SOLICITACIONES TÉRMICAS Y DINÁMICAS EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA EN CORTOCIRCUITO.

1.- MÁXIMO ESFUERZO TÉRMICO ADMISIBLE EN CONDUCTORES AISLADOS EN CORTOCIRCUITO 207
1.1.- Tiempo de desconexión de la protección de cortocircuito.
1.2.- Longitud máxima protegida a cortocircuito.
2.- MÁXIMO ESFUERZO TÉRMICO ADMISIBLE EN EMBARRADOS 213
2.1.- En cortocircuito.
2.2.- En régimen permanente.
3.- MÁXIMAS SOLICITACIONES DINÁMICAS EN UN CORTOCIRCUITO 216
3.1.- Esfuerzos mecánicos de conductores.
3.2.- Esfuerzos mecánicos en aisladores.

UNIDAD DIDÁCTICA VI
CÁLCULO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN EN BAJA TENSIÓN

TEMA 11. CÁLCULO DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN EN B.T. MEDIANTE MOMENTOS ELÉCTRICOS.

1.- INTRODUCCIÓN 221
2.- CAPACIDAD DE CARGA DE UN CABLE EN SERVICIO PERMANENTE 224
3.- CÁLCULO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN POR EL MÉTODO DE MOMENTOS ELÉCTRICOS 228
3.1.- Caída de tensión, sección y pérdida de energía en una línea de corriente de corriente continua.
3.2.- Caída de tensión, sección y pérdida de energía en una línea de corriente de corriente alterna.
3.3.- Cálculo de la sección del conductor en una línea con distintas cargas.
3.4.- Cálculo de la sección del conductor en una topología en árbol.
3.5.- Cálculo de la sección del conductor en una topología en anillo.
3.6.- Red mallada alimentada en determinados nudos.
3.7.- Circuitos en árbol o mallados alimentados con fuentes alternas monofásicas.
3.8.- Circuitos en árbol o mallados alimentados con fuentes alternas trifásicas.
3.9.- Cálculo de redes a partir de las características facilitadas por los fabricantes de conductores.

TEMA 12. CÁLCULO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN EN B.T. MEDIANTE MÉTODOS MATRICIALES.

1.- BASES DEL CÁLCULO 289
2.- MÉTODO DE ANÁLISIS MATRICIAL POR NUDOS 290
2.1.- Propiedades y ventajas del método matricial.
3.- CÁLCULO DE TENSIONES, INTENSIDADES Y FLUJO DE POTENCIAS EN UNA RED TRIFÁSICA POR MÉTODOS ITERATIVOS 292
3.1.- Introducción.
3.1.- Formulación básica.
3.3.- Métodos iterativos.
3.3.1.- Gauss-Siedel.

UNIDAD DIDÁCTICA VII
INSTALACIONES INTERIORES.

TEMA 13. INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN EDIFICIOS INDUSTRIALES Y COMERCIALES.

1.- INTRODUCCIÓN 299
2.- LOCALES DE PÚBLICA CONCURRENCIA. 299
3.- LOCALES CON RIESGO DE INCENDIO O EXPLOSIÓN 300
4.- LOCALES DE CARACTERÍSTICAS ESPECIALES 301
4.1.- Locales húmedos.
4.2.- Locales mojados.
4.3.- Instalación en locales con riesgo de corrosión.
4.4.- Instalación en locales polvorientos sin riesgo de incendio ó explosión.
4.5.- Instalaciones en locales a temperatura elevada.

4.6.- Instalaciones en locales a muy baja temperatura.
4.7.- Instalaciones en locales en que existan baterías de acumuladores.
4.8.- Instalaciones en locales afectos a un servicio eléctrico.
4.9.- Instalaciones en estaciones de servicio garajes y talleres de reparación de vehículos.
5.- CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE EDIFICIOS Y LOCALES ESPECÍFICOS 305
5.1.- Edificios de oficinas.
5.2.- Hoteles.
5.3.- Hospitales.
5.4.- Teatros y edificios culturales.
5.5.- Salas de exposición.
5.6.- Estaciones de servicio.
5.7.- Fosos de montaje.
5.8.- Garajes.
6.- INSTALACIONES DE EMERGENCIA 316
6.1.- Suministros complementarios.
6.2.- Alumbrados especiales de emergencia.
6.3.- Equipos autónomos.

TEMA 14. INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN EDIFICIOS DESTINADOS PRINCIPALMENTE A VIVIENDAS.
1.- INTRODUCCIÓN 321
2.- INSTALACIONES DE ENLACE 321
2.1.- Acometida.
2.1.1.- Acometida en alta tensión.
2.1.2.- Acometida en baja tensión.
2.2.- Caja general de protección.
2.3.- Línea repartidora.
2.4.- Montaje de contadores.
2.5.- Derivaciones individuales.
2.6.- Cuadro de distribución.
3.- INSTALACIÓN INTERIOR DE VIVIENDA 336
3.1.- Características eléctricas de las instalaciones de interiores.
3.2.- Desarrollo e indicaciones constructivas.
3.3.- Situación de mecanismos.

UNIDAD DIDÁCTICA VIII
REGULACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE UNA INSTALACIÓN.

TEMA 15. COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA
1.- INTRODUCCIÓN 343
2.- EFECTOS DE LA POTENCIA REACTIVA EN LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS 344
3.- RECARGO EN LAS TARIFAS POR ENERGÍA REACTIVA 345
4.- VENTAJAS TÉCNICO-ECONÓMICAS OBTENIDAS CON EL USO DE LOS CONDENSADORES PARA PRODUCIR ENERGÍA REACTIVA. CÁLCULO DE LA POTENCIA REACTIVA NECESARIA 347
5.- FORMAS DE COMPENSAR LA ENERGÍA REACTIVA 348
5.1.- Compensación individual.
5.1.1.- Motores.
5.1.2.- Transformadores.
5.1.3.- Otros elementos.
5.2.- Compensación general.
5.3.- Compensación mixta.
6.- COMPENSACIÓN AUTOMÁTICA DEL FACTOR DE POTENCIA 355
7.- APARAMENTA DE MANDO, CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONADO 355

UNIDAD DIDÁCTICA IX
INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA EN B.T.

TEMA 16. INSTALACIÓN DE TIERRA DE UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA.

1.- DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS INSTALACIONES DE TIERRA 357
- 1.1.- Función de la puesta a tierra.
- 1.2.- Definiciones.
- 1.3.- Partes que comprenden las puestas a tierra.
- 1.4.- Electrodos de tierra. Naturaleza, constitución, dimensiones y condiciones de instalación.
- 1.5.- Resistencia de tierra.
- 1.6.- Resistividad del terreno (ñ).
- 1.7.- Tipos de instalaciones de puesta a tierra.
- 1.8.- Separación de los sistemas de puesta a tierra.
  - 1.8.1.- Tierras de protección y servicio en la alta tensión.
  - 1.8.2.- Tierras de protección en la baja tensión.

2.- NECESIDAD DE UNA BUENA TOMA DE TIERRA 365

3.- POTENCIALES CREADOS SOBRE EL TERRENO POR EL PASO DE UNA INTENSIDAD DE DEFECTO 366
- 3.1.- Distribución de corrientes.
- 3.2.- Distribución potencial.
- 3.3.- Tensión de contacto y tensión de paso
- 3.4.- Tensión de contacto y de paso aplicada. Valores máximos reglamentarios.

4.- PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA INSTALACIÓN DE TIERRA EN UN C.T. DE TERCERA CATEGORÍA 371

UNIDAD DIDÁCTICA X
CANALIZACIONES Y CUADROS ELÉCTRICOS EN B.T.

TEMA 17. CUADROS ELÉCTRICOS EN UNA INSTALACIÓN DE B.T..

1.- INTRODUCCIÓN 377

2.- ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN LOS CUADROS 377

3.- SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN PARA GRANDES EDIFICACIONES 378
- 3.1.- Alimentación vertical.
- 3.2.- Alimentación horizontal.
  - 3.2.1.- Distribución centralizada.
  - 3.2.2.- Distribución descentralizada.
- 3.3.- Líneas de servicios generales.

4.- ESQUEMAS DE CUADROS DE DISTRIBUCIONES GENERALES 383

5.- ESQUEMAS DE CUADROS DE ALUMBRADO 385

6.- ESQUEMAS DE CUADROS DE FUERZA 385

7.- ESQUEMAS DE CUADROS DE AUTOMATIZACIÓN POR CONTACTORES 387

8.- ARMARIOS ELÉCTRICOS 390

TEMA 18. CANALIZACIONES ELÉCTRICAS.

1.- INTRODUCCIÓN 403

2.- MONTAJE SOBRE Y BAJO REVOQUE 403

3.- TENDIDO DE LÍNEAS POR SISTEMAS DE CANALES 404
- 3.1.- Canales para cables.
- 3.2.- Canales de conducción de cables para paredes y techos.
- 3.3.- Canales para rodapiés
- 3.4.- Canales para repisas de ventanas.
- 3.5.- Canales para antetechos.
- 3.6.- Revestimiento de antetechos.
- 3.7.- Sistema de montaje bajo el piso.

4.- DISTRIBUCIÓN POR BARRAS 413

UNIDAD DIDÁCTICA XI
IMPLANTACIÓN DE CENTROS DE TRANSFORMACIÓN M.T./B.T.

TEMA 19. CENTROS DE TRANSFORMACIÓN DE MEDIA A BAJA TENSIÓN.

1.- DEFINICIÓN DE CENTRO DE TRANSFORMACIÓN (C.T.) Y FUNCIONES QUE DESEMPEÑA 415
2.- CLASIFICACIÓN DE LOS CENTROS DE TRANSFORMACIÓN 416
3.- NECESIDAD DEL CENTRO DE TRANSFORMACIÓN 421
4.- DOCUMENTOS QUE COMPRENDE EL PROYECTO DE UN CENTRO DE TRANSFORMACIÓN 421
5.- ELECCIÓN DEL RÉGIMEN DE NEUTRO Y ESQUEMA DEL C.T. 422
6.- CENTROS DE TRANSFORMACIÓN MÁS USUALES 424
- 6.1.- Centros de transformación a la intemperie.
  - 6.1.1.- Centro de transformación sobre poste simple.
  - 6.1.2.- Centro de transformación en pórtico.
- 6.2.- Centros de transformación interiores.
  - 6.2.1.- Centro de transformación interior con entrada aérea.
  - 6.2.2.- Centro de transformación interior con entrada subterránea.
  - 6.2.3.- Composición general de un centro de transformación de interior.
  - 6.2.4.- Tipos de celdas y elementos que las integran.
  - 6.2.5.- Ventilación.
  - 6.2.6.- Características específicas de centros de transformación prefabricados.

7.- PROTECCIÓN DEL TRANSFORMADOR DEL C.T. 448
8.- PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES 449
9.- PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS 452
10.-ALUMBRADO, SEÑALIZACIÓN Y MATERIAL DE SEGURIDAD 453
11.- ESPECIFICACIONES DE LOS ELEMENTOS QUE INTEGRAN UN C.T. 453

UNIDAD DIDÁCTICA XII
PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE B.T.

TEMA 20. PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE BAJA TENSIÓN.

1.- CAUSAS DE LOS DAÑOS POR SOBRETENSIONES 455
- 1.1.- Sobretensiones ocasionadas por las tormentas.
  - 1.1.1.- Descarga directa/Descarga próxima de rayo.
    - 1.1.1.1.- Elevación de tensión en la resistencia de puesta a tierra de choque.
    - 1.1.1.2.- Tensiones inducidas en bucles metálicos.
  - 1.1.2.- Descarga lejana de rayo.
  - 1.1.3.- Acoplamiento de corrientes punta en los cables de señales.
    - 1.1.3.1.- Acoplamiento óhmico.
    - 1.1.3.2.- Acoplamiento inductivo.
    - 1.1.3.3.- Acoplamiento capacitivo.
  - 1.1.4.- Magnitud de las sobretensiones de rayo.

2.- MEDIDAS DE PROTECCIÓN 462
- 2.1.- Protección exterior contra rayos.
  - 2.1.1.- Dispositivos pararrayos.
  - 2.1.2.- Derivadores.
  - 2.1.3.- Instalación de toma de tierra.
- 2.2.- Protección interior contra rayos.
- 2.3.- Blindaje.
  - 2.3.1.- Blindaje de edificios.
  - 2.3.2.- Blindaje de locales.
  - 2.3.3.- Apantallamiento de aparatos.
  - 2.3.4.- Blindaje de conductores (líneas).

3.- ELEMENTOS Y APARATOS PARA LA PROTECCIÓN
CONTRA SOBRETENSIONES FUNCIONAMIENTO Y CAMPO DE APLICACIÓN 474
4.- COORDINACIÓN DEL AISLAMIENTO EN INSTALACIONES DE BAJA TENSIÓN 474
4.1.- Coordinación de los elementos de protección.

BIBLIOGRAFÍA 479

TEMA 1. INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN B.T.

1.- INTRODUCCIÓN.

La energía eléctrica es, sin lugar a dudas, dentro de las formas energéticas, una forma superior, desde un punto de vista de utilización y aprovechamiento para el hombre, lo que ha hecho que se haya convertido, en la era del desarrollo industrial, como la energía indispensable en toda la infraestructura urbana, lo mismo para las más pequeñas y modestas agrupaciones habitadas por el hombre, como para los grandes y poblados núcleos urbanos de viviendas y de producción industrial, ya que, partiendo de formas de energía primarias (petróleo, carbón, saltos de agua, etc.) permite mediante su transformación en energía eléctrica, una fácil y rápida expansión y transporte, a todos los puntos donde sea necesaria su utilización, cumpliendo unas misiones importantes para la vida del hombre, como son el alumbrado, y con el motor eléctrico, la transformación en energía mecánica, para su utilización industrial y a la vez la de su fácil transformación en otras formas de energía, como el calor, la luz, etc..

Todo esto, ha hecho que la energía eléctrica se haya convertido en la "energía doméstica", dotando a todos los edificios de una instalación que permita su uso allí donde sea demandada, con una disponibilidad fija y permanente para utilizarla en alumbrados, servicios de calefacción y agua caliente, ascensores, montacargas, aparatos electrodomésticos, ventilación, megafonía, telefonía, T.V. etc. y en los edificios industriales, como "Fuerza" para su transformación, en trabajo mecánico, calor, luz, etc. según las necesidades, de cada caso.

Una característica muy importante de la disponibilidad de la energía eléctrica, es su fácil "fragmentación", en la medida precisa en cada receptor, utilizando justamente la cantidad demandada en cada punto, permitiendo, por un sistema de instalación relativamente sencillo, llegar a los lugares más escondidos.

2.- REGLAMENTACIÓN.

La Normativa y reglamentación relativa a las instalaciones eléctricas, tanto de obligado cumplimiento como de simple recomendación, es muy amplia y diversificada, lo que hace que su ejecución se haga a veces difícil de cumplir, más bien por confusionismo entre la diversidad de criterios existentes, que por una clara contradicción de lo establecido. Entre esta reglamentación, instrucciones y normas destacaremos las siguientes:

- Reglamento de verificaciones eléctricas.
- Reglamento de aparatos electrodomésticos.
- Normas Tecnológicas de la Edificación.
- Normas de Comunidades Autónomas.
- Normas particulares de las Empresas Distribuidoras de Energía.
- Normas UNE.
- **Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión:**
  (Aprobado por Decreto 2413/1973 de 20 de Septiembre y publicado en el B.O.E. de 9 de Octubre de 1.973 y sus instrucciones complementarias (Orden de 31 de Octubre de 1.973 y publicadas en el B.O.E. del 27 a 29 y 31 de Diciembre de 1.973).

El Reglamento, está dividido en nueve capítulos y subdividido en 34 artículos, estructurados de la siguiente forma:

CAPÍTULO	I.	Generalidades (Arts. 1 a 9 ambos inclusive).
CAPÍTULO	II.	Redes de Distribución en Baja Tensión (Art. 10).
CAPÍTULO	III.	Instalaciones de Alumbrado Público (Art. 11).
CAPÍTULO	IV.	Suministros en Baja Tensión (Arts. 12 a 16).
CAPÍTULO	V.	Instalaciones de enlace (Arts. 19 a 21).
CAPÍTULO	VI.	Instalaciones interiores y receptores (Art. 22).
CAPÍTULO	VII.	Receptores y puesta a tierra (Art. 23).
CAPÍTULO	VIII.	Autorizaciones, puesta en servicio y comprobación de las instalaciones eléctricas de Baja Tensión (Arts. 24 a 26).
CAPITULO	IX.	Responsabilidad y sanciones (Arts. 27 a 34).

Instrucciones Complementarias. Son las Instrucciones que desarrollan los nueve capítulos antes descritos (MIE BT). Su estructura es la siguiente:

001.	Terminología.
002. a 004.	Redes aéreas para distribución de energía eléctrica.
005. a 007.	Redes subterráneas para distribución de energía eléctrica.
008.	Puesta a neutro de masas en redes de distribución de energía eléctrica.
009.	Alumbrado público.
010.	Suministro en Baja Tensión. Previsión de cargas.
011. a 016.	Instalaciones de enlace (desde esquemas y acometidas a cuadros de protección).
017. a 021.	Instalaciones interiores o receptoras (desde instalaciones máximas a protecciones, aislamientos, canalizaciones, etc.).
022. a 024.	Instalaciones en viviendas (grados de electrificación, ejecución, etc.).
025. a 028.	Instalaciones en locales especiales (locales de pública concurrencia, incendio o explosión, etc.).
029. a 030.	Instalaciones a pequeñas tensiones y tensiones especiales.
031. a 038.	Receptores: principios generales.
39.	Puestas a tierra.
40.	Instaladores autorizados.
41.	Autorizaciones y puestas en servicio de instalaciones.
42.	Inspección de instalaciones.
43.	Calificación de instalaciones como resultado de las inspecciones.
44.	Normas UNE de obligada aplicación.

Hojas Interpretativas. Las hojas editadas y sus fechas, hasta el momento, son las siguientes:

1 Clasificación de las viviendas según su grado de electrificación (1 -IV- 1974).
2 Cuadro General de distribución en las viviendas (1-IV-1974).
3 Título o certificado de estudios para aspirar a la obtención del título de instalador autorizado (1-IV-1974).
4 Utilización de las envolventes metálicas de protección de las canalizaciones eléctricas prefabricadas como conductor de protección de puesta a tierra (21-V-1974).
5 Bases de madera para contadores (21-V- 1974).
6 Redes de alimentación para puntos de luz con lámparas o tubos de descarga (1-IV-1974).
7 Suministros complementarios (2-XII-1974).

8 Tubos para canalizaciones eléctricas fijas, en locales con riesgo de incendio o explosión (7-I-1975).
9 Compensación del factor de potencia de un grupo de lámparas fluorescentes en una instalación de régimen de carga variable (13-V- 1975).
10 Medición de la resistencia de aislamiento en instalaciones eléctricas (5-VI-1975).
11 Sistemas de protección de las instalaciones de alumbrado público (9-VI-1975).
12 Ventilación de estaciones de servicio, garajes y talleres de reparación de vehículos (15-I-1977).
13 Iluminación de fuentes públicas (1-VII-1975).
14 Previsión de carga en edificios dedicados principalmente a viviendas (26- 1976) .
15 Utilización de calentadores eléctricos de agua del tipo ducha en cuarto de baño (26-III-1976).
16 Instalaciones de cuartos de baño o aseo (30-IV-1976).
17 Instalaciones interiores o receptoras, unión de conductores, empalmes y derivaciones (1-VII-1976).
18 Instalaciones interiores o receptoras. Tubos protectores blindados (7-II-1977).
19 Instalaciones interiores o receptoras. Cables con aislamiento de la clase II (17-X-1977).
20 Obtención del título de instalador electricista autorizado (28-X-1977).
21 Instalaciones interiores o receptoras. Canales protectores de material plástico aislante (8-II-1978).
22 Instalaciones interiores de viviendas. Toma de corriente de 25 amperios para cocina eléctrica (18-IV-1978).
23 Intensidades máximas admisibles. Definición de temperatura ambiente (27-IX-1978).
24 Redes aéreas para distribución de energía eléctrica en baja tensión. Instalación de redes trenzadas sobre fachada (19-XII-1978).
25 Instalaciones en locales de pública concurrencia. Alumbrado de emergencia (19-XII- 1978).
26 Receptores a motor. Herramientas portátiles (21-II-1979).
27 Instalaciones eléctricas en locales de pública concurrencia.
Modificación de las instalaciones eléctricas en las salas de proyección cinematográfica existentes con anterioridad a la puesta en vigor del vigente Reglamento y de sus instrucciones complementarias (7-III- 1979).
28 Canalizaciones en cables eléctricos aislados para instalaciones de enlace, líneas repartidoras y derivaciones individuales (10-XII- 1979).
29 Autorización y puesta en servicio de las instalaciones. Instalaciones que precisan para su ejecución, aprobación previa de proyecto (10-XII-1979).
30 Instaladores autorizados. Medios técnicos mínimos para realizar las instalaciones eléctricas (10-XII-1979).
31 Instalaciones en locales de características especiales. Aplicación en locales mojados, del sistema de protección de separación de circuitos (1 8-XII- 1979).
32 Situación del interruptor diferencial en viviendas unifamiliares con terreno circundante (21-IV-1980).
33 Empleo de tubos aislantes flexibles normales sobre falsos tubos y huecos de la construcción (18-V-1980).
34 Instalaciones interiores o receptoras. Conductores aislados colocados directamente bajo enlucido (18-XI-1980).
35 Conductores utilizados en instalaciones de semáforos (18-XI-1980).
36 Pequeños interruptores automáticos PIA, número de polos protegidos (18-XI-1980).
37 Edificios destinados a un solo abonado. Línea repartidora y derivación individual (18-XI- 1980).

38 Instalación de tirantes como complemento de resistencia de los apoyos de líneas aéreas, con conductores aislados (18-XI-1980).

- **Reglamento de verificaciones eléctricas:**
  (Aprobado por Decreto de 12 de Marzo de 1954 y publicado en el B.O.E. del 15 de Abril de 1954 y modificado por Real Decreto 724/1979 de 2 de Febrero y publicado en el B.O.E. de 7 de Abril de 1979).

- **Reglamento de aparatos electrodomésticos:**
  (Aprobado por Real decreto 788/1980 de 28 de Marzo y publicado en el B.O.E. de 3 de Mayo de 1980).

- **Normas Tecnológicas de la Edificación:**
  (Aprobadas por Decreto 3.565/1972).Por Real Decreto 570/1981 de 6 de Marzo (publicado en el B.O.E. de 2 de Abril de 1.981) por el que se autorizó al MOPU para modificar, ampliar y clasificarlas.
  Se clasifican por Familia y Subfamilia.
  "Familia de Instalaciones" "I".
  Subfamilia "Electricidad" "IE".

Normas	B.O.E.
IEB.- Baja Tensión	20-27-IV-74 y 4-V-74
IEE.- Alumbrado Exterior	18-VII-78
IEF.- Fuerza	
IEG.- Generadores	
IEI.- Alumbrado Interior	15-22 y 29-XI-75
IEP.- Puesta a Tierra	23-III-73
IER.- Red exterior	19-VI-84
IET.- Centro de transformación	12-XII-83

- **Normas particulares de las Empresas Distribuidoras de energía**:

En este punto, nos referimos a las normas específicas que cada Empresa suministradora tiene adoptadas y que son obligadas en las instalaciones dentro del ámbito de distribución de cada empresa, y que si bien en algunos casos concurren entre sí, en otros difieren en bastantes criterios, a pesar de la tendencia a la unificación de las normas de las empresas, adoptando en muchos casos las recomendaciones U.N.E.S.A. como normativa particular de obligado cumplimiento.

Algunas empresas también hacen suyas las Normas Tecnológicas de la Edificación convirtiéndolas en normas particulares de obligado cumplimiento.

Por último tenemos las Normas UNE publicadas por el Instituto de Racionalización y Normalización IRANOR, de las cuales, el propio ReglamentoElectrotécnico de Baja Tensión, en su instrucción MIE BT-044, relaciona las que son de obligado cumplimiento.

3.- INSTALACIONES PROVISIONALES.

Las instalaciones provisionales son aquellas que tienen una duración temporal relativamente corta y que, por sus características no necesitan las disposiciones de fijeza de las definitivas; sin embargo, por estas mismas condiciones de provisionalidad, ofrecen por lo general mayores riesgos que las definitivas y ello obliga a tener que disponer especiales condiciones de seguridad y, a veces, el empleo de materiales de mayor calidad, que permitan todas las acciones a que se ven sometidas estas instalaciones, como pueden ser: intemperie, impactos, golpes, arrollamiento de máquinas, etc..

Como normas de carácter general, en este tipo de instalaciones tendremos en cuenta lo siguiente:

- Se dispondrá siempre de una red de tierras (provisional) con elementos adecuados, por lo general picas, que garantice una buena tierra a todas las masas importantes de la instalación, y con la cual se combinen los sistemas de protección contra contactos indirectos mediante el uso de interruptores diferenciales, de alta sensibilidad.
- Los conductores utilizados deben ser del tipo multipolar (mangueras) con un nivel de aislamiento mínimo de 1.000 V evitando, a ser posible, que discurran por el suelo donde puede ser arrollado por las máquinas utilizadas (grúas, carretillas, etc.).
- Se procurará que todas las partes activas en tensión de la instalación sean inaccesibles y se precise una herramienta especial o llave para su acceso, fundamentalmente los cuadros de accionamiento que, aunque sean del tipo provisional, deben ser adecuados a la exposición que tengan, intemperie antideflagrantes antihumedad, etc..
- Todos los dispositivos especiales y paramenta, tendrán un grado de protección adecuado a las condiciones de trabajo.
- Es muy importante que, en este tipo de instalaciones temporales, exista un mantenimiento constante de la instalación llevado a cabo por una persona responsable (instalador) que reponga cualquier elemento deteriorado en el mismo momento en que se produzca el defecto, ya que el mayor riesgo de estas instalaciones, está en el "olvido" que sufren por su carácter temporal, una vez realizada la instalación inicial, sin tener en cuenta que, precisamente por este carácter, necesitan de un mayor cuidado y vigilancia que las instalaciones definitivas.
- En consecuencia, estas instalaciones deben tener una esmerada protección mecánica y eléctrica.

4.- INSTALACIONES DEFINITIVAS.

Las instalaciones eléctricas definitivas, precisamente por su carácter de fijeza, suelen estar más definidas, en todos los casos, que las provisionales, por lo cual, no habrá más que seguir fielmente toda la normativa aplicable a cada caso concreto, en la que se define, de una manera precisa, todas las condiciones y características de cada tramo de instalación.

No obstante, en estas instalaciones definitivas, conviene siempre recordar los siguientes puntos:

- Es importante que los materiales utilizados en las instalaciones no tengan un envejecimiento prematuro, como consecuencia del contacto directo con materiales incompatibles o bien por el medio en el que se encuentren instalados, teniendo esto muy presente a la hora de seleccionar el material.
- Es también importante, destacar que los materiales utilizados no sufran deterioro en el proceso de la instalación que los deje mermados en sus características fundamentales; si esto ocurriese, se debe reemplazar por otro nuevo el elemento dañado, ya que, de lo contrario, no tendrá la vida que el resto de la instalación (conductores, mecanismo, etc.).
- Es importante también, que haya cierta armonía o más bien homogeneidad, en cuanto a la calidad de los materiales que integran una instalación para que la duración de la misma sea por igual, ya que una gran heterogeneidad en las calidades, hace que las instalaciones tengan que ser reemplazadas, por culpa de estos elementos de calidad más deficiente.
- Por último, conviene no olvidar que el secreto de la duración de las instalaciones está en sus protecciones, tanto desde el punto de vista eléctrico, que impida que cualquier abuso en su utilización rebase los límites establecidos en el cálculo, como la protección contra el cortocircuito o "avería eléctrica", que va deteriorando la instalación paulatinamente, así como las protecciones mecánicas de todos sus elementos, fundamentalmente los conductores, que son las partes vitales de la instalación contra la utilización de receptores inadecuados, ya que no hay que olvidar las limitaciones propias de una base de enchufe de una línea y de un mecanismo eléctrico.

5.- SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A EDIFICIOS.

Los pasos a seguir para la solicitud del suministro de energía eléctrica, en la edificación, constituyen una larga tramitación ante las empresas eléctricas, ayuntamientos y administraciones autonómicas. En este punto se describen dichos pasos.

5.1.- Tramites con las empresas eléctricas.

Cuando se realiza la solicitud de la acometida de obra del edificio ante la empresa eléctrica es conveniente solicitar a la vez la acometida definitiva. Esto permite utilizar la misma acometida, tanto para el período de obra como para el definitivo, con el consiguiente ahorro económico que comporta. En la solicitud debe figurar el nombre del promotor de la construcción, con su identificación, siendo él el responsable de todas las gestiones con la empresa eléctrica.

5.1.1.- Documentación.

Para las solicitudes de acometidas los documentos a presentar son:

- Impreso normalizado de la empresa eléctrica para solicitud de suministro, según modelo de la figura 1.
- Planos de situación del edificio a escala (1:2.000, 1:5.000 ó 1:10.000) lo más detallados posible; en ellos debe figurar el lugar del nuevo suministro, así como su relación con otras edificaciones existentes.

Si la acometida es definitiva, se presentarán, además, los documentos siguientes:

- Planos de planta y alzados del edificio con situación de portales y centralización de contadores.
- Proyecto de instalación eléctrica, en el caso que lo exija la administración.

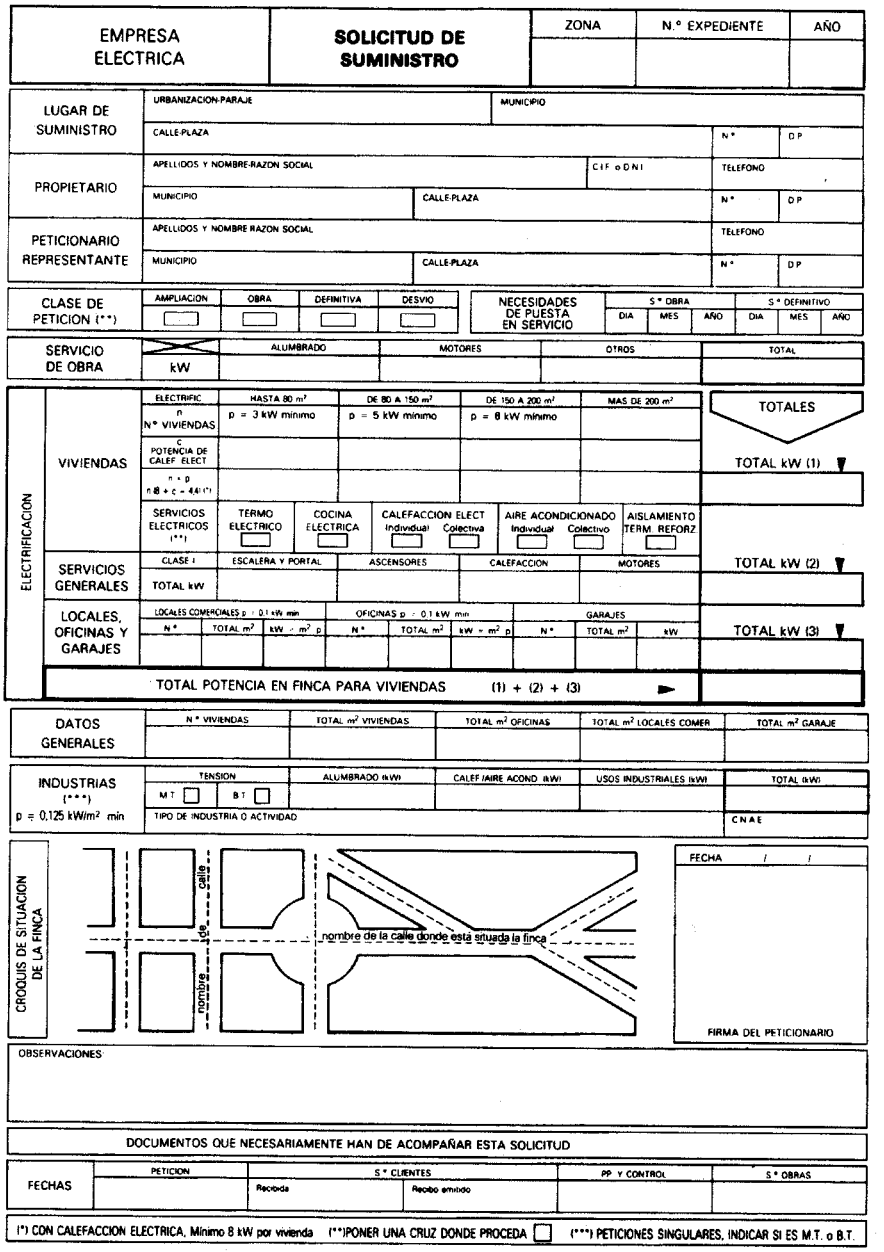


Figura 1. Hoja de solicitud de suministro.

Independientemente de esta documentación, y para poder iniciar las obras de acometidas, son necesarias las licencias municipales correspondientes.

5.1.2.- Previsiones.

En los suministros de obra han de tenerse en cuenta los datos siguientes:

- La ubicación de la caja general de protección.
- El armario de medida y control.

Si los suministros son definitivos se tomarán en consideración otros factores:

a) Centro de transformación. Cuando la solicitud exceda de 50 kVA, de acuerdo con el artículo 17 del reglamento electrotécnico para baja tensión, el promotor preverá un local adecuado para la posible instalación de un centro de transformación, con el fin de atender el suministro, con acceso directo desde la calle y libre de cargas.
b) Caja general de protección. El promotor debe tener previsto, en el portal, fachada u otros servicios comunes de la finca que sean accesibles, el hueco o huecos necesarios para la instalación de las cajas generales de protección, según las normas particulares de la empresa eléctrica.
c) Centralización de contadores. Igualmente debe preverse la ubicación de un local de fácil acceso para la centralización de contadores, de acuerdo con lo indicado en el reglamento electrotécnico para baja tensión (REBT), y con las normas particulares de la empresa eléctrica.
d) Chalet, parcelas con zona ajardinada y edificios retranqueados de la línea de calle. Las cajas o armarios de protección, según el modelo normalizado por la empresa eléctrica, se instalarán en el cerramiento de la parcela para la conexión del terminal de la acometida y la instalación de contadores, en su caso.

5.2.- Tramites municipales.

Las empresas eléctricas gestionan los permisos municipales que en cada caso sean necesarios, según el tipo de obra a realizar. Estos permisos se enumeran a continuación:

- Licencia municipal de calas.
- Licencia municipal de canalización.
- Licencia municipal de obras del centro de transformación. Permisos de terceros para la realización de la instalación proyectada.

Estos trámites se inician una vez elegidas las condiciones económicas entre el peticionario y la empresa eléctrica. En algunos casos pueden llegar a alargarse durante mucho tiempo.

5.3.- Tramites con la administración autonómica.

Simultáneamente a la realización de los trámites con las empresas eléctricas, tanto para el suministro de energía de obra como para el definitivo, es necesario gestionar ante la Dirección General de Industria, Energía y Minas, de la Consejería de Trabajo, Industria y Comercio de la comunidad autónoma correspondiente, los trámites que se indican a continuación, según sea preceptiva o no la presentación de proyecto.

5.3.1.- Documentación y tramitación con presentación de proyecto.

Quedan sujetas a estas normas las instalaciones que determinan el apartado 1.1 de la instrucción MIE BT 041 del reglamento electrotécnico para baja tensión, entre las que se encuentran:

- Edificios de nueva construcción de potencia igual o superior a 100 kW.
- Locales comerciales o de servicios de superficie igual o superior a 300 m^2 y/o potencia igual o superior a 75 kW.
- Instalaciones provisionales de obra con potencia superior a 100 kW.
- Locales de pública concurrencia, de reunión, etc..

Al iniciar la instalación eléctrica, la documentación a presentar es:

a) Proyecto redactado por técnico competente y visado por el colegio oficial correspondiente.
b) Solicitud de registro de proyecto.

Por el contrario, una vez terminada la instalación será necesario presentar:

c) Fotocopia del registro de proyecto.
d) Boletines de instalaciones eléctricas y fichas técnicas.
e) Certificado de la dirección técnica de obras visado por el colegio oficial correspondiente.
f) Fotocopia del carnet de instalador y del documento de calificación empresarial del mismo.
g) En el caso de garajes es necesario, además, presentar el alta en el registro industrial de los mismos.

Para las instalaciones provisionales de obra, de potencia igual o mayor de 100 kW, habrá de aportarse, con independencia de los cuatro últimos documentos mencionados, los que siguen:

h) Fotocopia del alta en el registro industrial de la empresa constructora.
i) Relación de maquinaria de obra.

5.3.2.- Documentación y tramitación sin presentación de proyecto.

Se someten a esta tramitación aquellas instalaciones no incluidas en el apartado 1.1 de la MIE BT 041 del reglamento electrotécnico para baja tensión, entre las que se encuentran los edificios y locales de potencia o superficie inferior a los citados anteriormente y las instalaciones provisionales de obra con potencia inferior a 100 kW.

Terminada la instalación eléctrica tiene que presentarse la documentación que se indica:

a) Documentación de la instalación redactada por instalador autorizado.
b) Boletines de instalaciones eléctricas y fichas técnicas.
c) Fotocopia del carnet del instalador y del documento de calificación empresarial.

Si la instalación de obra es provisional, se adjuntarán, con independencia de la documentación anterior, los documentos siguientes:

d) Fotocopia del alta en el registro industrial de la empresa constructora.
e) Relación de la maquinaria de obra.

5.4.- Realizaciones.

Los plazos máximos, contados en días hábiles, para la puesta en servicio de la instalación en suministros de baja tensión son:

a) 10 días cuando no es preciso realizar ninguna extensión de la red de baja tensión.
b) 50 días cuando únicamente se necesite la extensión de la red de baja tensión.
c) 90 días si es necesario construir un centro de transformación.
d) 130 días si se precisan construir varios centros de transformación.

En los casos que se considere necesaria la construcción de uno o varios centros de transformación para uso de la empresa eléctrica, el plazo no entrará en vigor hasta la firma del documento de cesión, uso o propiedad del local correspondiente, a elección del solicitante. Sí es imprescindible, en cambio, para la ejecución de la acometida que estén instaladas las cajas generales de protección por parte del solicitante.

5.5.- Verificación y contratación.

Una vez terminada la instalación eléctrica, el peticionario debe comunicarlo a la empresa eléctrica para proceder a la verificación de la misma. Terminada ésta, la empresa eléctrica notifica al peticionario bien la aprobación, o las anomalías que deben ser corregidas.

5.5.1.- Contratación.

La documentación y tramitación para realizar la contratación del suministro depende del tipo al que éste pertenezca:

- Para **suministros de obra** la documentación y tramitación es:

  - Verificación previa de las instalaciones eléctricas por parte de la empresa eléctrica.
  - Boletines y fichas técnicas visados por la Dirección General de Industria y Energía.

- Para **suministros definitivos:**

La contratación del suministro a cualquier usuario de una vivienda está condicionada a la previa contratación de los servicios generales y comunes de la finca siendo necesarios para estos suministros generales y comunes los siguientes documentos y trámites:

a) Verificación previa de las instalaciones eléctricas por parte de la empresa eléctrica.
b) Boletines y fichas técnicas que comprendan todas las instalaciones de los servicios generales y comunes de la finca visados por la Dirección General de Industria y Energía.
c) Licencia de primera ocupación.

Por su parte, para los suministros de viviendas y locales comerciales son necesarios los trámites que se indican seguidamente:

d) Verificación previa de las instalaciones eléctricas por parte de la empresa suministradora.

e) Boletines y fichas técnicas que comprendan todas las instalaciones de los servicios generales y comunes de la finca, visados por la Dirección General de Industria y Energía.
f) Licencia de primera ocupación. Para los suministros de viviendas y locales comerciales son necesarios.
g) Verificación previa de las instalaciones eléctricas por parte de la empresa eléctrica.
h) Boletines y fichas técnicas visados por la Dirección General de Industria Energía y Minas.
i) Documento acreditativo de propiedad o arrendamiento.
j) En el caso de viviendas, además de lo anterior, cédula de habitabilidad y licencia de primera ocupación en aquellos municipios que tengan acordado dicha exigencia.

Todos estos pasos en la tramitación de los suministros eléctricos de baja tensión se estructuran en el organigrama de la figura 2.

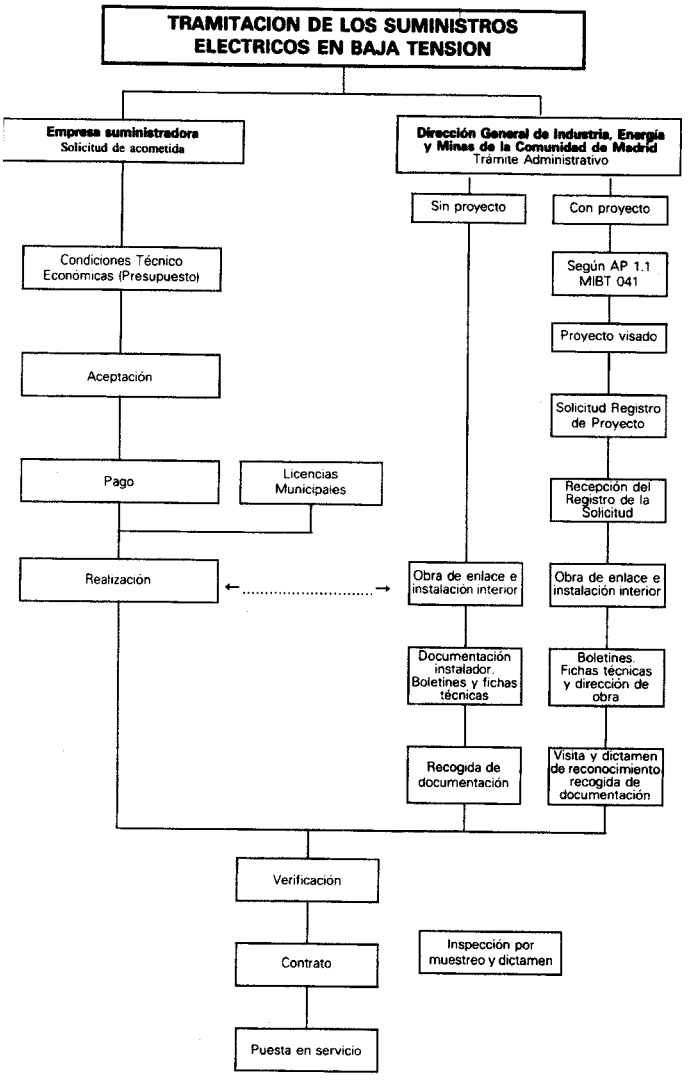


Figura 2. Organigrama de tramitación de suministros en baja tensión

5.6.- Suministros para rehabilitación de edificios.

En la rehabilitación de edificios, el suministro de energía eléctrica puede presentar tres variantes que dependen del estado y utilidad en que se encuentra la acometida antigua. Dichas variantes son las que siguen:

1. La acometida antigua es válida por potencia y por tensión, tanto para la acometida de obra como para la acometida definitiva.
   En este caso no se devengan derechos de acometida. Si se produjera algún gasto en la adaptación de la acometida antigua, por cambiarse el punto de entrega de suministro, se convendrá previamente entre la empresa eléctrica y el peticionario el importe a satisfacer por el mismo.
2. La acometida antigua sólo es válida para la de obra pero no para la definitiva.
   Se siguen los trámites normales de solicitud de acometidas con la empresa eléctrica, aunque se aproveche la acometida existente para la obra con el objeto de reducir tiempos de ejecución y gastos.
3. La acometida antigua no es válida ni para obra ni para definitiva.
   En esta situación se está en el caso general de solicitud de un nuevo suministro. En los dos últimos casos, los derechos de acometida vienen regulados por el artículo 7.° del Real Decreto 2949/1982 sobre acometidas eléctricas, que a continuación se transcribe.

   > Art. 7.° "Los derechos de acometida ya satisfechos quedarán adscritos a cada una de las instalaciones, viviendas, locales, parcelas, etc., para los que se abonaron hasta que cause baja el primer usuario de la energía de cada una de ellas, cualquiera que sea el plazo transcurrido".

   A partir de la baja de un abonado, los derechos de acometida permanecerán adscritos a la instalación durante los períodos de tiempo siguientes:
   a) Para suministros en baja tensión la permanencia será de tres años.
   b) Para suministros en alta tensión la permanencia será de cinco años.

   Cuando el primer usuario contrata una potencia inferior a la satisfecha por el solicitante inicial, la diferencia tendrá los mismos plazos de permanencia que los establecidos por la baja de un abonado. En el caso de cambio de tensión se considerará que la potencia anterior queda adscrita al nuevo suministro, con el valor del baremo que corresponda a la nueva tensión.

6.- PROYECTO DE UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA EN UN EDIFICIO.

En este punto se resumen los pasos a seguir en el análisis del diseño y dimensionado de las instalaciones eléctricas de edificios, así como las directrices del proyecto, con la autorización y dirección que requieren los diversos tipos de instalaciones. Igualmente, incluye los componentes, características y tablas utilizadas para el cálculo de un proyecto.

6.1.- Directrices del proyecto.

La Dirección General de Industria y Energía de cada comunidad es la encargada de la instalación y resolución de los proyectos relacionados con la energía eléctrica. Estos proyectos quedarán incluidos en uno de los dos grupos siguientes: alta tensión o baja tensión, dependiendo en cada caso de que la tensión de alimentación sea o no superior a 1.000 V en corriente alterna.

Tipo de instalación	Potencia (kW)	Aprobación previa de proyecto	Dirección de obra	Boletín de instalador
1. Industrias y talleres en general.	≤20	X	—	X
2. Industrias y talleres en general.	>20	X	X	X
3. Viviendas individuales, cualquier grado de electrificación.	Cualquiera	—	—	X
4. Edificios destinados a viviendas.	≤50	—	—	X
5. Edificios destinados a viviendas.	>50 y ≤100	—	X	X
6. Edificios destinados a viviendas.	>100	X	X	X
7. Locales de espectáculos (cines, teatros, discotecas, salas de fiesta, salas de conciertos, etc.).	Cualquiera	X	X	X
8. Establecimientos sanitarios (clínicas, hospitales, sanatorios, ambulatorios, etc.).	Cualquiera	X	X	X
9. Pequeños locales de reunión (restaurantes, cafés y bares hasta 200 m²).	≤10	—	—	X
10. Pequeños locales de reunión (restaurantes, cafés y bares hasta 200 m²).	>10	—	X	X
11. Locales de reunión (centros de enseñanza, iglesias, salas de conferencias, hoteles, restaurantes, cafés y bares de más de 200 m², bibliotecas, museos, casinos, aeropuertos, estaciones de viajeros, estacionamientos subterráneos públicos, fondas, plazas de toros, grandes almacenes, etc.).	≤10	X	—	X
12. Locales de reunión (centros de enseñanza, iglesias, salas de conferencias, hoteles, restaurantes, cafés y bares de más de 200 m², bibliotecas, pubs, casinos, aeropuertos, estaciones de viajeros, estacionamientos subterráneos públicos, fondas, plazas de toros, grandes almacenes, etc.).	>10	X	X	X
13. Establecimientos comerciales (comercio en general, bancos, oficinas, etc.).	≤50	—	—	X

Tabla 1. Tipo de instalaciones

Tipo de instalación	Potencia (kW)	Aprobación previa de proyecto	Dirección de obra	Boletín de instalador
14. Establecimientos comerciales (comercio en general, bancos, oficinas, etc.).	>50	X	X	X
15. Locales con riesgo de incendio o explosión (fábricas de gases, salas de gasógenos, casetas de pintura con pistola, lavanderías en seco y tintorerías que utilicen disolventes inflamables, locales donde se manipulen o almacenen cereales, locales donde se manipulen o almacenen polvos metálicos, locales donde se manipulen o almacenen carbón, industrias textiles, talleres de confección, aserraderos de madera, carpinterías, zonas comprendidas en los volúmenes peligrosos según MIBT-027 de las estaciones de servicio, garajes y talleres, etcétera).	Cualquiera	X	X	X
16. Locales mojados (establecimientos de baños públicos, piscinas, saunas, lavaderos públicos, cámaras frigoríficas, estaciones de lavado de coches, granjas, instalaciones a la intemperie, etc.).	≤10	X	—	X
17. Locales mojados (establecimientos de baños públicos, piscinas, saunas, lavaderos públicos, cámaras frigoríficas, estaciones de lavado de coches, granjas, instalaciones a la intemperie, etc.).	>10	X	X	X
18. Locales húmedos, polvorientos o con riesgo de conexión (bombas de elevación de aguas, machacadoras de piedra, baterías de acumuladores).	≤10	—	—	X
19. Locales húmedos, polvorientos o con riesgo de conexión (bombas de elevación de aguas, machacadoras de piedra, batería de acumuladores).	>10	—	X	X
20. Alumbrados públicos.	≤20	X	—	X
21. Alumbrados públicos.	>20	X	X	X

Tabla 2. Tipo de instalaciones

Tipo de instalación	Potencia (kW)	Aprobación previa de proyecto	Dirección de obra	Boletín de instalador
22. Redes de distribución públicas.	Cualquiera	X	X	X
23. Redes de distribución privadas.	≤50	X	—	X
24. Redes de distribución privadas.	>50	X	X	X
25. Instalaciones temporales (ferias, etcétera).	≤10	—	—	X
26. Instalaciones temporales (ferias, etcétera).	>10	—	X	X
27. Instalaciones para obras.	≤50	—	—	X
28. Instalaciones para obras.	>50	—	X	X
29. Otras instalaciones no incluidas en epígrafes anteriores.	Cualquiera	X	X	X

NOTAS:

1) Si una instalación pudiese clasificarse en más de un epígrafe, se aplicará la tramitación más desfavorable.
2) Los cambios de titularidad que no afecten a las características de la instalación se realizarán con un boletín de instalador.
3) Todas las ampliaciones que supongan un aumento de la potencia instalada superior al 50 por 100 de la primitiva, se considerarán a todos los efectos como instalaciones nuevas, y requerirán presentación de proyecto.
4) Las ampliaciones, cualquiera que sea su potencia, de locales de pública concurrencia, excepto establecimientos comerciales con P ≤ 50 kW, de locales con riesgo de incendio o explosión y de locales mojados, requerirán aprobación previa de proyecto.
5) En todas las ampliaciones, cualquiera que sea su potencia, cuando la potencia ampliada supere la capacidad autorizada a un instalador, se deberá presentar certificado de dirección de obra.

Tabla 3. Tipo de instalaciones

6.2.- Datos técnicos del proyecto.

Los datos técnicos, que todo proyecto eléctrico debe incluir, se agrupan en los dos apartados siguientes: dimensionado de la instalación eléctrica y componentes y características. En el primero de ellos se determinan los datos relativos al tipo de proyecto (edificio, vivienda unifamiliar, oficina, etc.) con las previsiones de potencia e instalación de enlace, interior y tierras. El segundo apartado comprende las especificaciones que tienen que cumplir los componentes utilizados en la instalación, con las características requeridas para la misma.

6.2.1.- Dimensionado de la instalación eléctrica.

En este apartado se desarrollarán los puntos enumerados a continuación:

- Características del edificio, previsión de cargas.
- Instalación de enlace, instalación interior.
- Instalación de tierras.
- Esquemas eléctricos.

6.2.2.- Componentes y características del proyecto.

En este punto se especifican las características que deben cumplir todos los elementos que componen la instalación eléctrica:

- Caja general de protección.
- Línea repartidora.
- Centralización de contadores.
- Caja general de protección y medida.
- Derivaciones individuales.
- Elementos de la instalación interior.
- Instalación de tierra.

TEMA 2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS

1.- ESQUEMAS ELÉCTRICOS.

Se puede decir, que el lenguaje propio de las instalaciones eléctricas está en sus esquemas y las palabras y letras que constituyen ese lenguaje son los símbolos eléctricos. El símbolo es, por tanto, la representación gráfica de un elemento de la instalación, bien de una parte vital de la misma, como conductor, fusible, interruptor, etc, como de un receptor que funcione con la corriente eléctrica, como cualquier elemento auxiliar de ella. Es decir, que existe un símbolo para cada elemento del circuito eléctrico.

Ante la ambigüedad de normas de simbología existentes, debemos conocer las más usuales y a veces las convencionales que una utilización constante han señalado de uso tan común como las normalizadas. Independientemente de la utilización de las Normas Españolas (UNE) es conveniente conocer las siguientes:

- (BS) (Bristish Standard). Prescripciones británicas, que también se encuentran con las siglas BSI, que corresponden al Bristish Standard Institution, es decir, al organismo emisor de las normas B.S..
- (DIN) Normas alemanas para la industria (Deutsche Institut für Normung).
- (NF) Normas francesas.
- (ANSI) Del Instituto de Normalización Nacional USA (American National Standars Instituto).
- (IEC) Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission).

El esquema eléctrico, lo podemos definir como la representación de un circuito o de una parte del mismo, que indica como se conectan y se relacionan entre sí las diferentes partes que constituyen una instalación o parte de ella. Para esta representación nos valemos de símbolos, figuras, detalladas, trazos, marcas y nomenclaturas.

Los esquemas eléctricos se clasifican por su objeto y la forma de representación.

2.- ESQUEMAS EXPLICATIVOS.

Que tienen por objeto hacer comprender el funcionamiento detallado, bien de un circuito o bien de los mecanismos que forman parte del mismo.

3.- ESQUEMAS DE CONEXIONES.

Que tienen por misión indicar la forma de conectar una instalación o un equipo o elemento de la misma. Puede ser interiores o exteriores.

4.- ESQUEMAS UNIFILARES.

Son los que se representan por un trazo único. Con ello se trata de simplificar los propios esquemas, evitando el confusionismo que se forma con un elevado número detrazos. Por este sistema se representan las líneas y los elementos de los circuitos, distinguiendo con trazos cortos y oblicuos el número de conductores de una línea o el número de polos de un mecanismo.

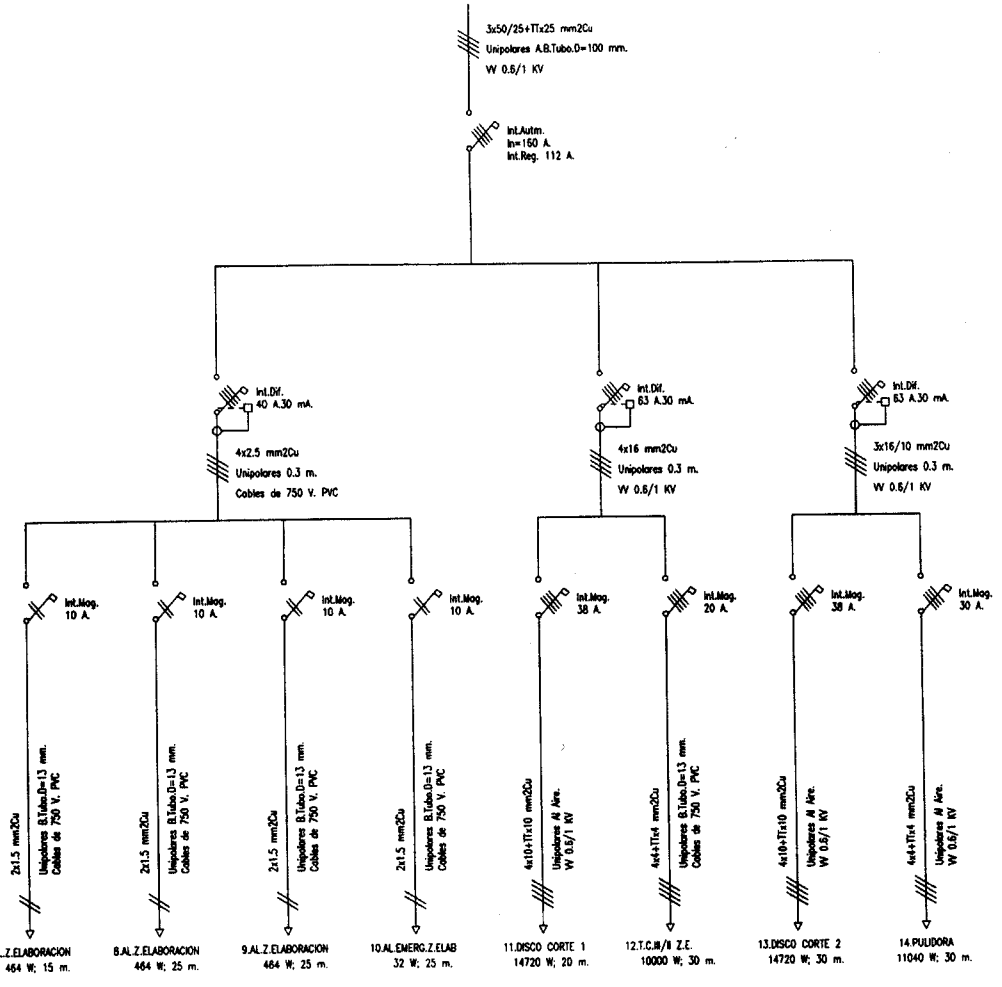


Figura 1. Representación unifilar de una instalación eléctrica.

5.- ESQUEMAS MULTIFILARES.

Son aquellos en que cada conductor se representa por una línea particular y, además, los mecanismos se representan con todos sus polos.

En la figura 3 se indica un ejemplo de un esquema explicativo y de conexiones de una instalación de alumbrado automático de escaleras con puntos de luz dobles fluorescentes de 20 W, en sus dos formas, unifilar y multifilar.

En las instalaciones de viviendas se usa fundamentalmente en los planos de proyecto la representación unifilar, tal como se representa en la figura 4, si bien la verdadera dimensión de la instalación (número de circuitos, disposición, cuadros, mecanismos,etc.) sólo se obtiene en la representación multifilar de la instalación, tal y como se indica en la figura 5, donde claramente para el instalador queda reflejada la verdadera instalación de la vivienda.

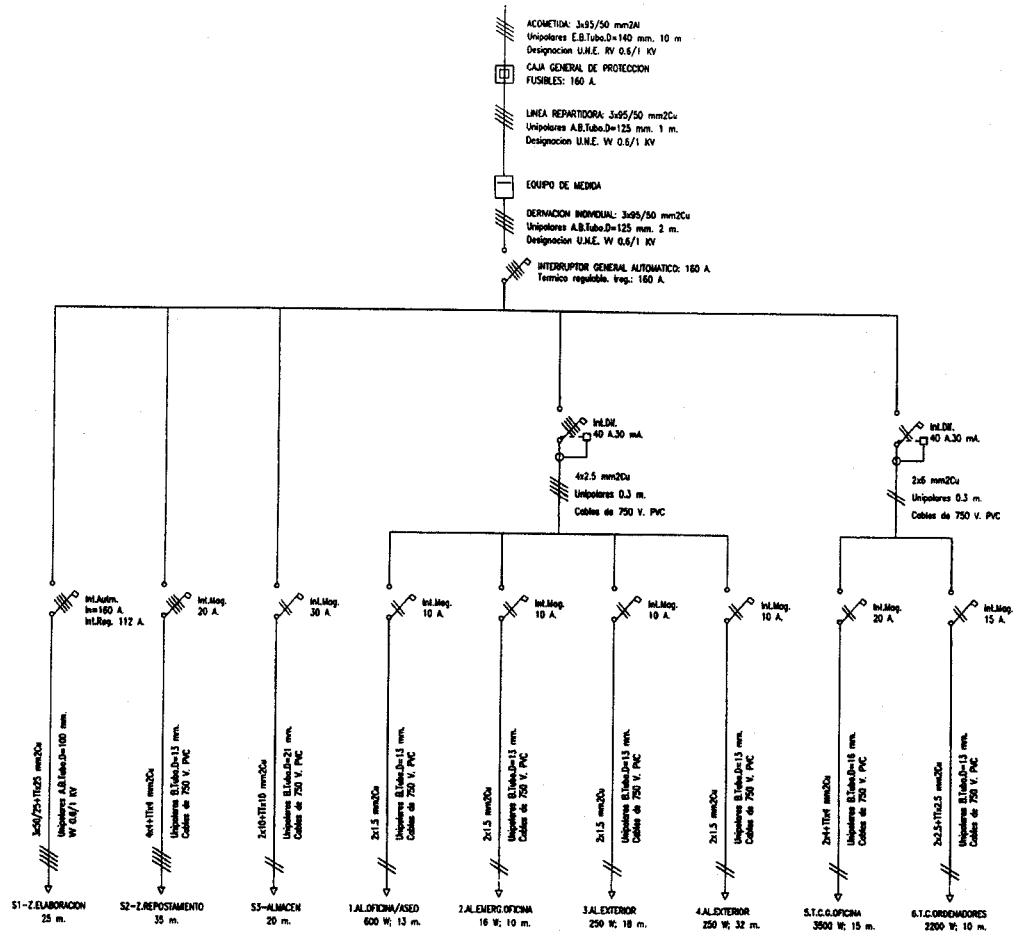


Figura 2. Representación unifilar de una instalación eléctrica.

6.- RELACIONES ENTRE ESQUEMAS.

Es importante destacar que, sea cual fuese la representación eléctrica del esquema, debe haber siempre una relación total entre los distintos sistemas de representación, ya que, en definitiva, el esquema sintetiza siempre la disposición eléctrica entre los diversos elementos que componen la instalación y, por tanto, para el correcto funcionamiento de todos los receptores,estas posiciones son inalterables, una vez estudiadas y definidas. Ahora bien, conviene destacar la diferencia entre el esquema eléctrico y la situación topográfica de la instalación real en el edificio, la cual, lógicamente, abarca magnitudes dimensionales muy superiores a la que representa el simple esquema,aunque no hay que olvidar que las averías

en las instalaciones se interpretan y se resuelven mucho mejor en el esquema, donde se puede seguir el funcionamiento, mejor que en la propia realidad de la instalación.

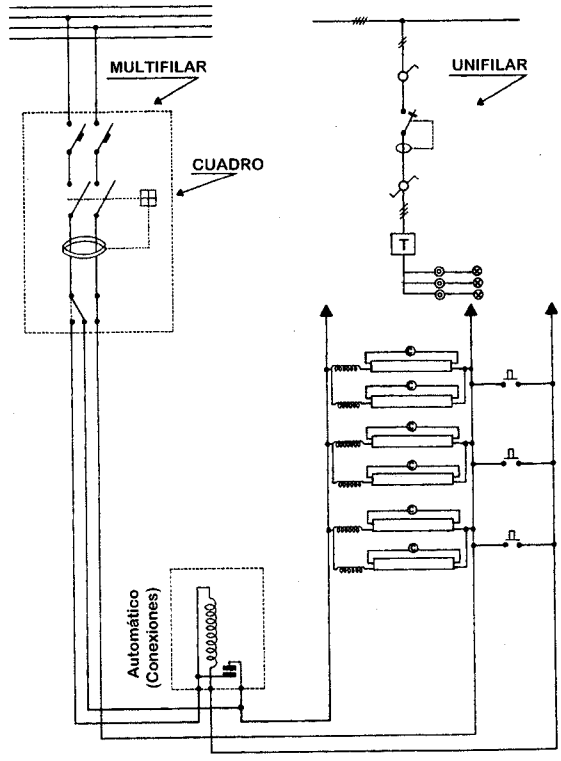


Figura 3. Esquema explicativo y de conexiones de una escalera con luz fluorescente.

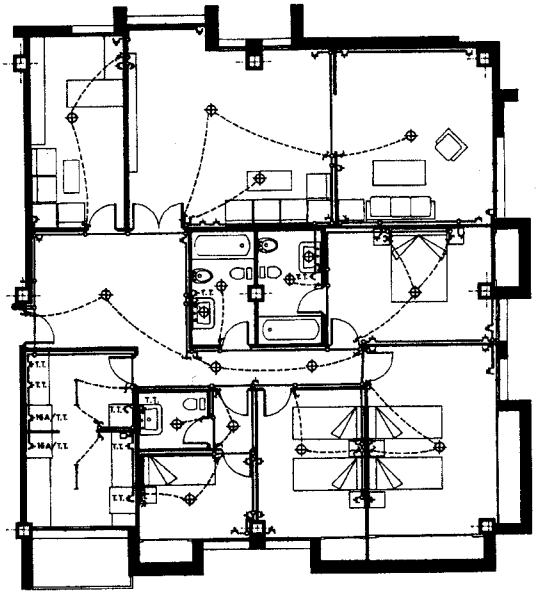


Figura 4. Representación en planta de una instalación eléctrica.

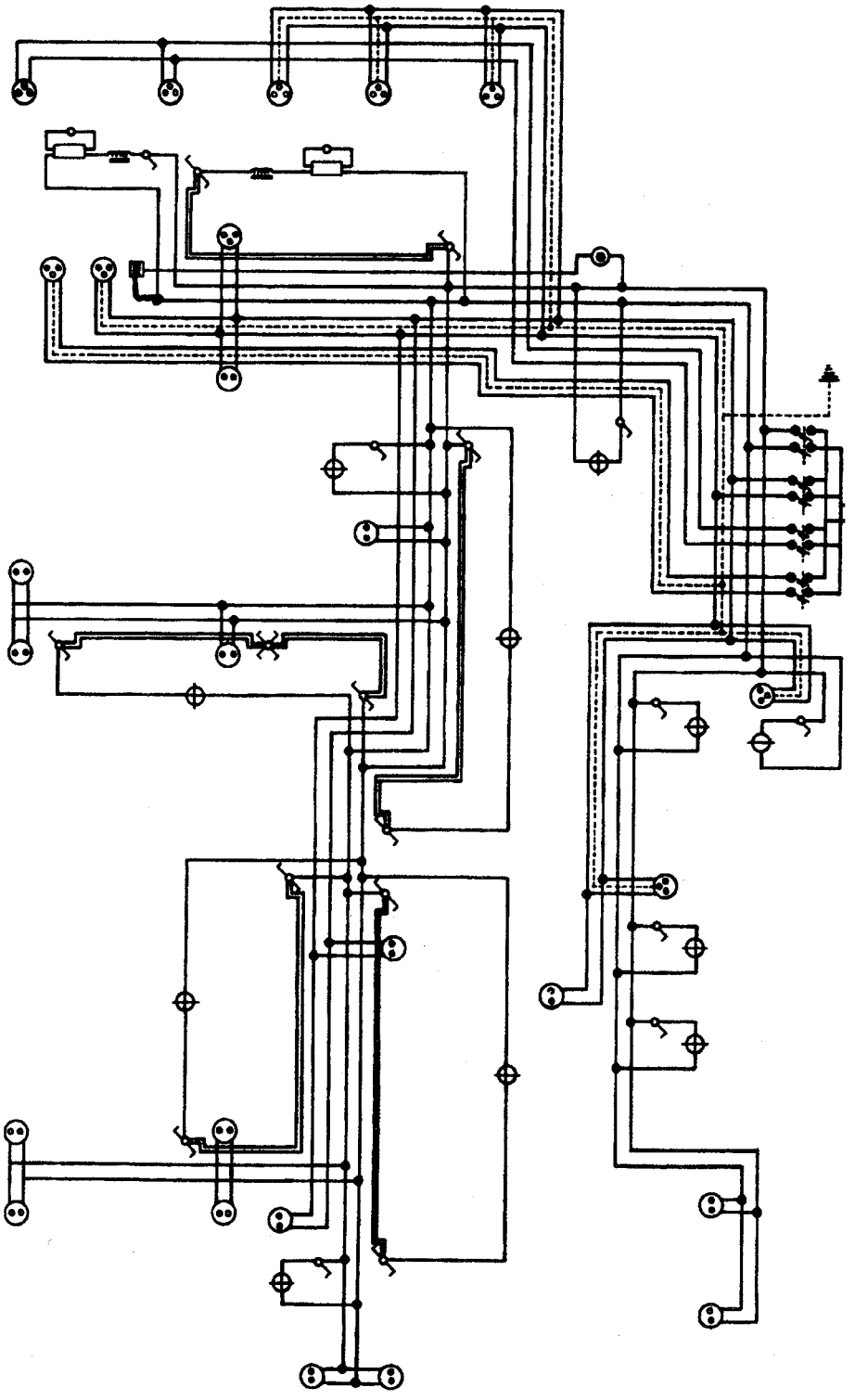


Figura 5. Representación multifilar de una instalación eléctrica.

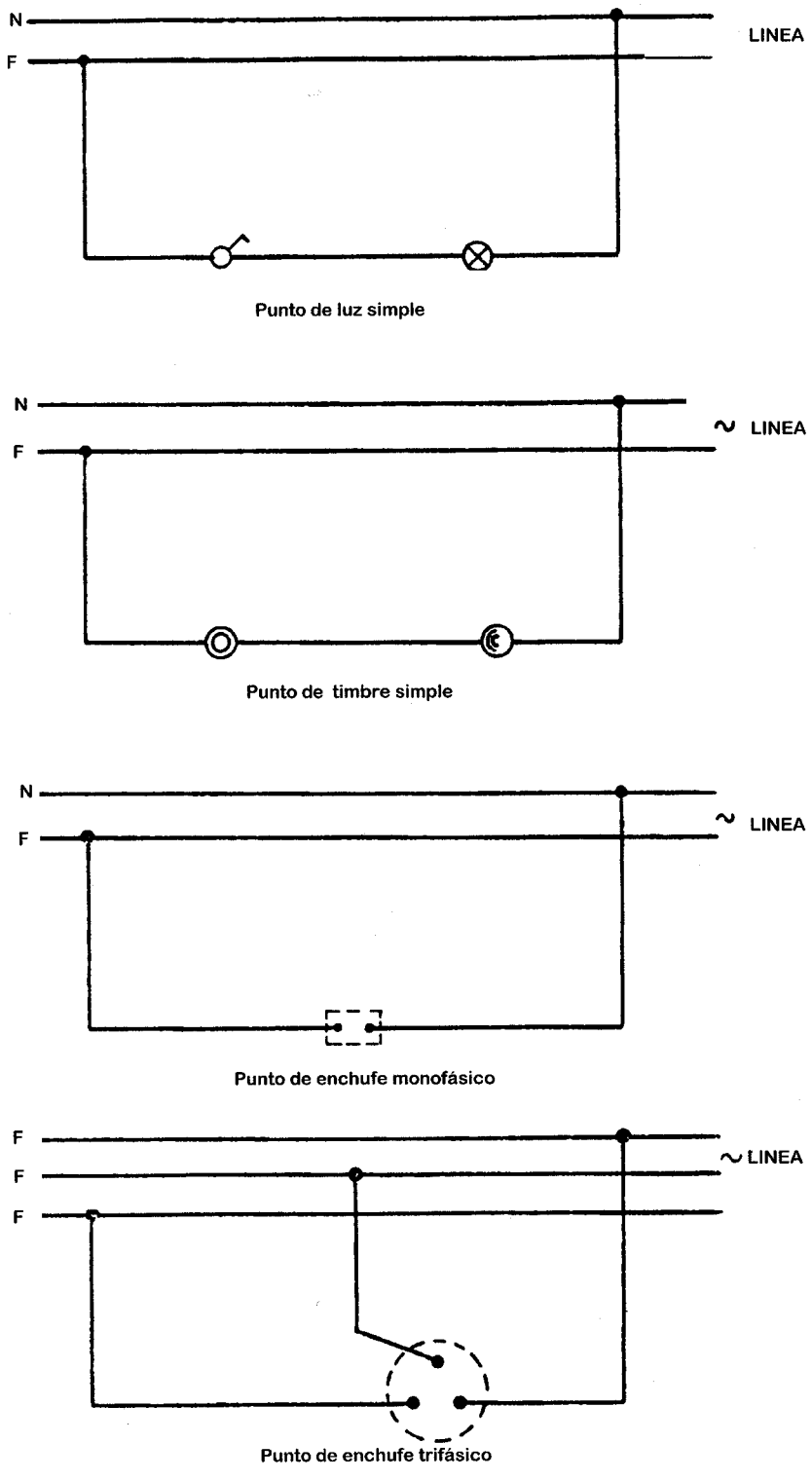


Figura 6. Esquemas multifilares más usados en las instalaciones eléctricas de edificios.

TEMA 3. PREVISIÓN DE LA POTENCIA TOTAL NECESARIA EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA

1.- GENERALIDADES.

Es evidente, que en la construcción de cualquier edificio hoy en día, por muy diversa que sea su utilización, la instalación eléctrica representa una necesidad, como dotación energética a dicho edificio, que permita, la utilización de sistemas de alumbrado, de modernos sistemas industriales como, elevación y transporte interior (ascensores y montacargas), técnicas del frío y calor (refrigeración y calefacción) etc. y si el edificio está destinado a viviendas, podemos decir que la Instalación Eléctrica completa su habitabilidad, permitiendo su iluminación, climatización, uso de electrodomésticos, etc..

La instalación eléctrica representa un nivel de actividad a la clase pasiva del edificio, y debe ir completamente de acuerdo con el grado o nivel de uso de esa actividad, estableciéndose en cinco los apartados que diferencian los sistemas de electrificación del edificio:

- Primero: Edificios destinados principalmente a viviendas.
- Segundo: Edificios comerciales o de oficinas.
- Tercero: Edificios públicos (teatros, cines, etc).
- Cuarto: Edificios destinados a una industria.
- Quinto: Edificios destinados a una concentración de industrias.

Como es lógico, el diseño de cada instalación difiere en lo que se refiere al trazado y ejecución según el apartado en que se halle encuadrado el tipo de edificio y su aplicación, destacando en todos ellos una misión primordial de la instalación, como es el alumbrado y consecuentemente una instalación de fuerza que permita el desarrollo y funcionamiento de aparatos y máquinas que precisen cada uno.

2.- DISEÑO DE LA INSTALACIÓN DE VIVIENDAS.

En lo que se refiere a los edificios destinados principalmente a viviendas, la instalación eléctrica de alumbrado, llevará su disposición a todos los puntos de luz que permitan la perfecta iluminación del edificio con arreglo a todas las técnicas desarrolladas en él, atendiendo a consideraciones de trabajo, de funcionalidad, de prevención de necesidades y de estética que en su conjunto permitan un cierto grado de confort.

La instalación de fuerza, desarrollará, hasta cada punto donde sea necesario, su alcance, que permita la utilización de cualquier técnica industrial, aplicada al logro del grado de confort deseado, (ascensores, climatización, máquinas, etc.) y, además el emplazamiento dentro de la vivienda, de todas las máquinas de uso racional que faciliten las tareas y labores domésticas (electrodomésticos) tanto en los emplazamientos fijos como móviles, buscando siempre en el diseño de la instalación, las distancias más cortas y los puntos más accesibles, pensando siempre en la fácil inspección y acceso a la misma.

En los principios generales de diseño de viviendas, se hará un análisis meticuloso de habitación por habitación, buscando los puntos más cómodos y adecuados de emplazamiento de receptores y mecanismos, poniéndose en lugar del usuario de cada habitación y pensando

en los usos de cada una de ellas; así, por ejemplo, en pasillosy escaleras se dispondrán los puntos de alumbrado conmutados, estudiando la circulación y paso en los mismos, en dormitorios la posibilidad de alumbrados generales con mando desde la puerta y alumbrados localizados junto al techo, conmutados o no según las circunstancias, etc.. En los cuartos de baño, al margen de seguir toda la normativa de seguridad, la colocación de puntos de enchufe y de luz enclavados en los lugares adecuados a su uso. En cocinas con una distribución de alumbrado y fuerza acorde con el uso de electrodomésticos y máquinas, etc., es decir, el diseño presupone un estudio previo de necesidades en cada lugar.

Los servicios generales del edificio, requieren otro estudio de diseño independiente, que permita el paso de líneas por las zonas del edificio menos privatizadas (pasillos, portales, etc.) y con recorridos no excesivamente sinuosos y largos y que en cualquier caso, no desemboquen en una improvisación rápida en la obra por falta de una planificación previa.

2.1.- Niveles o grados de electrificación.

Referido a edificios destinados principalmente a viviendas, se contemplan cuatro niveles o grados de electrificación:

- Mínimo.
- Medio.
- Elevado.
- Especial.

- **Electrificación mínima**:

Previsión de demanda máxima total: 3.000 W.
N° de circuitos: 2.

1.- Destinado a puntos fijos de luz y tomas de corriente para alumbrado (1 mm^2).
2.- Puntos de enchufe de fuerza (1,5 mm^2).

Permite la instalación de:

- Alumbrado.
- Lavadora sin calentador eléctrico.
- Nevera.
- Plancha, radio y T.V..
- Pequeños aparatos electrodomésticos.

- Cuartos de estar:
  Un punto de luz y una toma de corriente por cada 6 m^2 de superficie.
- Dormitorios:
  Un punto de luz y dos tomas de corriente de 10 A.
- Cocina:
  Un punto de luz y 3 tomas de corriente de 10 A con toma de tierra.
- Baño o aseo:
  Un punto de luz y una toma de corriente de 10 A con toma de tierra.
- Vestíbulo:
  Un punto de luz y toma de corriente de 10 A.
- Pasillos:
  Un punto de luz.

- **Electrificación media:**

Previsión de demanda máxima total: 5.000 W.
N° de circuitos: 4.

1.- Puntos fijos de luz y toma de comente de alumbrado (1 mm^2).
2.- Circuito destinado a lavadora con calentador y secador (4 mm^2).
3.- Circuito destinado a cocina (6 mm^2).
4.- Circuito destinado a puntos de enchufe fuerza (2,5 mm^2).

Permite la instalación de:

- Alumbrado.
- Cocina eléctrica.
- Cualquier tipo de lavadora.
- Calentador de agua.
- Nevera.
- Plancha, radio y T.V..
- Pequeños aparatos electrodomésticos.

- Cuarto de estar:
  Un punto de luz, una toma de corriente cada 6 m^2 y de las cuales una como mínimo de 10 A.
- Dormitorios:
  Un punto de luz y 3 tomas de corriente de 10 A.
- Cocina:
  Uno o dos puntos de luz, 2 tomas de corriente de 10 A con toma de tierra, 1 toma de corriente de 16 A para lavadora automática con toma de tierra, 1 toma de corriente de 25 A con toma de tierra para cocina eléctrica.
- Baños y aseos:
  Un punto de luz, 1 toma de corriente con toma de tierra y si se prevee la lavadora automática una toma de corriente de 16 A con toma de tierra.
- Vestíbulo:
  Un punto de luz y una toma de corriente de 10 A por cada 12 m^2 de superficie.
- Pasillos:
  Un punto de luz cada 5 m de longitud.

- **Electrificación elevada:**

Previsión de demanda máxima total: 8.000 W.
N° de circuitos: 6.

1,2.- Circuitos para puntos fijos de luz y tomas de corriente y alumbrado (1 mm^2).
3.- Circuito destinado a lavadora, secador y calentador (4 mm^2).
4.- Circuito destinado a cocina (6 mm^2).
5,6.- Circuitos destinados a tomas de corriente de fuerza (2,5 mm^2).

Permite la instalación de:

Todos los elementos de electrificación media, más un sistema de calefacción eléctrica y otro de acondicionamiento de aire.

En este sistema se prevee el mismo reparto de habitaciones que en el grado de electrificación media, más las tomas de corriente para los radiadores de calefacción y los acondicionadores de aire, allí en los puntos donde vayan colocados con sus correspondientes tomas de tierra.

- **Electrificación especial:**

Para aquellos casos en que, por circunstancias especiales de la vivienda o local, precise una previsión de cargas superior a los 8.000 W y en este caso queda supeditado a cada circunstancia particular.

	Grado de Electrificación			
	MÍNIMO	**MEDIO**	**ELEVADO**	**ESPECIAL**
Cuarto de estar	1 punto de luz/6 m² 1 enchufe 10 A +T.T. / 6 m²	1 punto de luz/6 m² 1 enchufe 10 A +T.T. / 6 m²	1 punto de luz/6 m² 1 enchufe 10 A +T.T. / 6 m² Enchufes de aire acondicioneado	A designar
Dormitorio	1 punto de luz 2 enchufes de 10 A + T.T.	1 punto de luz 2 enchufes de 10 A + T.T.	2 puntos de luz 2 enchufes de 10 A Enchufes de aire acondicionado	A designar
Cocina	1 punto de luz 1 enchufe de 10 A +T.T.	2 puntos de luz 2 enchufes de 10 A +1 enchufe de 16 A +T.T. 1 enchufe de 25 A +T.T.	2 puntos de luz 2 enchufes de 10 1 enchufe de 16 A Enchufes de aire acondicionado	A designar
Aseos	1 punto de luz 1 enchufe de 10 A + T.T.	1 punto de luz 1 enchufe de 10 A + T.T.	1 punto de luz 1 enchufe de 10 A +T.T. / 12 m²	A designar
Vestíbulo	1 punto de luz 1 enchufe de 10 A +T.T.	1 punto de luz 1 enchufe de 10 A +T.T. / 12 m²	1 punto de luz 1 enchufe de 10 A +T.T. / 12 m² Enchufes de aire acondicionado	A designar
Pasillo	1 punto de luz	1 punto de luz/ 5 m²	1 punto de luz/ 5 m² Enchufes de aire acondicionado	A designar

Tabla 1. Previsión de potencia en las distintas estancias de una vivienda.

	Grado de Electrificación			
	MÍNIMO	**MEDIO**	**ELEVADO**	**ESPECIAL**
Superficie útil máxima	Hasta 80 m²	Hasta 150 m²	Hasta 200 m²	A designar
Prestación máxima de potencia	1.000 W	5.000 W	8.000 W	A designar
Utilización máxima de servicio	Alumbrado Lavadora Frigorífico	Alumbrad Lavadora Frigorifico Lavavajillas Calentador Cocina eléctrica	Alumbrado Lavadora Frigorifico Lavavajillas Calentador Cocina eléctrica Aire acondicionado	A designar
Designación de circuitos	1 Alumbrado 2 Enchufes	1 Alumbrado 2 Enchufes 3 Lavadora 4 Cocina eléctrica	1 Alumbrado 2 Alumbrado 3 Enchufes 4 Lavadora 5 Cocina eléctrica 6 Aire acondicionado	A designar
Sección mínima de circuitos	1º 1.5 mm² 2º 2.5 mm²	1º 1.5 mm² 2º 2.5 mm² 3º 4 mm² 4º 6 mm²	1º 1.5 mm² 2º 1.5 mm² 3º 2.5 mm² 4º 4 mm² 5º 6 mm² 6º 6 mm²	A designar
Diámetro de tubos	1º 13 mm 2º 13 mm	1º 13 mm 2º 13 mm 3º 16 mm 4º 23 mm	1º 13 mm 2º 13 mm 3º 13 mm 4º 16 mm 5º 23 mm 6º 23 mm	A designar
Cuadro general de mando y protección	1 Diferencial de 25 A y 30 mA 2 PIA 10 A	1 Diferencial de 25 A y 30 mA. 1 PIA 10 A 1 PIA 15 A 1 PIA 30 A 1 PIA 25 A	1 Diferencial de 25 A y 30 mA. 2 PIA 10 A 1 PIA 15 A 1 PIA 20 A 1 PIA 25 A	A designar

Tabla 2. Características de los circuitos interiores en un vivienda.

Límite de aplicación. Superficie de las viviendas [m²]	Nivel o grado mínimo de electrificación que le corresponde	Potencia prevista [W]
Hasta 80	A= mínimo	3.000
De 81 a 150	B = medio	5.000
De 151 a 200	C = elevado	8.000
Mayor de 200	E = especial	A determinar

Tabla 3. Relación entre superficie, nivel o grado de electrificación y potencia.

El promotor, constructor o propietario pueden fijar un nivel o grado de electrificación superior al mínimo exigido para la superficie de una vivienda, cuando prevé mayor utilización que la indicada para cada nivel o grado.

2.2.- Previsión de huecos y espacios.

Uno de los problemas más agudos que fuerzan la improvisación a la hora de realizar la instalación eléctrica de un edificio, es, sin duda, la falta de previsión de los huecos y espacios disponibles por donde han de discurrir las instalaciones eléctricas y los emplazamientos adecuados de las acometidas, cuadros, contadores y armarios eléctricos.

Es buena norma y, además, el REBT (Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión) así lo aconseja en su artículo 16, facilitar a las empresas distribuidoras, antes de comenzar las obras, la potencia prevista y plano de situación, urbanización, fachadas y plantas, orientando en un estudio previo, las necesidades de previsión de locales (centros de transformación, cuartos de contadores, etc) y dimensiones aproximadas para previsión de huecos y espacios de utilización eléctrica.

Las dimensiones previsibles para estos locales, se darán más adelante al tratar de las condiciones que han de cumplir dichos locales, así como los elementos específicos cuando se trate su estudio (cajas de acometida, cuadros, etc), pero sí destacaremos aquí, la conveniencia de disponer las líneas principales en canaladuras preparadas para este único fin, fundamentalmente en la caja de escalera, que no tenga cambios de dirección y que esté cerrada, pero de forma que sea practicable, con un registro en todas las plantas.

La canaladura tendrá 15 ó 30 cm de fondo disponiendo los tubos de protección en una fila o en dos, manteniendo entre ejes de tubos una distancia mínima de 5 cm. El registro se situará a unos 20 cm del techo con una altura aproximada de 30 cm y de la anchura total de la acanaladura. Cada tres plantas, por lo menos, se dispondrá en dicha canaladura una placa corta-fuegos situada en la parte inferior de los registros.

2.3.- Trazado.

La elección del trazado más adecuado de las diferentes líneas que constituyan las instalaciones de enlace, es siempre un problema que requiere una planificación adecuada, y una gran atención, con el objeto de conseguir el mínimo de servidumbres y lograr un

trazado lo más directo posible y preferentemente siguiendo las zonas de usocomún (pasillos, escaleras, portales, etc.) sin olvidar los registros pertinentes, que en todo momento permitan el acceso directo a las líneas, fundamentalmente en los puntos más estratégicos.

3.- DISEÑO EN INSTALACIONES DE OFICINAS Y COMERCIOS.

En estos casos, las posibilidades de diseño son tan variadas que apenas se pueden dar normas de carácter general, ya que cada caso será tratado con la óptica que represente, en cuanto a las características, uso y utilización del local comercial u oficina.

En lo que se refiere a niveles de electrificación, la reglamentación prevé únicamente los mínimos que para locales comerciales y oficinas son de 100 W/m^2 con un mínimo de 5.000 W por abonado.

El reparto de cargas, en cuanto a la potencia total en estos locales, se puede estimar en los siguientes valores, aproximados:

Alumbrado	30%
Fuerza	5%
Ascensores	15%
Climatización	50%

Tabla 4. Reparto de cargas en una oficina o comercio.

De lo que se deduce, que en los casos en que exista climatización y aparatos elevadores, presupone una elevación considerable del grado de electrificación.

En el diseño de estas líneas, que componen el grueso de la instalación, se seguirá siempre las características constructivas del edificio, utilizando los sistemas convencionales de líneas bajo tubo empotrado y, según los casos, a través de cielos rasos o bien a través de canaladuras sobre el suelo, donde también alojan los diversos sistemas de instalaciones auxiliares (telefónica, hilo musical, intercomunicadores, etc.) condicionado todo ello a la compartimentación de los espacios. En estos circuitos, se destaca la importancia del alumbrado por su extensión y el de los focos de climatización por su consumo, lo que obliga a veces a una centralización de cargas en determinados puntos que precisan una dimensionado muy riguroso de cada circuito.

Es muy importante independizar los circuitos del alumbrado con niveles diversos de iluminación 25%, 50%, 100%, etc. y los de fuerza de uso normal y diversos (maquinaria) de los de calefacción o climatización, cada uno de ellos con su correspondiente cuadro de distribución equipado con todos los elementos reglamentarios de seguridad y de protección.

Si la potencia supera los 30 kW por planta, interesa una centralización por plantas de los sistemas de distribución.

Con arreglo a las características del edificio, se pueden utilizar con las medidas propias de seguridad en cada caso, la distribución por barras colectoras, raíles electrificados, zócalos toma-corrientes, canaletas eléctricas, etc..

4.- DISEÑO EN INSTALACIONES DE EDIFICIOS INDUSTRIALES.

En el diseño de la instalación e industrias, ocurre como en la de locales comerciales y de oficinas, pero más acentuado, por la diversificación de la industria y la gama de complejidad e importancia que puede tener, lo cual condiciona fundamentalmente la instalación eléctrica.

La previsión de potencia, se estima en un mínimo de 125 W/m^2, pero, sin embargo, este valor puede ser muy superior con arreglo a la importancia de la industria y al grado de electrificación que lleve, pudiendo decir que no hay dos industrias iguales y así, por ejemplo, un taller mecánico puede demandar 250 W/m^2, uno de soldadura 300 W/m^2 y uno siderúrgico hasta 500 W/m^2, por tanto, solamente el estudio concreto de cada caso nos permitirá tomar la solución adecuada.

No obstante, en cuanto a la potencia instalada se establecen tres categorías que son las siguientes:

- Pequeñas industrias < 50 kVA.
- Medianas industrias de 50 a 1.000 kVA.
- Grandes industrias > 1.000 kVA.

Normalmente, la primera suele alimentarse mediante una acometida de baja tensión y las dos últimas en alta tensión debiendo dedicar un local a centro de transformación.

En cuanto a los sistemas de diseño y trazado, aquí no suele tener mucha importancia el que la instalación vaya vista y sí el que sea accesible en cualquier punto, por tanto digamos que el sistema de instalación más utilizado es el de conductores aislados bajo tubo al aire (visto) siendo muy normal la utilización de canaletas o bandejas, portalíneas, aéreas, a las que se graparán los conductores directamente o los tubos protectores; también es de uso frecuente en determinadas industrias las instalaciones principales a base de líneas repartidoras con barras colectoras o pletinas de cobre donde discurren completamente al aire entre soportes aislantes que permitan tomar las derivaciones en los puntos que se necesiten; este sistema, es muy adecuado para industrias en que el emplazamiento de la maquinaria es volante y por ello cambia de lugar con bastante frecuencia haciendo la toma en cualquier punto.

Respecto al alumbrado, se debe independizar de las líneas de fuerza y es deseable dos sistemas que hay que tener en cuenta: el alumbrado general y el localizado del puesto de trabajo.

Cuando se utilicen alumbrados con lámparas de descarga, se cuidará mucho la corrección de los efectos estroboscópicos, zonificando con alumbrados mixtos o empleando fases alternativas.

5.- PREVISIÓN DE CARGA EN LA INSTALACIÓN DE VIVIENDAS.

Consiste en preveer la potencia eléctrica que se va a consumir en total en todo el edificio. Este dato de partida debe ser lo más preciso posible, teniendo en cuenta todos los servicios eléctricos de que va a disponer dicho edificio, sin omitir ninguno de ellos. Así, como fórmula general podemos adoptar:

$$S = \frac{Pviv + Psg + Plc}{\cos\varphi} kc \qquad (1)$$

donde:
S: Potencia aparente total del edificio.
Pviv: Potencia para viviendas.
Psg: Potencia para servicios generales.
Plc: Potencia para locales comerciales.
kc: Factor de crecimiento que puede tomarse de 1.2 a 1.3 a tenor de la previsión que se considere.
Cosφ: Coseno de φ medio de la instalación.

- **Potencia para viviendas:**

Se determinará con arreglo a la siguiente fórmula:

$$Pviv = G^* N^* Ks \qquad (2)$$

donde:
G: Grado de electrificación de las viviendas, teniendo los siguientes valores: Mínimo = 3 kW; Medio = 5 kW; Elevado = 8 kW; Especial = El que se determine.
N: Número total de viviendas.
Ks: Coeficiente de simultaneidad, con arreglo a las siguientes tablas en función del número de abonados y del grado de electrificación.

A continuación se muestran los coeficientes de simultaneidad para dos normativas distintas.

REBT MIE BT 010	Ks	
Número de abonados	Mínima y media	Elevada y especial
2 a 4	1	0.8
5 a 15	0.8	0.7
16 a 25	0.6	0.7
>25	0.5	0.4

Tabla 5. Coeficientes de simultaneidad MIE BT 010.

Norma francesa NF C 14-100			
Número de abonados	Ks	Número de abonados	Ks
2 a 4	1	25 a 29	0.46
5 a 9	0.78	30 a 34	0.44
10 a 14	0.63	35 a 39	0.42
15 a 19	0.53	40 a 49	0.41
20 a 24	0.49	> 250	0.40

Tabla 6. Coeficientes de simultaneidad NF C 14-100.

Si en un edificio se presentas varios grupos de viviendas cada una con un diferente nivel de electrificación, se tratará cada grupo como si fuese único y se sumaran los valores de ellos, para obtener la carga total.

Aplicando dichos coeficientes de simultaneidad, se ha realizado la tabla 7 donde se determina la potencia de viviendas [kW] para un edificio hasta 50 abonados, para los tres niveles de electrificación.

Número de abonados	Mínimo [kW]	Medio [kW]	Máximo [kW]
1	3,0	5	8,0
2	6,0	10	14,4
3	9,0	15	20,8
4	12,0	20	27,2
5	14,4	24	32,8
6	16,8	28	38,4
7	19,2	32	44,0
8	21,6	36	49,6
9	24,0	40	55,2
10	26,4	44	60,8
11	28,8	48	66,4
12	31,2	52	72,0
13	33,6	56	77,6
14	36,0	60	83,2
15	34,8	64	88,8
16	40,2	67	92,8
17	42,0	70	96,8
18	43,8	73	100,8
19	45,6	76	104,8
20	47,4	79	108,8
21	49,2	82	112,8
22	51,0	85	116,8
23	52,8	88	120,8
24	54,6	91	124,8
25	56,4	94	128,8
26	57,9	96,5	132,0
27	59,4	99	135,2
28	60,9	101,5	138,4
29	62,4	104	141,6
30	63,9	106,5	144,8
31	65,4	109	148,0
32	66,9	111,5	151,2
33	68,4	114	154,4
34	69,9	116,5	157,6
35	71,4	119	160,8
36	72,9	121,5	164,0
37	74,4	124	167
38	75,9	126,5	170,4
39	77,4	129	173,6
40	78,9	131,5	176,8
41	80,4	134	180,0
42	81,9	136,5	183,0
43	83,4	139	186,7
44	84,9	141,5	189,6
45	86,4	144	192,8
46	87,9	146,5	196,0
47	89,4	149	199,2
48	90,9	151,5	202.4
49	92,4	154	205,6
50	93,9	156,5	208,8

Tabla 7. Previsión de potencia en un edificio de hasta 50 abonados.

- **Potencia para servicios generales:**

Son todos los servicios generales que para la comunidad de vecinos pueden demandar corriente eléctrica. Los más usuales se determinará con arreglo a la siguiente fórmula:

$$P_{sg} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + \ldots\ldots + P_N \qquad (3)$$

donde:

P_1: Alumbrado y fuerza de todas las zonas comunes de viviendas, como pueden ser: portales, escaleras, pasillos, vestíbulos, cuartos de basura, trasteros, jardines, fachadas, etc.. Como orientación, los valores de alumbrado de las zonas comunes (portales, vestíbulos y escaleras) suelen ser:

- 40 W/m² para lámparas incandescentes;
- 10 W/m² para lámparas fluorescentes.

P_2: Potencia de aparatos elevadores: En general los ascensores y montacargas del edificio.

La determinación de estas potencias está íntimamente ligada con las características técnicas de los equipos a instalar, como orientación la fórmula aproximada para determinar la potencia es:

$$P = \frac{Q v C}{\eta} \qquad (4)$$

donde:

P: Potencia del grupo elevador (kW).
Q: Carga útil (kg).
v: Velocidad (m/s).
η: Rendimiento.
C: Coeficiente del equipo.

En la tabla 8 se dan los valores de las potencias de los aparatos elevadores, correspondientes a los NTE-ITA.

SERVICIO	EQUIPO	CARGA [kg]	PERSONAS	VELOCIDAD [m/s]	POTENCIA ELÉCTRICA [kW]
ASCENSOR	ITA-1	400	5	0,63	4,5
ASCENSOR	ITA-2	400	5	1,00	7,5
ASCENSOR	ITA-3	630	8	1,00	11,5
ASCENSOR	ITA-4	630	8	1,60	18,5
ASCENSOR	ITA-5	1.000	13	1,60	29,5
ASCENSOR	ITA-6	1.000	13	2,50	46,0
ASCENSOR	ITA-7	1.600	21	2,50	73,5
ASCENSOR	ITA-8	1.600	21	3,50	103,0
MONTACAMILLAS	ITA-9	1.800	24	1,00	33,0
MONTACAMILLAS	ITA-10	1.800	24	1,60	53,0
MONTACAMILLAS	ITA-11	1.800	24	2,50	83,0

Tabla 8. Potencia de equipos elevadores.

P_3: Potencia prevista para garajes-aparcamiento, de uso privado de los inquilinos del edificio. A este respecto se suelen tomar los valores:

- Alumbrado: 5 W/m²
- Alumbrado y ventilación: 25 W/m²

P_4: Potencia de los grupos de presión para agua. Esta potencia es para aquellos edificios que por no tener presión suficiente en la acometida de agua fría, no llega el agua hasta las cotas más altas de la red interior.

La fórmula para determinar esta potencia es:

$$P = \frac{qp\eta}{75\rho} \qquad (5)$$

donde:

P: Potencia del motor (CV).
q: Caudal máximo de la bomba (l/s).
p: Presión máxima (m.c.a.).
η: Rendimiento.
ρ: Densidad del agua (kg/cm³).

P_5: Potencias para todos los demás equipos eléctricos específicos que puedan dar algún servicio en el edificio, como ejemplo: (piscinas comunitarias, calefacción, ventilación, megafonía, telefonía, portero eléctrico, etc.). Estos valores se reflejan con su potencial real, o bien estimando un porcentaje.

A partir de los valores de Ks de la tabla 6 podemos determinar la sección de las diferentes partes de la canalización eléctrica colectiva en la figura 1.

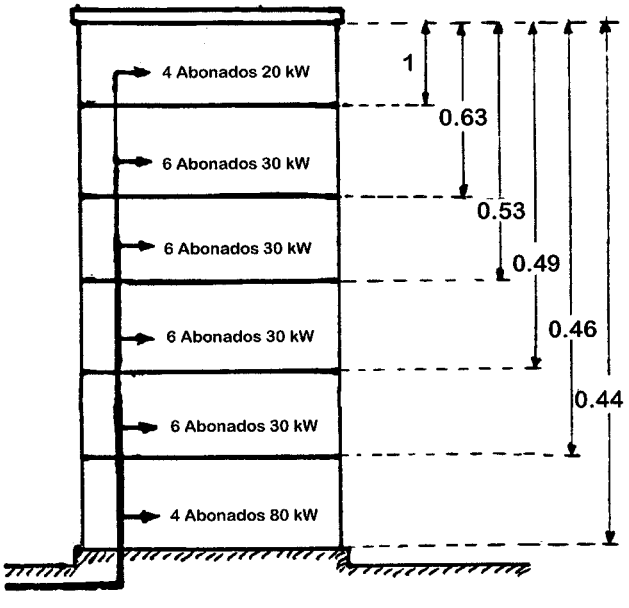


Figura 1. Edificio de 5 plantas de viviendas y 4 locales comerciales de 20 kW/c.u.

UTILIZACIÓN	Ks
Alumbrado escalera	1
Calefacción eléctrica	1
Tomas de corriente	0.1+ 0.9 / N
Ascensores y montacargas	
Para el motor más potente	1
Para el siguiente motor	0.75
Para los restantes	0.6

Tabla 9. Coeficiente de simultaneidad en circuitos interiores.

- **Potencia para locales comerciales:**

La reserva de potencia para los locales comerciales que pueda tener el edificio, está condicionada a tres casos:

a) Cuando están sin compartimentar en el proyecto, ni por superficie ni por uso. En este caso se prevé 5 kW por cada 50 m².
b) Cuando los locales están compartimentados por superficie. En este caso se preveen 100 W por m² con un mínimo de 3 kW.
c) Cuando los locales están compartimentados por superficie y por uso se reserva la potencia que se requiera según su uso, como mínimo de 3 kW.

6.- PREVISIÓN DE CARGA PARA EDIFICIOS DESTINADOS A OFICINAS.

Para la determinación de las potencias previstas, a instalar en edificios dedicados a oficinas aplicaremos la fórmula general:

$$S = \frac{Psg + Plc}{\cos\varphi}\ kc \qquad (6)$$

donde:

S: Potencia aparente total del edificio.
Psg: Potencia para servicios generales.
Plc: Potencia para locales comerciales.
kc: Factor de crecimiento que puede tomarse de 1,2 a 1,3 a tenor de la previsión que se considere.
Cosφ: Coseno de φ medio de la instalación.

El valor de esta potencia se estima en 0,1 kW/m², teniendo en cuenta que independientemente de la superficie de cada oficina, la potencia mínima por local o abonado se estima en 5 kW.

- **Potencias para servicios generales:**

Esta se determina con arreglo a la fórmula siguiente:

$$Psg = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + ... + P_N \qquad (7)$$

donde:

P_1,P_2: Potencia para ascensores y montacargas, los cuales se evalúan exactamente igual que en los edificios destinados a viviendas.

P_3: Potencia de alumbrado, este valor toma una importancia grande, en los edificios de oficinas, que exigen niveles altos de iluminación, como cifras orientativas se pueden estimar:

- Salas de recibir: 20 W/m²
- Oficinas generales trabajos corrientes: 25 W/m²
- Archivo y almacenes: 25 W/m²
- Oficinas privadas trabajos corrientes: 30 W/m²
- Oficinas generales trabajos finos: 45 W/m²
- Oficinas privadas trabajos finos: 50 W/m²
- Oficinas y salas de dibujo: 70 W/m²

El coeficiente de simultaneidad a emplear es de 0,6. Lógicamente, estas potencias específicas sólo se utilizarán a falta de otros datos más reales. La potencia de alumbrado real es la deducida del cálculo de iluminación correcto con arreglo a los sistemas que se vayan a emplear y a los niveles de iluminación adecuados a cada local.

P_4: Potencias de garajes. Lo valores estimativos para los garajes de tipo privado pueden ser:

- Sólo alumbrado: 5 W/m²
- Alumbrado más ventilación: 25 W/m²

P_5: Potencias de otros servicios. En este sumando se pueden agrupar los servicios eléctricos específicos de cada edificio, con arreglo al nivel de electrificación o de mecanización existente, entre los que podemos citar como ejemplo:

- Climatización (aire acondicionado).
- Maquinaria eléctrica de oficinas.
- Ordenadores.
- Servicios de cafetería, bar, etc..
- Transporte de documentos.

Conviene hacer hincapié en la poca conveniencia de la utilización de las potencias específicas y la buena norma de ajustarse a los valores de las potencias a instalar, ya que las estimaciones se pueden quedar muy bajas o muy altas y a veces estos cálculos tienen que volverse a realizar a la hora de hacer las instalaciones.

También conviene destacar el incremento que supone el que el edificio esté dotado o no de aire acondicionado y que la climatización sea individual o centralizada, valores que hay que tener perfectamente definidos antes de estimar la potencia a instalar.

7.- PREVISIÓN DE CARGA PARA EDIFICIOS DESTINADOS A INDUSTRIAS.

La previsión de potencias en los edificios destinados a industrias, es muy difícil de estimar, si no se tiene ya determinado el tipo de industria que se va a implantar, ya que los errores de estimación, pueden ser tan altos de unas industrias a otras que podrían dejar totalmente insuficientes todas las previsiones hechas a priori.

Por ello, en la implantación de industrias hay que tener definidas en primer lugar la industria determinada y en segundo lugar la maquinaria prevista, con una estimación muy aproximada a la realidad de la potencia eléctrica que se va a demandar.

No obstante, a título informativo, el proceso de previsión de cargas es similar al explicado anteriormente para viviendas y edificios de oficinas:

$$S = \frac{Psg + Plo}{\cos\varphi}\ kc \qquad (8)$$

donde:

S: Potencia aparente total de la industria.
Psg: Potencia para servicios generales.
Plo: Potencia para locales.
kc: Factor de crecimiento que puede tomarse de 1,2 a 1,3 a tenor de la previsión que se considere.
Cosφ: coseno de φ medio de la instalación.

- **Potencia de locales:**

Se estima en 0,125 kW/m² (potencia bastante insuficiente para pequeñas superficies y sólo realmente aceptable para industrias de una gran superficie). También aquí, se estima una potencia mínima por local o abonado de 5 kW.

- **Potencias para servicios generales:**

Esta potencia se determina con arreglo a la fórmula siguiente:

$$Psg = P_1Ku_1Ks_1 + P_2Ku_2Ks_2 + P_3Ku_3Ks_3 + P_4Ku_4Ks_4 + P_5Ku_5Ks_5 + ...+P_iKu_iKs_i \qquad (9)$$

donde:
Ku_i: Coeficiente de utilización iésimo.
Ks_i: Coeficiente de simultaneidad iésimo.

P_1,P_2: Potencia para ascensores y montacargas, los cuales se evalúan exactamente igual que en los edificios destinados a viviendas.

P_3: Potencia de alumbrado. Este valor es muy indeterminado, ya que difiere mucho de ser alumbrado general o alumbrado localizado en el puesto de trabajo y si esa base de puntos de luz incandescentes o fluorescentes. A título meramente informativo, se dan algunos valores específicos:

- Zona de paso, pasillos y escaleras: 30 W/m²
- Talleres mecánicos: 45 W/m²
- Empaquetado y embalaje: 20 W/m²
- Talleres de pintura: 30 W/m²
- Artes gráficas: 50 W/m²
- Almacenes: 20 W/m²
- Fábricas de tejidos: 45 W/m²
- Carpinterías: 60 W/m²
- Fundiciones: 40 W/m²

Para alumbrado fluorescente compensado (cos φ ≥,86) y para la fuerza motriz, la tabla 10 nos da los valores más normalizados en distintos recintos.

TIPO DE EXPLOTACIÓN	POTENCIA ESTIMADA [VA/m2]	ALUMBRADO MEDIO [lux=Lm/m2]
Vías de circulación, aéreas de almacenamiento sin trabajo continuo.	7	150
Trabajos vastos, fabricación y montaje de piezas grandes.	14	150
Trabajos ordinarios, trabajo de despacho.	24	500
Trabajos finos, delineación, montajes de precisión.	41	800
FUERZA MOTRIZ	**POTENCIA ESTIMADA (VA/m2)**	
Compensadores, bombas.	de 3 a 6	
Ventilación locales.	23	
Despachos.	25	
Talleres de expedición.	50	
Talleres de montaje.	70	
Talleres de mecanizado.	300	
Talleres de pintura.	350	
Talleres de tratamiento térmico.	700	

Tabla 10. Valores orientativos en la previsión de potencia de una industria.

P_4: Potencias de garajes. Los valores estimativos son los dados anteriormente:

- Sólo alumbrado: 5 W/m²
- Alumbrado más ventilación: 25 W/m²

P_5: Potencias de otros servicios. En este apartado se recogen los servicios especificados de cada industria que pueden ser muy diversos y a veces muy importantes en orden de magnitud, incluyendo también la carga importante que representa el que la industria en cuestión lleve o no climatización.

Ante la problemática previsión de potencias de los edificios destinados a industrias, cobra una importancia especial el dejar conductos o tubos, canales, etc. con amplitudsuficiente

que permita resolver la falta de previsión inicial, así como la mayor flexibilidad de uso de dichos locales.

En el caso de la previsión de potencia en industrias además debe considerarse el coeficiente de utilización de los motores que equipan la fábrica y los coeficientes de simultaneidad de los cofres de mando y protección de los varios receptores que alimentan, así como los coeficientes de simultaneidad de los armarios de distribución y del armario general de baja tensión.

La Norma francesa UTE 63-140 da para los armarios de distribución industrial los factores de simultaneidad.

Número de circuitos	Coeficiente de simultaneidad Ks
2 a 3	0.9
4 a 5	0.8
5 a 9	0.7
10 ó más	0.6

Tabla 11. Coeficiente de simultaneidad para los armarios de distribución.

A título de ejemplo, la figura 2 plantea los valores recomendados de estos coeficientes en el caso de una fábrica con tres talleres A, B y C y distintas máquinas-herramientas.

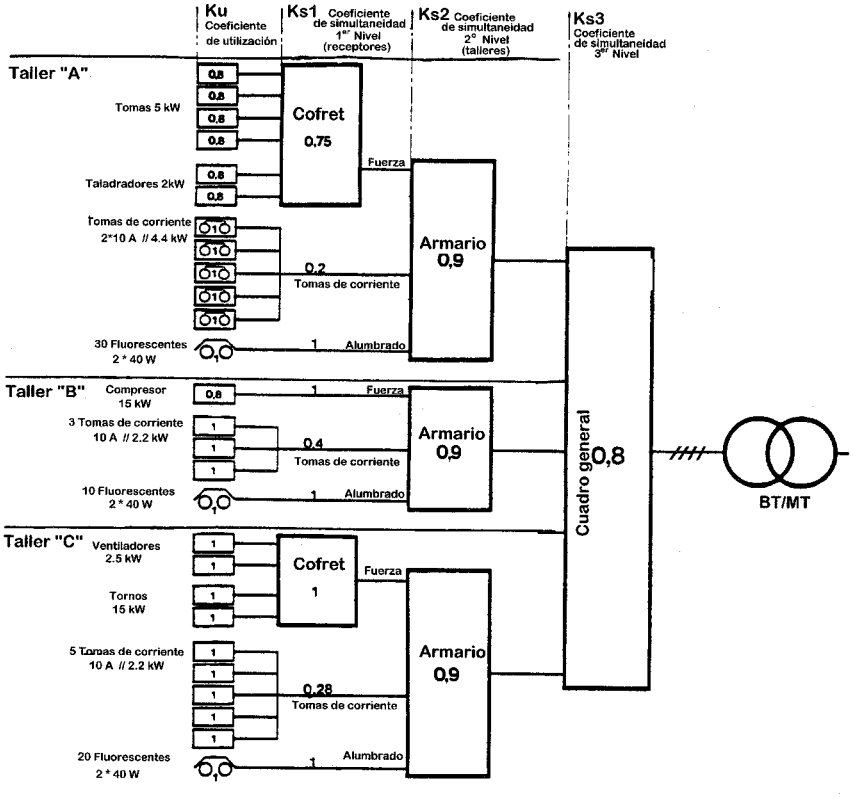


Figura 2. Ejemplo de estimulación de diferentes coeficientes en un centro de transformación para una industria.

8.- PREVISIÓN DE CARGA PARA EDIFICIOS DESTINADOS A USOS DIVERSOS.

Queremos recoger en este apartado la multitud de usos específicos que puede tener un determinado edificio, cuya construcción va encaminada a un fin preciso (hospital, escuela, hotel, etc.) en cuyo caso la previsión de potencia suele estar bastante precisada ya desde el origen del proyecto al estar definidos los niveles de electrificación, los sistemas de alumbrado, la maquinaria especificada, etc..

A pesar de todo y solamente como una idea aproximada se puede considerar los siguientes valores específicos:

- Hoteles:

Hotel de 3 estrellas:	0,1 kW/plaza	
Hotel de 4 estrellas:	0,8 kW/plaza	
Hotel de 5 estrellas:	1,0 kW/plaza	

- Centros docentes:

E.G.B. (8 unidades):	320 alumnos	80 W/alum.
E.G.B. (16 unidades):	640 alumnos	70 W/alum.
E.G.B. (22 unidades):	880 alumnos	60 W/alum.
E.G.B. (32 unidades):	1.280 alumnos	60 W/alum.
B.U.P. (25 unidades):	1.000 alumnos	60 W/alum.
Facultad:	(3.000 alumnos)	150 W/alum.
Formación profesional:	(420 alumnos)	200 W/alum.

- Hospitales:

de 50 a 100 camas:	de 2 a 4 kW/cama
de 100 a 250 camas:	de 3 a 5 kW/cama
de 350 a 700 camas:	de 3 a 6 kW/cama

- Centro sociales:

Iglesias:	40 W/m^2
Guarderías:	30 W/m^2
Hogares sociales:	50 W/m^2

- **Factores de simultaneidad:**

Para determinar los consumos punta, que son precisos para el dimensionado de las líneas eléctricas, salvo raras excepciones, nunca se debe partir de la potencia total instalada, si no que esta potencia se halla afectada por un factor de demanda, o factor de simultaneidad de usos, cuyos valores son difíciles de estimar de una forma precisa, y que a título orientativo daremos los siguientes valores:

Escuelas:	0,50 a 0,75
Hospitales:	0,60 a 0,80
Comercios (pequeños):	0,50 a 0,70
Grandes almacenes:	0,70 a 0,90
Oficinas:	0,50 a 0,80
Hoteles:	0,60 a 0,80
Deportivos:	0,60 a 0,80
Industrias:	0,25 a 0,90

Estos valores se entienden que son factores de simultaneidad de la demanda total de potencia del edificio y no puede aplicarse a circuitos parciales.

TEMA 4. CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN REDES TRIFÁSICAS

1.- INTRODUCCIÓN.

Cualquier instalación eléctrica debe estar protegida contra los cortocircuitos y ello, salvo excepción, repetirse cada vez que se presenta una discontinuidad eléctrica que corresponde casi siempre a un cambio en la sección de los conductores. La corriente de cortocircuito trifásica debe calcularse en los diferentes niveles de la instalación para poder determinara las características del material que deberá soportar o cortar dicha corriente de defecto.

El organigrama de la figura 1 muestra el camino que conduce a las diferentes corrientes de cortocircuito y los parámetros que intervienen para la utilización de los diferentes dispositivos de protección.

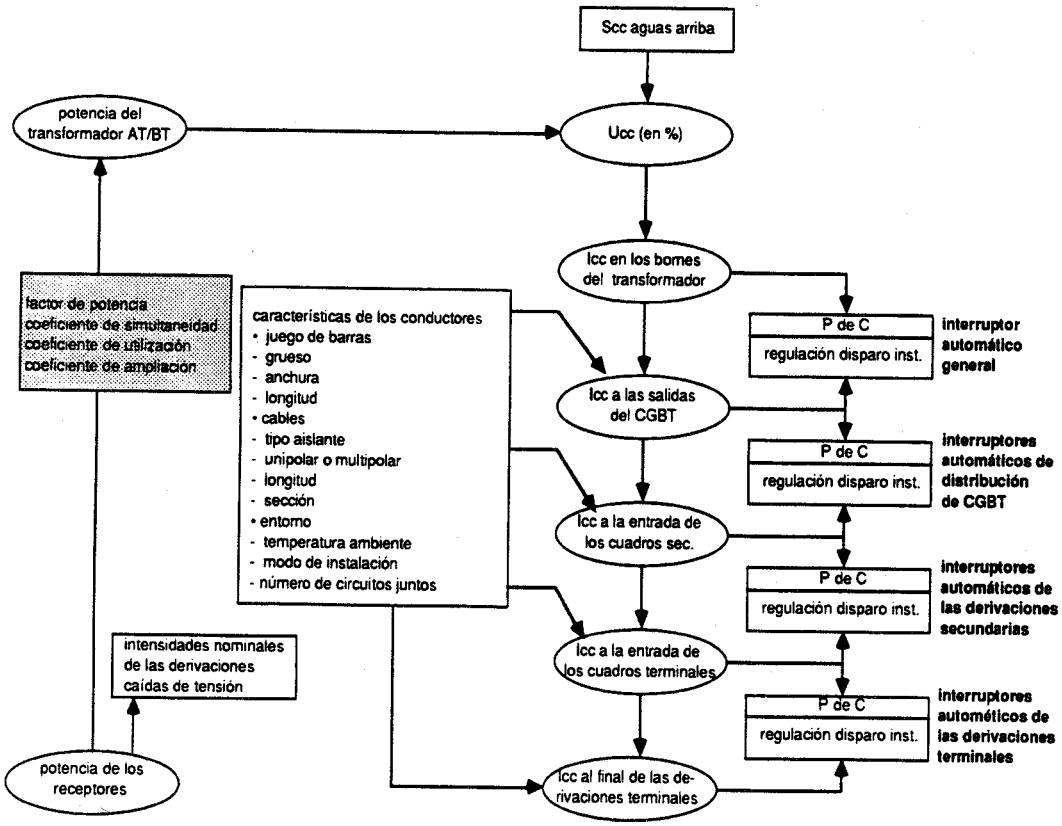


Figura 1. Procedimiento de cálculo de la intensidad de cortocircuito para la concepción de una instalación

El cálculo de las corrientes de cortocircuito y la protección de la instalación para dichas sobreintensidades, siempre debe realizase al final, una vez calculada la instalación según los criterios tradicionales (calentamiento, caída de tensión, protección térmica y diferencial).

El cortocircuito es un defecto franco (impedancia de defecto nula) entre dos partes de la instalación a distinto potencia, y con una duración inferior a 5 s. Estos defectos pueden ser motivados por contacto accidental o por fallo de aislamiento, y pueden darse entre fases, fase-neutro, fase-masa o fase-tierra.

Un cortocircuito es, por tanto, una sobreintensidad con valores muy por encima de la intensidad nominal que se establece en un circuito o línea, y puesto que la impedancia de defecto es nula o despreciable, estos valores de la sobreintensidad sólo quedan limitados por la impedancia de las líneas aguas arriba del defecto. Esto produce elevaciones de la temperatura en los aislamientos, reduciendo su vida útil y dando lugar a arcos eléctricos que son causa de muchos incendios. En estas condiciones es necesario desconectar el circuito lo más rápidamente posible (el tiempo dependerá del valor de la sobreintensidad).

La MIE BT 020 nos dice que en el origen de todo circuito se establecerá un dispositivo de protección contra cortocircuitos, cuya capacidad de corte (poder de corte) estará de acuerdo con la máxima intensidad de cortocircuito que pueda presentarse en el punto de su instalación. Se admiten, como dispositivos de protección contra cortocircuitos, fusibles adecuados y los interruptores automáticos con sistema de corte electromagnético.

Para elegir y regular convenientemente las protecciones de cortocircuito es necesario conocer dos valores de corriente de cortocircuito:

a) La corriente máxima de cortocircuito que determina:

- El poder de corte de los interruptores automáticos.
- El poder de cierre de los aparatos.
- La solicitación electrodinámica de conductores y aparamenta.

  El valor corresponde a un cortocircuito trifásico equilibrado inmediato a los bornes aguas abajo del elemento de protección.

b) La corriente mínima de cortocircuito indispensable para elegir la curva de disparo de los interruptores automáticos o fusibles, particularmente cuando:

- La longitud de los cables es importante y la fuente o generador es relativamente impedante (generadores-onduladores).
- La protección de las personas se basa en el funcionamiento de los interruptores automáticos o de los fusibles, esencialmente en el caso de los sistemas de distribución TN o IT.

La corriente mínima de cortocircuito corresponde a un defecto producido en el extremo de la derivación protegida consistente en un cortocircuito fase-neutro en las condiciones de explotación menos severas (defecto en el extremo de línea).

En todos los casos, cualquiera que sea la corriente de cortocircuito (del valor máximo al mínimo) la protección debe eliminar el defecto en un tiempo compatible con el choque térmico que puede soportar el cable a proteger.

2.- CLASIFICACIÓN DE CORTOCIRCUITOS.

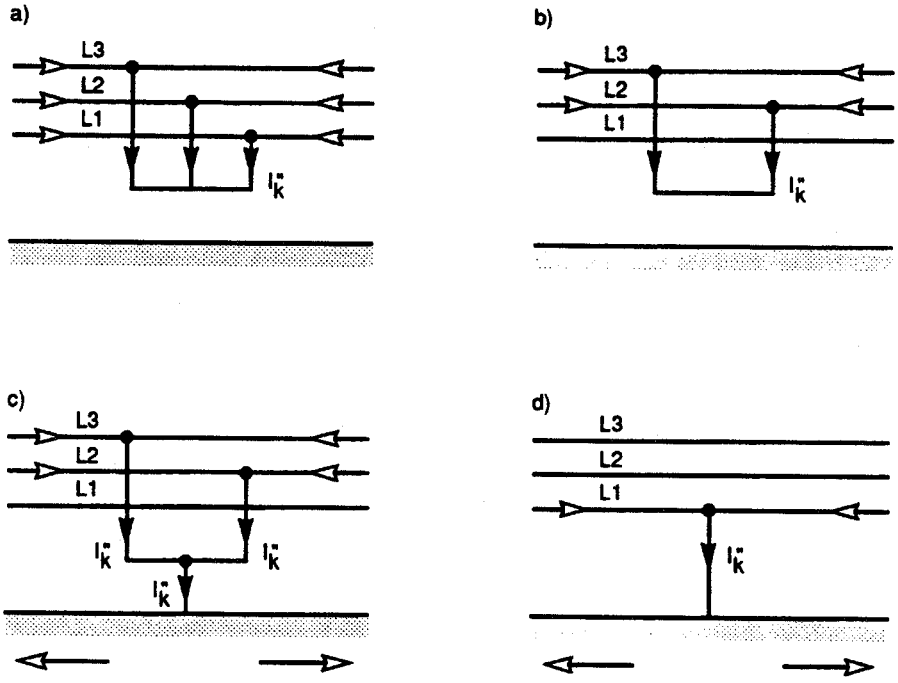
En las instalaciones eléctricas se pueden producir diferentes cortocircuitos. Se caracterizan principalmente por:

- su duración: autoextinguible, fugaz ó permanente.
- sus orígenes:
  - mecánicos (rotura de conductores, conexión eléctrica accidental entre dos conductores por un objeto extraño a la instalación como animales o herramientas);
  - sobretensiones eléctricas de origen interno o atmosférico;
  - por una degradación del aislamiento provocada por el calor, la humedad o un ambiente corrosivo.
- su localización: interno o externo a una máquina o a un cuadro eléctrico.

Desde otro punto de vista, los cortocircuitos se clasifican en:

- monofásicos: 80% de los casos;
- bifásicos: 15% de los casos. Estos defectos degeneran, a menudo, en trifásicos;
- trifásico: 5% sólo originariamente.

En la figura 2 se presentan en esquema estos casos.



corriente de cortocircuito

corrientes de cortocircuito parciales por los conductores de tierra. Para cálculos, estas diferentes corrientes (Ik") se distinguen por sus índices

a) cortocircuito trifásico simétrico.
b) cortocircuito entre dos fases, aislado.
c) cortocircuito entre dos fases y tierra.
d) cortocircuito entre fase y tierra

Figura 2. Diferentes cortocircuitos y sus corrientes. Sentido de flechas arbitrario (CEI 909)

3.- CONSECUENCIAS DEL CORTOCIRCUITO.

Las consecuencias son variables según la naturaleza y duración del defecto, el punto de la instalación afectada y la magnitud de la corriente:

a) En el punto de defecto, la presencia de arcos origina:

- deterioro de los aislantes;
- fusión de los conductores;
- incendio y peligro para las personas.

b) Para el circuito defectuoso:

- los esfuerzos electrodinámicos originan:
  * deformación de los juegos de barras;
  * desalambramiento de los cables;
- sobrecalentamiento, por incremento de las pérdidas por efecto Joule, con riesgo de deterioro de los aislantes.

c) Para los otros circuitos eléctricos de la red afectada o de redes próximas:

- bajadas de tensión en el tiempo de la eliminación del defecto de algunos milisegundos a varias centenas de milisegundos;
- la puesta fuera de servicio de una más o menos gran parte de la red siguiendo su esquema y la selectividad de sus protecciones;
- la inestabilidad dinámica y la pérdida de sincronismo de las máquinas;
- las perturbaciones en los circuitos de mando y control.

TEMA 5. CORTOCIRCUITOS SIMÉTRICOS

1.- INTRODUCCIÓN.

Una red trifásica equilibrada simple (figura 1) puede analizarse mediante un circuito equivalente monofásico constituido por una fuente de tensión alterna constante, un interruptor automático, una impedancia de carga Zs y una impedancia Zcc que representa todas las impedancias situadas aguas arriba del interruptor (figura 2).

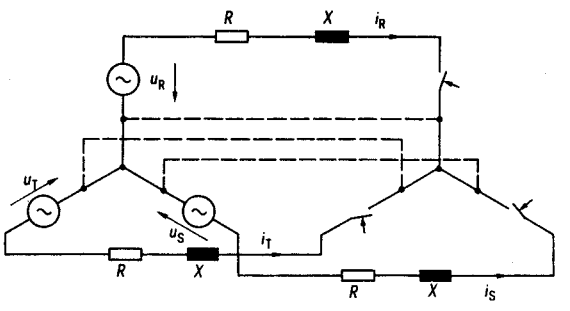


Figura 1. Red trifásica equilibrada

Realmente en la impedancia de este circuito está incluido todo lo que hay aguas arriba del cortocircuito con las redes de tensiones diferentes (A.T., B.T.).

En el esquema de la figura 2 con el interruptor cerrado, la intensidad Is, de servicio, circula por la red. Cuando un defecto de impedancia despreciable aparece entre los puntos A y B provoca la aparición de una intensidad de cortocircuito muy elevada Icc, limitada tan sólo por la impedancia Zcc.

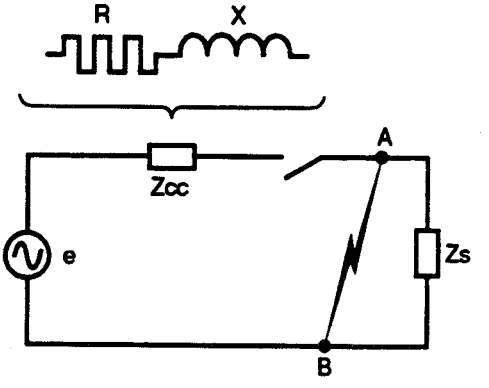


Figura 2. Esquema monofásico equivalente de la red trifásica

La intensidad Icc se establece siguiendo un régimen transitorio en función de las reactancias X y de las resistencias R, componiendo la impedancia Zcc:

$$Zcc = \sqrt{R^2 + X^2} \qquad (1)$$

En una distribución de potencia de baja tensión, la reactancia X = Lw es generalmente mucho más elevada que la resistencia R y la relación R/X se sitúan entre 0,1 y 0,3. Prácticamente, para estos valores, es igual la relación R/X que el cosφcc:

$$\cos \varphi cc = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \qquad (2)$$

El régimen transitorio de establecimiento de una corriente de cortocircuito trifásico, a menudo, difiere según sea el alejamiento eléctrico del punto de defecto respecto a los alternadores. Este alejamiento no implica necesariamente una distancia geométrica sino que se sobreentiende que las impedancias de los alternadores son inferiores a las impedancias de unión entre ellos y el punto de defecto.

2.- DEFECTO ALEJADO DE LOS GENERADORES.

La ley de Kirchoff, aplicada al circuito de la figura 3, de resistencia R e inductancia L, alimentado por una tensión alterna e y recorrido por una intensidad icc, se puede escribir:

$$e = Ricc + \frac{Ldicc}{dt} = E\sqrt{2}\left[\text{senw}(t + to)\right] \qquad (3)$$

La solución de esta ecuación diferencial de primer orden, con segundo miembro, se expresa por:

$$i_{cc} = i_a + i_c \qquad (4)$$

con:

$$i_a = \frac{E\sqrt{2}}{Z}\left[\text{senw}(t + to) - \varphi\right] \Leftrightarrow Componente \quad Alterna \qquad (5)$$

$$i_c = -\frac{E\sqrt{2}}{Z}\left[\text{sen}(wto - \varphi)\right]e^{\frac{-R*t}{L}} \Leftrightarrow Componente \quad unidireccional \qquad (6)$$

t_o: retardo en la aparición del defecto respecto al instante del cero de la tensión.

$$Z = \sqrt{R^2 + (Lw)^2} \Leftrightarrow \text{Impedancia del circuito} \qquad (7)$$

$$\varphi = \text{arctg}\frac{Lw}{R} \Leftrightarrow \text{Defase tensión corriente} \qquad (8)$$

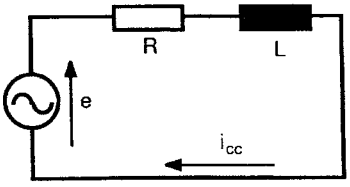


Figura 3. Corriente en caso de cortocircuito

En el instante de producirse un cortocircuito, (t=0), la corriente, despreciando la carga, es nula. La figura 4 nos muestra los valores que toma icc en el circuito descrito:

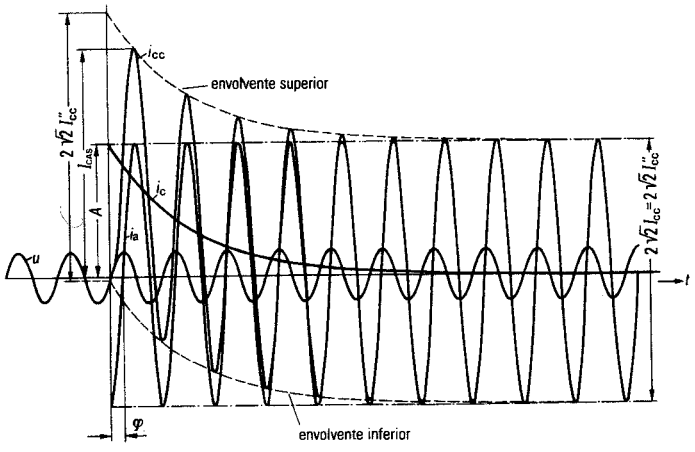


Figura 3. Corriente en caso de cortocircuito

En función del instante de establecimiento del cortocircuito (ángulo de desplazamiento), la corriente toma distintos valores. En la figura 5 el régimen simétrico se obtiene cuando to=φ/

w y el régimen de plena asimetría se produce cuando to=0, es decir, cuando el cortocircuito se produce en el instante de paso de la tensión por el valor cero. En el caso de la figura 5 para un valor de cos φ=0.1, el coeficiente de asimetría I_{CAS}/Icc es de 2,50 (siendo Icc el valor eficaz de la componente alterna de la intensidad de cortocircuito).

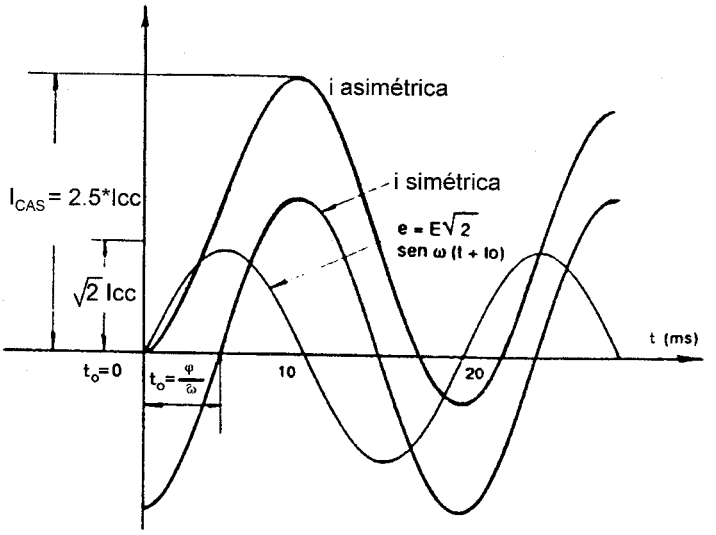


Figura 5. Régimen simétrico y asimétrico

La figura 6 nos presenta los dos casos extremos posibles de establecimiento de una corriente de cortocircuito, simétrico y asimétrico, en función del instante de establecimiento del cortocircuito.

El factor $e^{(-R*t/Lw)}$ es tanto más elevado cuanto más débil es la amortiguación de la componente unidireccional. Es pues necesario calcular I_{CAS} para determinar el poder de cierre de los interruptores automáticos a instalar y también para definir los esfuerzos electrodinámicos, que deberá soportar el conjunto de la instalación.

Su valor se deduce del valor eficaz de la corriente de cortocircuito simétrico por la relación:

$$I_{CAS} = K * \sqrt{2} * Icc \qquad (9)$$

El coeficiente K viene dado por la curva de la figura 7 o la expresión (10) en función de la relación R/X o $\cos\varphi_{cc}$ respectivamente en el punto de la instalación donde se haya producido el cortocircuito.

$$K = \left(1 + e^{\frac{-\pi}{tag\varphi_{cc}}}\right) \qquad (10)$$

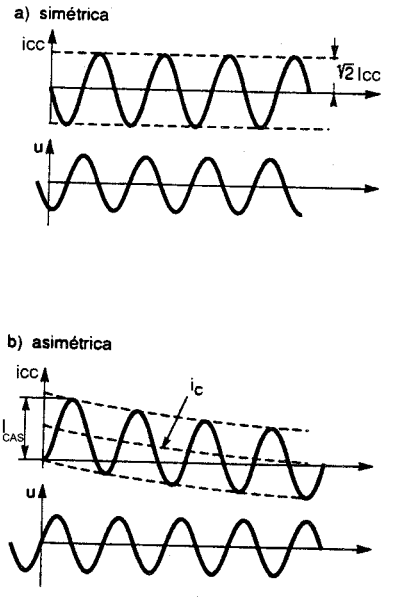


Figura 6. Casos extremos de una corriente de cortocircuito, simétrica y asimétrica

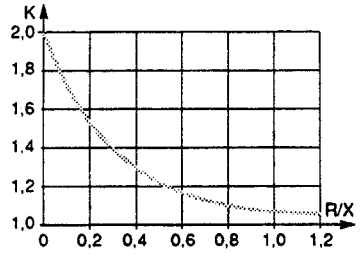


Figura 7. Variación del factor K

3.- DEFECTO EN LA PROXIMIDAD DE LOS GENERADORES.

Cuando el defecto se produce en la proximidad inmediata del generador que alimenta el circuito afectado, la variación de la impedancia, entonces predominante del alterador provoca una amortiguación de la corriente de cortocircuito.

En efecto, en este caso el régimen transitorio de establecimiento de la corriente se complica por la variación de la f.e.m. (fuerza electromotriz) resultante del cortocircuito. Como simplificación, consideramos el valor de f.e.m. constante pero la reactancia interna de la máquina como variable: esta reactancia evoluciona según tres estados o períodos:

- Subtransitorio: presente durante los 10 ó 20 primeros ms del defecto.
- Transitorio: a continuación del anterior y prolongándose hasta 500 ms.
- Permanente o reactancia síncrona.

La reactancia interna de la máquina, según el orden presentado, va tomando en cada período, un valor mayor: la reactancia subtransitoria es inferior a la transitoria y ésta inferior a la permanente.

Esta intervención sucesiva de las tres reactancias provoca una disminución progresiva de la corriente de cortocircuito, intensidad que es la suma de cuatro componentes (figura 8).

- Las tres componentes alternas (subtransitoria, transitoria y permanente);
- La componente unidireccional que resulta del establecimiento de la corriente en el circuito (inductivo).

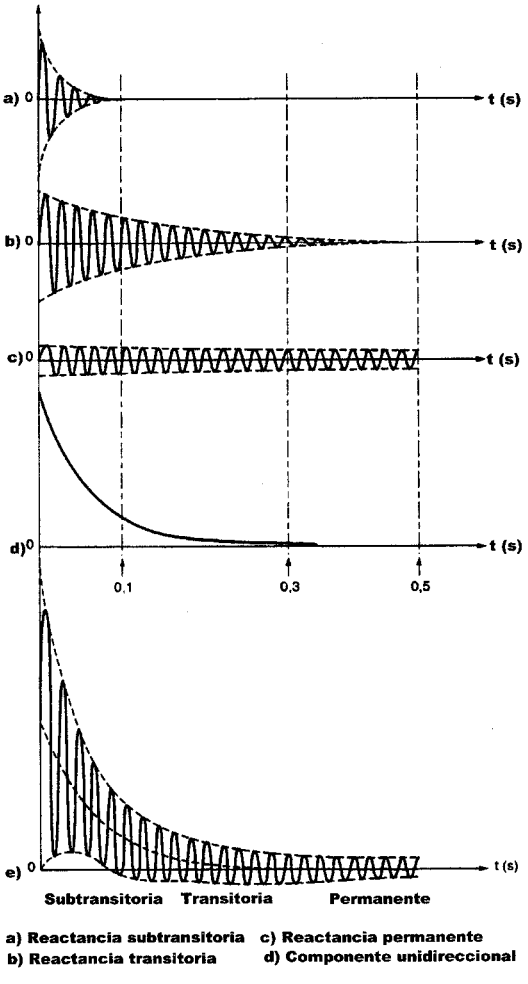


Figura 8. Corrientes de cortocircuito

Por tanto, en este cortocircuito las características específicas de los generadores tienen una gran influencia sobre las variaciones temporales de la corriente de cortocircuito. Esto se observa de forma especialmente clara en el ejemplo de un cortocircuito en bornes de un generador síncrono con devanado amortiguador (turbogenerador trifásico). Se considera que este generador está en servicio en vacío a su velocidad nominal y con una excitación constante, por lo que aparecen las tensiones nominales en los bornes libres del estator. Si se cortocircuitan dichos bornes al pasar por cero la tensión U_R, las corrientes de cortocircuito resultantes i_{Rcc}, i_{Scc} e i_{Tcc} siguen las variaciones temporales representadas en la figura 9. La corriente de cortocircuito i_{Rcc} aumenta primero hasta alcanzar un valor de punta elevado (el valor de cresta asimétrica de cortocircuito) y se amortigua después hasta el valor de la corriente permanente de cortocircuito.

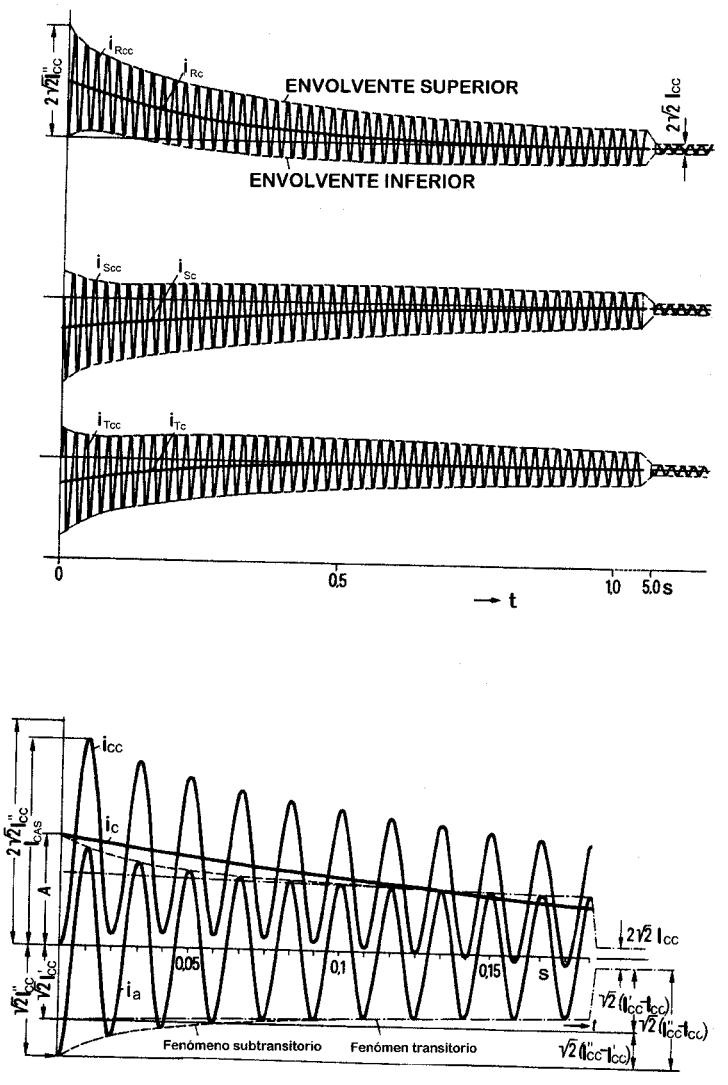


Figura 9. Variaciones temporales de las corrientes de cortocircuito

Las corrientes de cortocircuito presentan así mismo variaciones asimétricas respecto al eje debidas a la aparición de corrientes transitorias. En los generadores síncronos se trata de corrientes simétricas de muy baja frecuencia, pero que pueden tratarse prácticamente como componentes aperiódicas que se amortiguan.

Como la impedancia de cortocircuito del generador síncrono puede considerarse prácticamente como una reactancia inductiva, el valor inicial de la componente aperiódica A es, en las condiciones supuestas de cortocircuito, casi tan grande como el valor de cresta de la corriente inicial simétrica de cortacircuito $\sqrt{2}I''cc$. Sin embargo, la totalidad del fenómeno de amortiguamiento no depende solo de la componente aperiódica, sino también, en alto grado, de la amortiguación de la corriente simétrica de cortocircuito. En la figura 9 se representan las variaciones temporales correspondientes a la fase R de la corriente de cortocircuito icc y de sus componentes ia e ic.

La corriente simétrica de cortocircuito puede dividirse con buena aproximación en:

- Componente permanente;
- Componente transitoria;
- Componente subtransitoria.

Estas variaciones temporales de la corriente de cortocircuito vienen condicionadas por los fenómenos electromagnéticos que se presentan en el generador y por su influencia sobre la fuerza electromotriz. Sin embargo, para representar y calcular las relaciones de cortocircuito se considera en la práctica una tensión constante y se supone que el fenómeno de amortiguamiento de la corriente simétrica de cortocircuito viene provocado por un crecimiento de las reactancias del generador de acuerdo con las componentes citadas.

La componente permanente (corriente permanente de cortocircuito simétrica) tiene un valor de cresta 2Icc constante. Su valor eficaz es el cociente de la fuerza electromotriz (nominal) entre fase y neutro U_N y de la reactancia síncrona Xd (debida sobre todo a la reacción del inducido) que corresponde al régimen permanente de cortocircuito.

$$I_{cc} = \frac{U_N}{X_d} \qquad (11)$$

A la corriente estacionaria simétrica de cortocircuito se le superpone una componente transitoria que se amortigua de forma relativamente lenta. Esta componente es debida principalmente a las reactancias de dispersión de los devanados estatóricos y de excitación, pues el generador en cortocircuito se comporta como un transformador cortocircuitado. La reactancia para la componente transitoria es considerablemente menor que la correspondiente a la corriente permanente de cortocircuito.

El valor eficaz de la corriente transitoria simétrica de cortocircuito es el cociente de la fuerza electromotriz (nominal) entre fase y neutro U_N y de la reactancia transitoria X´d.

$$I'_{cc} = \frac{U_N}{X'_d} \qquad (12)$$

Al fenómeno transitorio se le superpone durante algunos períodos un subtransitorio. En los generadores síncronos con devanado amortiguador aparece en los circuitos rotóricos unos fenómenos de compensación entre los circuitos de amortiguación y los de excitación. Estos fenómenos provocan en los circuitos estatóricos la componente subtransitoria de la corriente simétrica de cortocircuito, cuyo valor inicial es igual a la amplitud máxima de la corriente inicial simétrica de cortocircuito $\sqrt{2}$I"cc. Su valor eficaz es el cociente de la fuerza electromotriz (nominal) entre fase y neutro U_N y de la reactancia subtransitoria X"d.

$$I''_{cc} = \frac{U_N}{X''_d} \qquad (13)$$

En las máquinas síncronas con polos laminados y sin devanados amortiguadores no aparece el fenómeno subtransitorio (i´cc =i´´cc).

Las variaciones temporales de la corriente de cortocircuito desde que se produce éste hasta que se alcanza el estado estacionario pueden expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$icc = \sqrt{2}\left[\left(I''_{CC} - I'_{CC}\right)e^{\frac{-t}{T''_d}} + \left(I'_{CC} - I_{CC}\right)e^{\frac{-t}{T'_d}} + I_{CC}\right]\text{sen}\left[w\left(t + t_o\right) - \varphi\right] - \sqrt{2}I''_{CC}e^{\frac{-t}{T_g}}\text{sen}\left[wt_o - \varphi\right] \qquad (14)$$

El primer miembro de la ecuación corresponde a la componente subtransitoria de la corriente simétrica de cortocircuito, el segundo a la componente transitoria, el tercero a la componente permanente y el último a la componente aperiódica. La pulsación w se mantiene aproximadamente constante en caso de servicio en vacío.

Como la resistencia estatórica es, sobre todo en los generadores síncronos de gran potencia, relativamente pequeña y despreciable frente a las reactancias se toma $\varphi = 90°$. Con ello la ecuación de icc puede escribirse para $t_o = 0$ de la forma siguiente:

$$icc = \sqrt{2}U_N\left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d}\right)e^{\frac{-t}{T''_d}} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d}\right)e^{\frac{-t}{T'_d}} + \frac{1}{X_d}\right]\cos(wt) + \sqrt{2}\left(\frac{U_N}{X''_d}\right)e^{\frac{-t}{T_g}} \qquad (15)$$

La figura 10 nos presenta los dos casos extremos posibles de establecimiento de una corriente de cortocircuito, simétrico y asimétrico, en función del instante de establecimiento del cortocircuito.

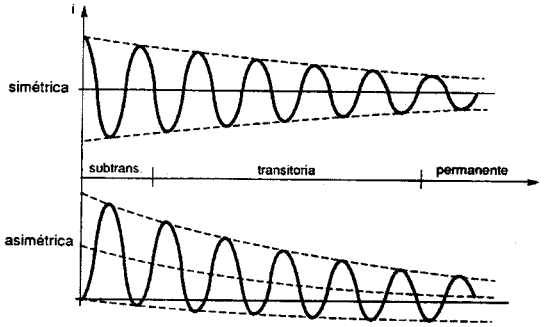


Figura 10. Corrientes de cortocircuito cerca de un alternador.

Las constantes de tiempo T´d T"d y Tg que aparecen en la ecuación 14 pueden calcularse gráficamente con suficiente precisión (figura 11).

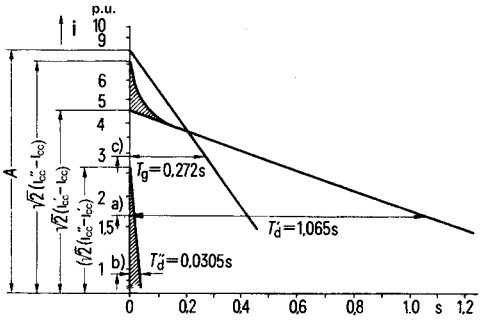


Figura 11. Diagrama para determinar las componentes transitorias y las constantes de tiempo del fenómeno de amortiguamiento de la corriente de cortocircuito.

Primero hay que determinar el valor inicial de la corriente transitoria simétrica de cortocircuito $\sqrt{2}I'cc$. Para ello se llevan a lo largo del tiempo sobre una escala semilogarítmica las diferencias entre la envolvente de la corriente simétrica de cortocircuito ia y el valor de cresta de la corriente permanente de cortocircuito $\sqrt{2}Icc$ según la figura 9; la línea constituida por la sucesión de puntos parte del valor inicial $\sqrt{2}(I''cc - Icc)$ y, después de un tramo curvo, se convierte en una recta descendente, cuya prolongación corta al eje de ordenadas en el valor correspondiente a la diferencia $\sqrt{2}(I'cc - Icc)$ (figura 11).

La constante de tiempo T'd del fenómeno transitorio de amortiguamiento se obtiene a partir de la línea característica con el valor inicial $\sqrt{2}(I'cc - Icc)$. Para ello se multiplica dicho valor por el factor e^{-1} y se lleva el producto sobre el eje de ordenadas (figura 11).

Para determinar la constante de tiempo T''d del fenómeno subtransitorio de amortiguamiento, se han representado en la figura 11 las diferencias entre las envolventes correspondientes a los fenómenos subtransitorio y transitorio a partir del valor inicial $\sqrt{2}(I''cc - I'cc)$; además de las componentes de la corriente simétrica de cortocircuito se ha representado también la componente aperiódica que se amortigua exponencialmente con la constante de tiempo Tg a partir del valor inicial A.

La determinación de las constantes de tiempo T''d y Tg a partir del diagrama se efectúa de forma análoga a la T'd (figura 11).

En la práctica, el conocimiento de la evolución de la corriente de cortocircuito en función del tiempo no es indispensable:

- En baja tensión, como consecuencia de la velocidad de actuación de los aparatos de corte, el conocimiento de la corriente de cortocircuito subtransitoria, I»cc, y de la amplitud máxima de cresta asimétrica I_{CAS}, es suficiente para la determinación del poder de corte de los dispositivos de protección y de los esfuerzos electrodinámicos en el circuito.
- Sin embargo, en distribución en baja tensión y en media y alta tensión la corriente de cortocircuito transitoria está presente a menudo, si la ruptura o interrupción se produce antes de llegar a la corriente de cortocircuito permanente. Es en este caso interesante conocer la corriente de cortocircuito cortada que determina el poder de corte de los interruptores automáticos retardados o con selectividad cronométrica.

El tiempo de apertura de la corriente de cortocircuito en el instante de la ruptura efectiva es la suma del retardo (temporización) mínimo de funcionamiento de un relé de protección y del tiempo de apertura más corto del interruptor automático que le está asociado.

4.- NORMAS DE CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO.

Las normas proponen varios métodos entre los cuales citamos:

1) La guía práctica que completa la norma UNE 20.460 presenta los cuatro métodos siguientes:

- El de las impedancias:

Permite calcular las corrientes de defecto en cualquier punto de una instalación con una precisión aceptable.

Consiste en totalizar, separadamente, las diferentes resistencias y reactancias del bucle o red de defecto comprendiendo los generadores hasta el punto considerado, para calcular la impedancia correspondiente. La Icc se obtiene por aplicación de la ley de Ohm:

$$Icc = \frac{U/\sqrt{3}}{\sum Z_{CC}} \qquad (16)$$

donde:

U: Tensión compuesta.
Zcc: Impedancia aguas arriba hasta el punto del cortocircuito.

Para aplicar este método es imprescindible conocer todas las características de cada uno de los diferentes elementos del circuito considerado.

- **El de composición:**

Utilizable cuando las características de la alimentación no son conocidas. La impedancia del circuito aguas arriba se calcula a partir de una estimación de la corriente de cortocircuito en su origen.

El factor de potencia cos $\varphi \approx R/X$ se considera idéntico en el origen y en el punto del defecto.

Consiste por tanto en considerar que las impedancias elementales de los sectores sucesivos de la instalación son suficientemente semejantes como para justificar la sustitución de sumas vectoriales por sumas algebraicas de los valores de dichas impedancias. Esta aproximación permite obtener el valor del módulo de las corrientes de cortocircuito con suficiente precisión para calcular el circuito. Este método aproximado se aplica para instalaciones de potencias inferiores a 800 kVA.

- **El convencional:**

Permite calcular la corriente de cortocircuito mínima y la corriente de defecto en el extremo de una red, sin conocer las impedancias aguas arriba o la intensidad de cortocircuito en el punto de conexión del circuito considerado.

Se basa en la hipótesis que la tensión en el origen del circuito es igual al 80% de la tensión nominal de la instalación, durante el cortocircuito. Este método no tiene en cuenta la inductancia de los conductores para secciones importantes. Aplica un coeficiente corrector para tener en cuenta la inductancia (1,15 para 150 mm^2 1,20 para 185 mm^2). Este método es utilizado esencialmente para los circuitos terminales alejados del origen.

- **El simplificado:**

Se utilizan unas tablas con una serie de hipótesis de simplificación que facilita directamente para cada sección de conductor:

- La corriente asignada del dispositivo que asegura la protección contra las sobrecargas.
- Las longitudes máximas de conductores protegidos contra contactos indirectos.
- Las longitudes admisibles, teniendo en cuenta las caídas de tensión.

Estas tablas presentan los resultandos de cálculos efectuados esencialmente por dos métodos, composición y convencional.

Permite determinar las características de un circuito que forma parte de una instalación existente cuyas características no son suficientemente conocidas. Se aplica directamente a las instalaciones de baja tensión, con coeficientes correctores si la tensión es diferente de 230/400 V.

2) La norma CEI 909 (VDE 0102) se aplica a todas las redes, radiales o malladas, hasta 230 kV.

Basada en el teorema de Thevenin consiste en calcular una fuente de tensión equivalente en el punto del cortocircuito para seguidamente determinar la corriente en este mismo punto. Todas las alimentaciones de la red y las máquinas síncronas y asíncronas se reemplazan por sus impedancias (directa, inversa y homopolar). Con este método todas las capacidades de línea y las admitancias en paralelo de las cargas no giratorias, salvo las del sistema homopolar se desprecian.

3) Existen otros métodos, que explotan el principio de superposición y necesitan un cálculo previo de la corriente de carga. Merece mención la norma CEI 865 (VDE 0103) que se basa en el cálculo de la corriente de cortocircuito térmicamente equivalente.

5.- CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO POR EL MÉTODO DE LAS IMPEDANCIAS.

En los cálculos de corrientes de cortocircuito son necesarias hipótesis que justifiquen la validez de las expresiones empleadas. Simplificaciones, acompañadas de aproximaciones justificadas, hacen comprensibles los fenómenos físicos de estas hipótesis que permiten calcular las corrientes de cortocircuito manteniendo una precisión aceptable y en exceso.

Las hipótesis empleadas son:

- La red considerada es radial y su tensión nominal comprende la baja y la alta tensión (sin rebasar los 230 kV, límite impuesto por la norma CEI 909).
- La corriente de cortocircuito, al producirse un cortocircuito trifásico, se supone establecida simultáneamente sobre las tres fases.
- Durante el cortocircuito, el número de fases afectadas no se modifica: un defecto trifásico, permanece trifásico al igual que un defecto fase a tierra sigue fase a tierra.
- Durante todo el tiempo del cortocircuito, las tensiones que han provocado la circulación de corriente y la impedancia de cortocircuito no varían en forma significativa.
- Los reguladores o conmutadores de tomas de los transformadores se suponen situados en su posición intermedia (en el caso de un cortocircuito alejado de los alternadores, podemos ignorar las posiciones reales de los conmutadores de tomas de los transformadores).
- Las resistencias de arco no se tienen en cuenta.
- Se desprecian todas las capacidades de las líneas.
- No se tienen en cuenta las corrientes de carga.
- Se tienen en cuenta todas las impedancias homopolares.

- **Cortocircuito trifásico (figura 12):**

Es el defecto que corresponde a la reunión de las tres fases. La intensidad de cortocircuito Icc es:

$$Icc = \frac{U/\sqrt{3}}{Zcc} = \frac{U_F}{Zcc} \qquad (17)$$

siendo:

U: Tensión compuesta o de línea.
U_F: Tensión simple o de fase.
Zcc: Impedancia total de la instalación hasta el punto del cortocircuito.

La tensión compuesta o entre fases es la correspondiente a la tensión de vacío, cuyo valor es superior del 3% al 5% a la tensión en los bornes de la carga. Por ejemplo, en las redes a 390 V, la tensión compuesta que se considera es U = 410 V y como tensión simple U_F = 237 V.

El cálculo de la intensidad de cortocircuito se resume, entonces, al cálculo de la impedancia Zcc equivalente a todas las impedancias recorridas por Icc desde el generador, generadores o fuentes de energía hasta el punto de defecto. Es, de hecho, la impedancia directa por fase:

$$Zcc = \sqrt{\left(\sum_i R_i\right)^2 + \left(\sum_i X_i\right)^2} \qquad (18)$$

siendo:

ΣR_i: suma de todas las resistencias (serie, serie-paralelo, etc.).
ΣX_i: suma de todas las reactancias (serie, serie-paralelo, etc.).

El defecto trifásico se considera generalmente como el que provoca las corrientes más elevadas. En efecto, la corriente de defecto, en el esquema equivalente a un sistema polifásico, sólo es limitada por la impedancia de una fase bajo la tensión simple de la red. El cálculo de Icc es pues indispensable para elegir los materiales (intensidades y esfuerzos electrodinámicos máximos a soportar).

- **Cortocircuito asimétrico entre fase y tierra (figura 12):**

Para analizar este tipo de cortocircuitos de forma coherente, se plantearán las ecuaciones de defecto para los sistemas directo, inverso y homopolar, dando como resultado:

$$Icc = \frac{3U_F}{Zd + Zi + Zh} \qquad (19)$$

siendo:

Zd: Impedancia total sistema directo.
Zi: Impedancia total sistema inverso.
Zh: Impedancia total sistema homopolar.

De esta expresión se extraen las siguientes conclusiones:

a) Si se utilizaran instalaciones eléctricas con el neutro no unido directamente a tierra, la impedancia homopolar Zh= ∞, y, por tanto, según la expresión anterior Icc=0, o sea, no se tendrá ninguna corriente en el circuito. Ahora bien, la tensión simple U_F, en las fases no averiadas (no se ha producido defecto en ellas) pasará a valor $\sqrt{3}\ U_F$, es decir, toman el valor de la tensión compuesta, por lo tanto, habría que prever los aislamientos para esta sobretensión. Asimismo, se produciría una carga brusca en las capacidades parásitas de las líneas, sobre todo en las aéreas, hecho que combinado con las inductancias de las líneas puede provocar sobretensiones capaces de ocasionar deterioros importantes en los aislamientos de la aparamenta eléctrica utilizada. Estos inconvenientes, entre otros, hacen que se utilice el neutro unido directamente a tierra (vease MIE BT 008, sistemas TT y TN).

b) Teniendo en cuenta la conclusión anterior y admitiendo que en los sistemas estáticos (conductores) Zd = Zi = Zh, la intensidad de cortocircuito en la fase con defecto será:

$$Icc = \frac{3U_F}{3Zcc + 3Zh} = \frac{U_F}{Zcc + Zh} \approx \frac{U_F}{Zcc} \qquad (20)$$

Igual a la producida en un cortocircuito tripolar.

- **Cortocircuito asimétrico entre dos fases (sin contacto a tierra) (figura 12):**

Si se procede de forma análoga al caso anterior, se obtiene en las fases defectuosas:

$$Icc = \frac{U}{2Zcc} = \frac{\sqrt{3}U_F}{2Zcc} \qquad (21)$$

Puede observarse como, en este caso, la corriente de cortocircuito será $\sqrt{3}/2 = 0{,}866$ veces la corriente establecida en un cortocircuito tripolar (trifásico simétrico).

- **Cortocircuito asimétrico entre fase-neutro (sin contacto a tierra) (figura 12):**

Si se procede de forma análoga al caso anterior en el caso que el conductor de fase y neutro tengan la misma sección se tendrá:

$$Icc = \frac{U_F}{2Zcc} \qquad (22)$$

En este caso la corriente de cortocircuito será 0,5 veces la establecida en un tripolar. De todo lo anterior se concluye que la máxima intensidad de cortocircuito se establece para un cortocircuito tripolar (trifásico-simétrico), y la menor para un cortocircuito fase-neutro.

También conviene señalar que el cortocircuito tripolar es muy poco frecuente, en cambio, el cortocircuito fase-tierra constituye el 80 % de los cortocircuitos, dando lugar éste, con los sistemas de distribución utilizados y las hipótesis simplificativas asumidas, iguales intensidades de cortocircuito. En la figura 12 quedan resumidas las corrientes de cortocircuito.

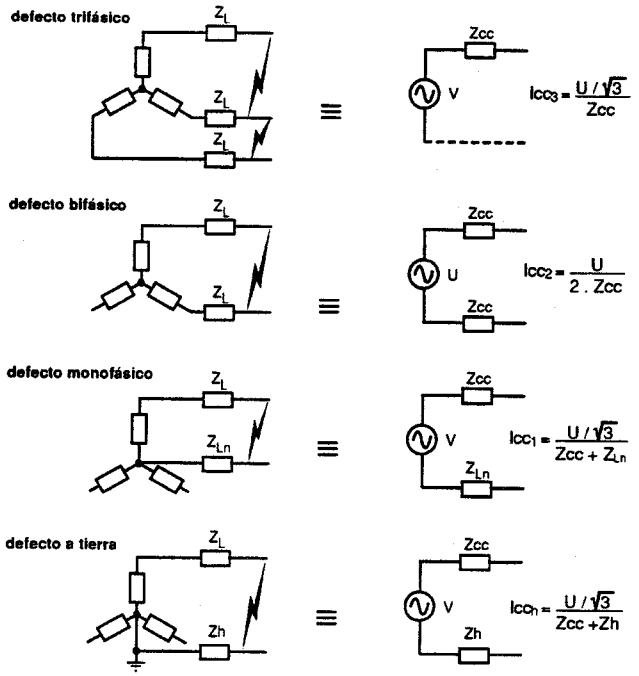


Figura 12. Tipos de cortocircuitos

Según el estudio realizado de las clases de cortocircuitos en baja tensión, asumiendo el cortocircuito como un defecto rígido (impedancia de defecto nula o despreciable), y calculando la instalación en vacío, se tendrá para cualquier línea o circuito de la instalación, una intensidad de cortocircuito permanente:

1º) Origen de circuito o línea:

$$Icc_1 = \frac{U}{\sqrt{3} * Zcc} \qquad (23)$$

siendo:

- Icc_1: Intensidad permanente de cortocircuito en inicio de línea.
- U: Tensión compuesta.
- Zcc: Impedancia total aguas arriba del punto de cortocircuito.

De esta forma se obtendrá la máxima intensidad de cortocircuito que puede presentarse en una línea, determinada por un cortocircuito tripolar, según se ha visto, y en el origen de ésta, sin estar limitada por la propia impedancia del conductor. Se necesita para la determinación del poder de corte del elemento de protección contra sobreintensidades situado en el origen de todo circuito o línea eléctrica.

2°) Final de circuito o línea:

$$Icc_F = \frac{U_F}{2 * Zcc} \qquad (24)$$

siendo:
Icc_F: Intensidad permanente de cortocircuito en fin de línea.
U_F: Tensión de fase o simple.
Zcc: Impedancia total incluyendo la propia de la línea o circuito (por tanto, es igual a la impedancia en origen más la propia del conductor o línea).

De esta forma se obtendrá la mínima intensidad de cortocircuito para una línea, determinada por un cortocircuito fase-neutro y al final de la línea o circuito en estudio. Se necesita para determinar si un conductor queda protegido en toda su longitud a cortocircuito, ya que es condición imprescindible que la Icc_F sea mayor o igual que la intensidad del disparador electromagnético, para una curva determinada en interruptores automáticos con sistema de corte electromagnético, o que sea mayor o igual que la intensidad de fusión de los fusibles en 5 s, cuando se utilizan estos elementos de protección contra cortocircuitos.

Este concepto es sencillo de entender, ya que con intensidades de cortocircuito grandes, actuará el disparador electromagnético o fundirá el fusible de protección; el problema se presenta con intensidades de cortocircuito pequeñas, pues en estos casos pueden caer por detrás del disparador electromagnético, actuando por lo tanto el relé térmico y no pudiendo asegurar el tiempo de desconexión en los límites adecuados (con toda seguridad cuando actúa el disparador electromagnético no retardado del interruptor automático la desconexión se produce en tiempos inferiores a 0,1 s).

5.1.- Determinación de las diversas impedancias de cortocircuito.

El principio de cálculo de la intensidad de cortocircuito por el método de las impedancias está basado en determinar las corrientes de cortocircuito a partir de la impedancia que presenta el circuito recorrido por la corriente del defecto. Esta impedancia se calcula una vez se han totalizado separadamente las diferentes resistencias y reactancias del circuito del defecto, comprendida la fuente o fuentes de alimentación, hasta el punto considerado.

- **Impedancias de la red:**

En la mayor parte de los cálculos no nos remontaremos hasta el punto de suministro de energía. El conocimiento de la red aguas arriba se limita, generalmente en este caso, a las indicaciones facilitadas por el distribuidor, es decir: únicamente la potencia de cortocircuito Scc (en MVA).

La impedancia equivalente a la red aguas arriba es:

$$Za = \frac{U^2}{Scc} \qquad (25)$$

donde:
U: tensión compuesta de la red en vacío.

La resistencia y la reactancia del circuito aguas arriba se deducen a partir de Ra/Za, en alta tensión los valores orientativos son:
- Ra/Za ≈ 0,30 en 6 kV
- Ra/Za ≈ 0,20 en 20 kV
- Ra/Za ≈ 0,10 en 150 kV

Como Xa ≈ 0,980 Za en 20 kV con lo que, aproximadamente Xa ≈ Za.

- **Impedancia interna del transformador:**

La impedancia se calcula a partir de la tensión de cortocircuito ucc expresada en %.

$$Z_T = ucc \frac{U^2}{Sn} \qquad (26)$$

siendo:

U: tensión compuesta, en vacío, del transformador.
Sn: potencia aparente del transformador.
ucc: tensión de cortocircuito (tensión que debemos aplicar al primario del transformador para que el secundario sea recorrido por la intensidad nominal estando los bornes del secundario en cortocircuito.

Transformadores de M.T./B.T. de distribución pública						
Potencia del transformador M.T./B.T. (kVA)	630	800	1000	1250	1600	2000
Tensión de cortocircuito ucc (%)	4	4.5	5	5.5	6	7

Tabla 1. Tesión de cortocircuito normalizada en transformadores M.T./B.T..

Para los transformadores de distribución MT/BT, los valores de ucc vienen definidos por la norma europea (propuesta PR-HD 428.1S1). Es importante considerar que la precisión de estos valores influye inmediatamente sobre el cálculo de la Icc ya que un error de x% sobre ucc induce a un error del mismo orden (x%) sobre Zcc.

En general $R_T << X_T$, del orden de $0,2*X_T$ y la impedancia interna de los transformadores puede asimilarse a la reactancia X_T. Para pequeñas potencias, el cálculo de Z_T es necesario ya que la relación R_T/X_T es mayor. Esta resistencia se calcula en este caso, a partir de las pérdidas por efecto Joule (W) en los arrollamientos:

$$R_T = \frac{W}{3In^2} \qquad (27)$$

Cuando se conectan en paralelo "n" transformadores de potencias iguales, sus valores de impedancia interna y de resistencia o de reactancia deben dividirse por n.

Debe prestarse una atención particular a los transformadores especiales: por ejemplo los transformadores de grupos rectificadores en los que los valores de ucc alcanzan normalmente 10 a 12% con intención de limitar la corriente de cortocircuito.

Teniendo en cuenta la impedancia aguas arriba del transformador y la impedancia interna de éste, la corriente de cortocircuito puede expresarse por:

$$Icc = \frac{U}{\sqrt{3}\left(Za + Z_T\right)} \qquad (28)$$

En primera aproximación, Za y Z_T son asimilables a sus reactancias respectivas. La impedancia de cortocircuito Zcc es, en este caso, igual a su suma algebraica.

- **Impedancia de las conexiones:** La impedancia de las conexiones Z_L depende de sus componentes, resistencia y reactancia unitarias y de la longitud.

La resistencia unitaria R_L de las líneas áreas, de los cables y de los juegos de barras se calcula con la ecuación:

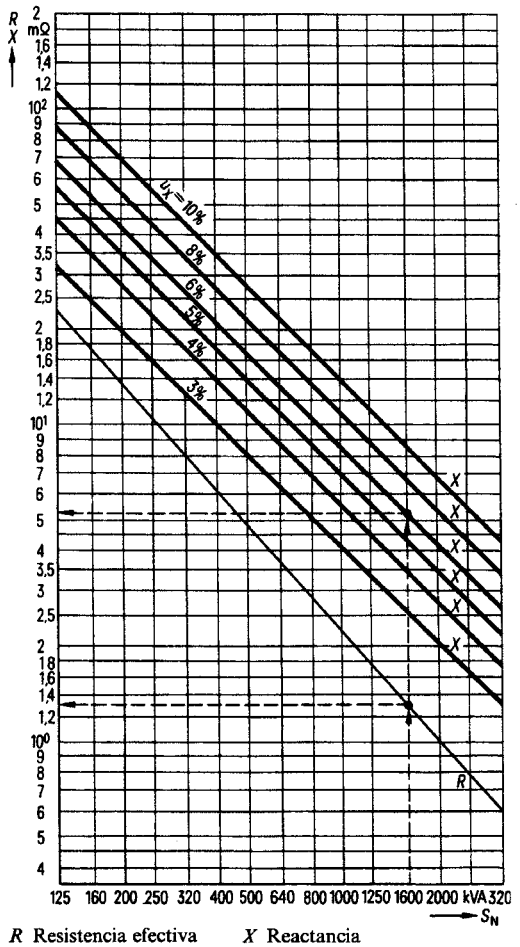
$$R_L = \frac{\rho}{S} \qquad (29)$$

siendo:

S: Sección del conductor.

ρ: Resistividad, teniendo en cuenta que el valor a adoptar depende de la corriente de cortocircuito calculada, máxima o mínima. La tabla 2 da estos valores para cada uno de los casos probables.

En realidad, en baja tensión y para conductores de sección inferior a 150 mm² se tiene en cuenta sólo el valor de la resistencia (R_L < 0,15 mΩ/m para S > 150 mm²) (figura 21).



R Resistencia efectiva *X* Reactancia

Figura 14. Valores de resistencia y reactancia de transformadores.

Regla	Resistividad (*)	Valor de la resistividad (Ω mm²/m)		Conductores afectados
		Cobre	Aluminio	
Corriente máxima de cortocircuito	$\rho_1 = 1{,}25\ \rho_{20}$	0,0225	0,036	PH-N
Corriente (mínima) de cortocircuito	$\rho_1 = 1{,}5\ \rho_{20}$	0,027	0,043	PH-N
Corriente de defecto en los esquemas TN e IT	$\rho_1 = 1{,}25\ \rho_{20}$	0,0225	0,036	PH-N (**) PE-PEN
Caída de tensión Corriente de sobreintensidad para la verificación de las solicitaciones térmicas de los conductores	$\rho_1 = 1{,}25\ \rho_{20}$ $\rho_1 = 1{,}5\ \rho_{20}$	0,0225 0,027	0,036 0,043	PH-N (*) Fase-Neutro PEN-PE si incorporado en un mismo cable multiconductores
	$\rho_1 = 1{,}25\ \rho_{20}$	0,0225	0,036	PE separado

(*)ρ_{20} resistividad de los conductores a 20°C. 0,018 Ωmm²/m para el cobre y 0,029 Ωmm²/m aluminio

(**) N la sección del conductor de neutro es inferior a la de los conductores de fase.

Tabla 2. Resistividad de los conductores a tomar en consideración según la corriente de cortocircuito calculada, máxima o mínima.

La reactancia unitaria de las líneas aéreas, los cables y los juegos de barras se calcula por:

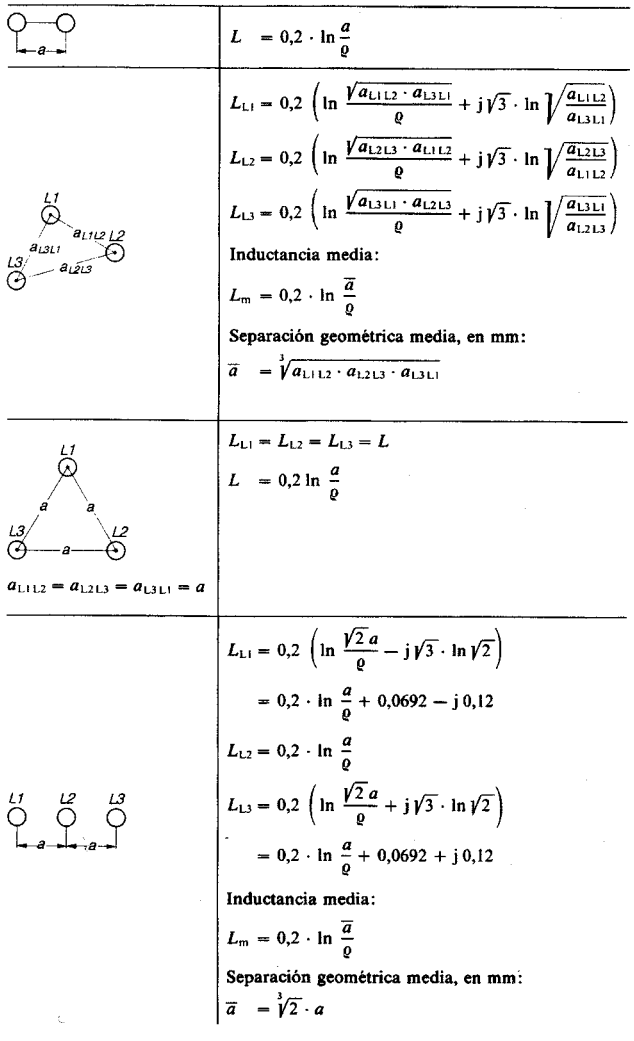
$$X_L = Lw = [\ 15{,}7 + 144{,}44\ \text{Log}\ (d/r))\ ] \qquad (16)$$

expresada en mΩ/km para un sistema de cables monofásicos o trifásico en triángulo, con dimensiones en mm donde:

r: radio de los conductores;
d: distancia media entre los conductores;
Log: logaritmo decimal.

Para las líneas aéreas, la reactancia crece ligeramente con la separación los conductores (como Log (d/r), y, por tanto, con la tensión de utilización. Como valores característicos podemos considerar:

- X = 0,3 Ω/km (líneas de baja o media tensión);
- X = 0,4 Ω/km (líneas de media o alta tensión);



$$L = 0{,}2 \cdot \ln \frac{a}{\varrho}$$

$$L_{L1} = 0{,}2 \left(\ln \frac{\sqrt{a_{L1L2} \cdot a_{L3L1}}}{\varrho} + j\sqrt{3} \cdot \ln \sqrt{\frac{a_{L1L2}}{a_{L3L1}}} \right)$$

$$L_{L2} = 0{,}2 \left(\ln \frac{\sqrt{a_{L2L3} \cdot a_{L1L2}}}{\varrho} + j\sqrt{3} \cdot \ln \sqrt{\frac{a_{L2L3}}{a_{L1L2}}} \right)$$

$$L_{L3} = 0{,}2 \left(\ln \frac{\sqrt{a_{L3L1} \cdot a_{L2L3}}}{\varrho} + j\sqrt{3} \cdot \ln \sqrt{\frac{a_{L3L1}}{a_{L2L3}}} \right)$$

Inductancia media:

$$L_m = 0{,}2 \cdot \ln \frac{\overline{a}}{\varrho}$$

Separación geométrica media, en mm:

$$\overline{a} = \sqrt[3]{a_{L1L2} \cdot a_{L2L3} \cdot a_{L3L1}}$$

$$L_{L1} = L_{L2} = L_{L3} = L$$

$$L = 0{,}2 \ln \frac{a}{\varrho}$$

$$a_{L1L2} = a_{L2L3} = a_{L3L1} = a$$

$$L_{L1} = 0{,}2 \left(\ln \frac{\sqrt{2}\,a}{\varrho} - j\sqrt{3} \cdot \ln \sqrt{2} \right)$$

$$= 0{,}2 \cdot \ln \frac{a}{\varrho} + 0{,}0692 - j\,0{,}12$$

$$L_{L2} = 0{,}2 \cdot \ln \frac{a}{\varrho}$$

$$L_{L3} = 0{,}2 \left(\ln \frac{\sqrt{2}\,a}{\varrho} + j\sqrt{3} \cdot \ln \sqrt{2} \right)$$

$$= 0{,}2 \cdot \ln \frac{a}{\varrho} + 0{,}0692 + j\,0{,}12$$

Inductancia media:

$$L_m = 0{,}2 \cdot \ln \frac{\overline{a}}{\varrho}$$

Separación geométrica media, en mm:

$$\overline{a} = \sqrt[3]{2} \cdot a$$

Figura 16. Inductancia L en mH/km por conductor en sistemas trifásicos simétricos

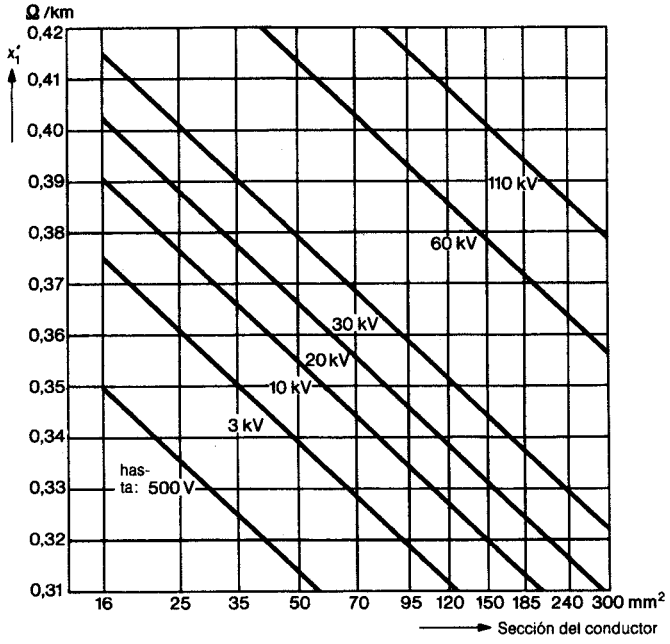


Figura 18. Valores medios de la reactancia de cada conductor para líneas aéreas de corriente trifásica

Cables para líneas aéreas			Resistencia óhmica en corriente alterna r', en ohmios/km								
Sección nominal	sección real	diámetro exterior	a la temperatura media del cable en °C								
q_N mm²	q_i mm²	m	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Cobre			para una conductividad $\varkappa$ en m Ω^{-1} mm^{-2}								
			60,87	58,33	56,00	53,84	51,85	50,00	48,27	46,67	45,16
10	10,0	0,0041	1,6592	1,7315	1,8035	1,8751	1,9479	2,0200	2,0924	2,1641	2,2365
16	15,9	0,0051	1,0435	1,0890	1,1343	1,1798	1,2251	1,2704	1,3160	1,3611	1,4066
25	24,2	0,0063	0,6856	0,7155	0,7453	0,7752	0,8050	0,8347	0,8646	0,8943	0,9242
35	34,4	0,0075	0,4824	0,5034	0,5243	0,5453	0,5663	0,5872	0,6083	0,6291	0,6501
50	49,5	0,0090	0,3352	0,3498	0,3644	0,3790	0,3935	0,4081	0,4227	0,4372	0,4518
50	48,3	0,0090	0,3453	0,3603	0,3752	0,3905	0,4053	0,4203	0,4356	0,4503	0,4653
70	65,8	0,0105	0,2537	0,2647	0,2755	0,2868	0,2976	0,3085	0,3197	0,3307	0,3416
95	93,2	0,0125	0,1794	0,1871	0,1949	0,2027	0,2105	0,2182	0,2260	0,2337	0,2415
120	117,0	0,0140	0,1428	0,1493	0,1554	0,1616	0,1678	0,1740	0,1802	0,1863	0,1925
150	147,0	0,0158	0,1142	0,1191	0,1239	0,1289	0,1332	0,1387	0,1436	0,1485	0,1534
185	182,0	0,0175	0,0925	0,0965	0,1004	0,1044	0,1088	0,1123	0,1162	0,1202	0,1241
240	243,0	0,0203	0,0701	0,0731	0,0760	0,0790	0,0978	0,0849	0,0879	0,0908	0,0938
300	299,0	0,0225	0,0575	0,0599	0,0623	0,0647	0,0670	0,0694	0,0718	0,0742	0,0766
Aluminio			para una conductividad $\varkappa$ en m Ω^{-1} mm^{-2}								
			38,46	36,85	35,38	34,02	32,76	31,59	30,50	29,48	28,53
10	10,0	0,0041	2,6261	2,7408	2,8548	2,9688	3,0830	3,1972	3,2787	3,4261	3,5401
16	15,9	0,0051	1,6516	1,7238	1,7954	1,8672	1,9390	2,0108	2,0827	2,1547	2,2265
25	24,2	0,0063	1,0851	1,1326	1,1796	1,2268	1,2740	1,3212	1,3684	1,4157	1,4629
35	34,4	0,0075	0,7634	0,7968	0,8299	0,8630	0,8962	0,9294	0,9626	0,9959	1,0291
50	49,5	0,0090	0,5306	0,5537	0,5767	0,5998	0,6228	0,6459	0,6690	0,6921	0,7152
50	48,3	0,0090	0,5464	0,5703	0,5940	0,6177	0,6415	0,6652	0,6890	0,7128	0,7366
70	65,8	0,0105	0,4011	0,4186	0,4360	0,4534	0,4709	0,4883	0,5058	0,5233	0,5407
95	93,2	0,0125	0,2833	0,2955	0,3078	0,3201	0,3324	0,3447	0,3571	0,3694	0,3817
120	117,0	0,0140	0,2259	0,2357	0,2455	0,2553	0,2650	0,2747	0,2845	0,2944	0,3041
150	147,0	0,0158	0,1799	0,1878	0,1956	0,2034	0,2112	0,2190	0,2267	0,2345	0,2423
185	182,0	0,0175	0,1456	0,1518	0,1581	0,1644	0,1707	0,1770	0,1832	0,1896	0,1959
240	243,0	0,0203	0,1099	0,1146	0,1193	0,1241	0,1287	0,1335	0,1382	0,1430	0,1477
300	299,0	0,0225	0,0898	0,0934	0,0973	0,1011	0,1049	0,1088	0,1126	0,1164	0,1203

Tabla 3. Resistencias para cables de líneas aéreas fabricados según DIN 48.201.

Para los cables, según su sistema de instalación, la tabla 4 recapitula diferentes valores de reactancia en baja tensión.

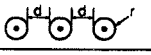
tipo de instalación	juego de barras	cable trifásico	cables unipolares separados	cables unipolares aplicados en triángulo	3 cables en línea juntos	3 cables en línea separados en "d" d = 2r	d = 4r
esquema							
reactancia unitaria valores extremos en mΩ/m	0,15	0,08	0,15	0,085	0,095	0,145	0,19
reactancia unitaria valores extremos en mΩ/m	0,12-0,18	0,06-0,1	0,1-0,2	0,08-0,09	0,09-0,1	0,14-0,15	0,18-0,20

Tabla 4. Valores de la reactancia de los cables según el tipo de instalación.

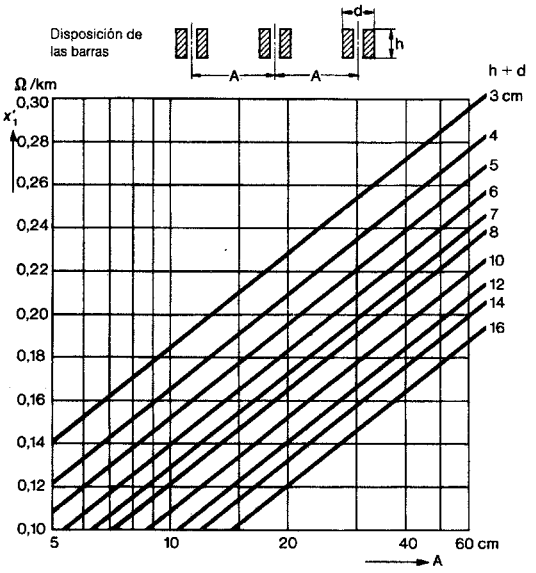


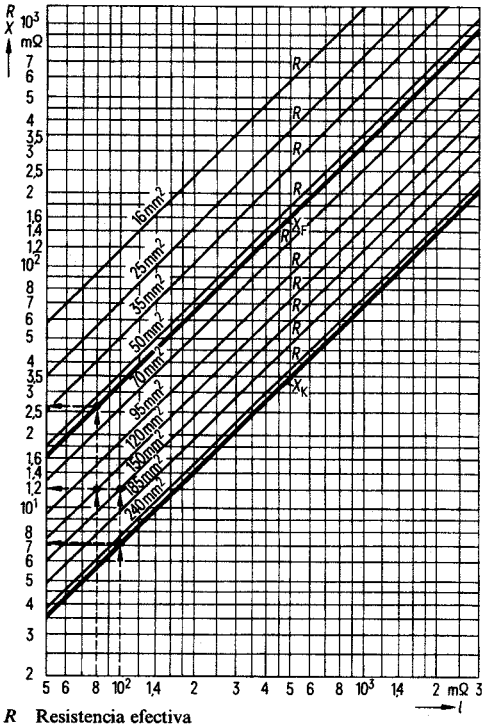
Figura 18. Valores medios de la reactancia inductiva por paquete de conductores, para f=50 Hz.

Los valores medios a recordar son:

- 0,08 mΩ/m para cable trifásico en baja tensión;
- 0,1 a 0,15 mΩ/m para cable trifásico tripolar en media tensión;
- 0,09 mΩ/m para cables unipolares en línea o en triángulo;
- 0,15 mΩ/m por defecto para los juegos de barras y cables unipolares separados; para los juegos de barras tipo (sandwich) (p.e. canalis Telemecánica) esta reactancia es mucho más baja.

Simplificaciones:

- La impedancia de las conexiones cortas entre el punto de distribución y el transformador MT/BT puede despreciarse



R Resistencia efectiva
X_F Reactancia de líneas aéreas (conductores desnudos)
X_K Reactancia de cables

Figura 19. Red 380 V. Valores de resistencia y reactancia de conductores de cobre. Con conductores de aluminio se multiplicará por 1.7

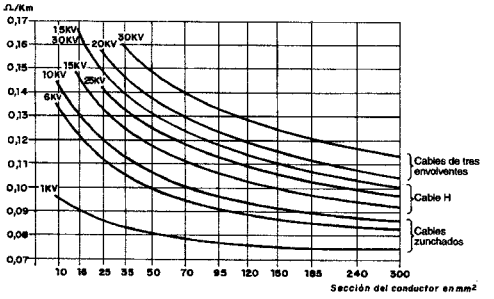


Figura 20. Reactancia inductiva por fase para 50Hz en cables subterráneos trifásicos.

si aceptamos un error, en exceso sobre la corriente decortocircuito; error tanto más importante cuanto mayor es la potencia del transformador.

- La capacidad de los cables respecto a tierra (modo común), de 10 a 20 veces mayor que la de las líneas debe tenerse en consideración para los casos de defecto a tierra. A título indicativo la capacidad de un cable trifásico de alta o media tensión, de 120 mm² de sección es del orden de 1 μF/km; la corriente capacitiva sigue débil, del orden de los 5 A/km para una tensión de 20 kV.
- La resistencia o la reactancia de las conexiones pueden despreciarse si una de las magnitudes R_L o X_L es mucho menor que la otra. El error sobre la impedancia no tiene importancia; por ejemplo: con una relación de 3 entre R_L y de X_L, el error sobre Z_L es del 5,1%. La utilización de las curvas de R_L y de X_L de la figura 21 permite deducir las secciones de los cables para las que la impedancia puede asimilarse a la resistencia o a la reactancia.

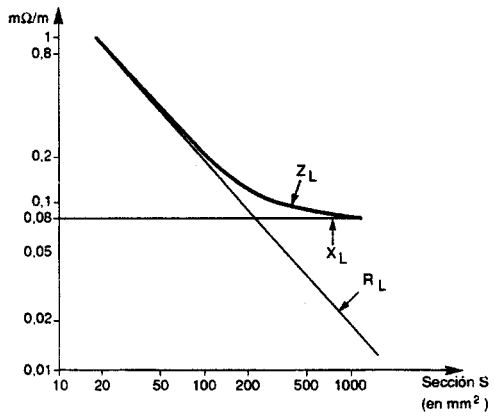


Figura 21. Impedancia Z_L de un cable trifásico, a 20°C, con conductores de cobre.

- **Impedancia de las máquinas rotativas:**

• *Generadores síncronos:*

Las impedancias de las máquinas se expresan generalmente bajo la forma de un porcentaje como:

$$\frac{Icc}{In} = \frac{100}{e} \qquad (30)$$

la magnitud e es el equivalente a la tensión de cortocircuito (ucc) de los transformadores.

$$Z_G = \frac{e}{100}\frac{U^2}{Sn} \qquad (31)$$

donde:

U: Tensión compuesta del alternador en vacío.
Sn: Potencia aparente (VA) del alternador.

Además, para valores bajos de R_G/X_G del orden de 0,05 a 0,1 en alta tensión y de 0,1 a 0,2 en baja tensión, los valores de la impedancia Z_G y la reactancia X se confunden. Los valores de e vienen dados en la tabla 5 para los turboalternadores de rotor liso y para los alternadores hidráulicos de polos salientes, (pequeñas velocidades).

Puede sorprender, de la tabla, que las reactancias permanentes de cortocircuito rebasen el valor del 100% (en cuyo instante Icc<In). Como la intensidad de cortocircuito es esencialmente inductiva y requiere toda la energía magnetizante que puede suministrar el inductor, éste resulta subexcitado sin poder suministrar la intensidad nominal correspondiente a la potencia activa suministrada por la turbina (cos φ 0,8 a 1).

Reactancias de alternador [e%]			
	Reactancia Subtransitoria	**Reactancia Transitoria**	**Reactancia Permanente**
Turboalternadores	10 - 20	15 - 25	150 - 230
Alternadores de polos salientes	15 - 25	25 - 35	70 - 120

Tabla 5. Reactancias de un alternador.

• *Motores y compensadores síncronos:*

El comportamiento de esta máquina en cortocircuito es semejante al de los alternadores. Suministran a la red una intensidad función de su reactancia en e%.

Reactancias de motores y compensadores síncronos [e%]			
	Reactancia Subtransitoria	**Reactancia Transitoria**	**Reactancia Permanente**
Motores de Alta Velocidad	15	25	80
Motores Lentos	35	50	100
Compensadores	25	40	60

Tabla 6. Reactancias de motores y compensadores síncronos.

• *Motores asíncronos:*

Cuando en sus bornes se produce un cortocircuito, el motor genera una intensidad que se amortigua rápidamente, con una constante de tiempo de aproximadamente:

- 2/100 s para los motores de jaula simple hasta 100 kW.
- 3/100 s para los motores de doble jaula o de más de 100 kW.
- 3 a 10/100 s para los grandes motores de media y alta tensión (1.000 kW) de rotor bobinado.

El motor asíncrono es, pues, ante un cortocircuito, un generador al que podemos atribuir una impedancia (sólo subtransitoria) del 20% al 25%. Sin embargo, nos encontramos con el problema que plantean la gran cantidad de motores de pequeña potencia unitaria que se hallan instalados en las redes industriales. Es difícil prever el número medio de motores en servicio que aportarán energía en el momento de un cortocircuito. Resulta un trabajo arduo e inútil calcular las corrientes individuales de cada uno de los motores, teniendo en cuenta sus impedancias de conexión. Por ello, es habitual (sobre todo en EE.UU.) considerar globalmente la contribución a la corriente total de defecto del conjunto de los motores asíncronos de una instalación en baja tensión. Comparamos el conjunto de motores a un generador único que aporta al juego de barras una intensidad igual a 3 veces la suma de las intensidades nominales de todos los motores instalados.

También la aportación de corriente al cortocircuito puede determinarse de acuerdo a la norma CEI 92-4 que establece:

$$Icc_{MOTOR} = m * I_{N_{MOTOR}} \quad ; \text{ donde } m = 6.25 * \frac{-t}{e^{0.018}} \qquad (32)$$

- **Otras impedancias:**

  • *Condensadores:*

Una batería de condensadores, en paralelo, situada en la proximidad del punto del defecto se descarga incrementado la intensidad de cortocircuito. Esta descarga oscilante amortiguada se caracteriza por una primera cresta de alto valor, que se suma a la primera cresta de la corriente de cortocircuito, si bien su frecuencia es muy superior a la de la red. Pero según la coincidencia del instante inicial del defecto con la onda de tensión, pueden presentarse dos casos extremos:

- Si el instante coincide con un cero de tensión. La corriente de descarga de la capacidad es nula pues el condensador está sin carga y precisamente en este instante el cortocircuito es asimétrico y produce una primera cresta de amplitud máxima.
- Si el instante coincide con un máximo de la tensión, la batería de condensadores genera una corriente de descarga que se superpone a la primera cresta de un cortocircuito simétrico, la de menor valor posible.

Es, por ello, poco probable que, salvo en caso de baterías muy potentes, esta superposición provoque una primera cresta de valor mayor que la corriente de cresta de un defecto asimétrico. Por tanto, para calcular el valor máximo de la corriente de cortocircuito, no es necesario tener en cuenta la aportación de las baterías de condensadores.

Pero hemos de preocuparnos de los efectos de las baterías al elegir la tecnología de los interruptores automáticos. En efecto, una vez abierto el circuito, los condensadores modifican considerablemente la frecuencia propia del circuito con una incidencia importante sobre la ruptura.

  • *Aparamenta:*

Interruptores automáticos, contactores con bobina de soplado, relés térmicos directos, etc., presentan una impedancia que puede ser tenida en cuenta. Esta impedancia sólo debe tenerse en cuenta para los aparatos situados inmediatamente aguas arriba del defecto que son los únicos que deben abrir el cortocircuito (interruptores automáticos selectivos). Por ejemplo: para los interruptores automáticos de baja tensión, es correcto tomar un valor de 0,15mΩ para su reactancia y despreciar la resistencia.

Los aparatos de corte hay que distinguirlos según la velocidad de apertura o interrupción:

- Ciertos aparatos abren muy rápido y reducen notablemente las corrientes de cortocircuito, son los llamados limitadores. Los esfuerzos electrodinámicos y solicitaciones térmicas que aparecen en la instalación son notablemente inferiores a los teóricos.
- Los otros aparatos, como los interruptores automáticos con retardo a la apertura, no presentan esta ventaja.

Arco de Defecto:
La corriente de cortocircuito mantenida a través de un arco presenta a lo largo de este arco, una resistencia fluctuante y de valor apreciable: la caída de tensión de un arco de defecto varía entre 100 y 300 V. En alta tensión este valor es despreciable con relación a la tensión de la red y el arco no presenta influencia de reducción notable sobre la intensidad de cortocircuito. No es lo mismo en baja tensión, donde la corriente real de un defecto a través de un arco es tanto más limitada cuanto más baja es la tensión de la red. Por ejemplo, el arco creado sobre un cortocircuito entre conductores o un juego de barras, puede reducir la intensidad de la corriente de cortocircuito presunta del 20% al 50% e incluso más del 50% para tensiones nominales inferiores a 440 V. Este fenómeno tan favorable en baja tensión, para el 90% de los defectos, no puede, sin embargo, tenerse en cuenta para la determinación del poder de corte ya que el 10% de los defectos se producen al cierre de un aparto sobre detecto franco prácticamente sin arco. Sin embargo, hay que tenerlo en cuenta en el cálculo de la corriente mínima de cortocircuito.

Impedancias diversas:
Consideramos otros elementos que pueden elevar la impedancia y no son despreciables. Es el caso de los filtros antiarmónicos y bobinas de choque, destinadas a limitar las corrientes de cortocircuito, que deben tenerse en cuenta en el cálculo, como los transformadores de corriente de primario bobinado en los que la impedancia varía según el calibre y la construcción.

6.- SISTEMA EN POR UNIDAD (P.U.).

6.1.- Relaciones entre las impedancias de los diferentes niveles de tensión de una instalación eléctrica.

La potencia de cortocircuito Scc en un punto determinado de la red, viene definida por:

$$Scc = \sqrt{3}UIcc = \frac{U^2}{Zcc} \qquad (33)$$

Esta expresión de la potencia de cortocircuito implica por definición, que Scc es invariable, en un punto determinado de la red, cualquiera que sea la tensión, y la expresión:

$$Icc = \frac{Scc}{\sqrt{3}U} \qquad (34)$$

implica que todas las impedancias deben calcularse refiriéndolas a la tensión del punto del defecto, lo que puede comportar cierta complicación y ser fuente de errores para cálculos en redes a dos niveles de tensión. Así, la impedancia de una línea de alta tensión ha de multiplicarse por el cuadrado de la inversa de la relación de transformación, para el cálculo de un defecto, lado baja tensión del transformador:

$$Z_{BT} = Z_{AT}\left[\frac{U_{BT}}{U_{AT}}\right]^2 \qquad (35)$$

Un método simple permite evitar estas dificultades trabajando en un sistema en p.u.

6.2.- Sistemas en p.u..

El escalado de magnitudes eléctricas se hace de la manera siguiente:

$$\textbf{Valor p.u.} = \frac{\textbf{Valor actual}}{\textbf{Valor base (valor nomial)}} \qquad (36)$$

Ventajas:

- Simplifica cálculos manuales, mayor precisión comparativa.
- Valores en un estrecho margen ⇒ Errores más evidentes.
- Con una base adecuada desaparecen transformadores ideales.
- Tensiones ≈ 1 p.u.
- Información sobre valores relativos.

Las magnitudes base a adoptar serán: V_B, I_B, S_B, Z_B, (ángulos no, son adimensionales).

Se eligen 2 libremente: usualmente V_B, S_B. Las otras se toman de forma que:

$$I_B = \frac{S_B}{V_B} \qquad Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} \qquad (37)$$

$$V_{p.u.} = \frac{V}{V_B}^{\angle \varphi_V}$$

$$I_{p.u.} = \frac{I}{I_B}^{\angle \varphi_I}$$

$$S_{p.u.} = \frac{P}{S_B} + j\frac{Q}{S_B} = P_{p.u.} + jQ_{p.u.} \qquad (38)$$

$$Z_{p.u.} = \frac{R}{Z_B} + j\frac{X}{Z_B} = R_{p.u.} + jX_{p.u.} = Z_{p.u.}^{\angle \varphi}$$

Tal como se han elegido las bases, se cumple que:

$$Vpu = Zpu * Ipu \qquad Spu = Vpu * Ipu^* \qquad (39)$$

En sistemas trifásicos el sistema en p.u. será:

Tensión base: V_{LB}, $V_{FB} = V_{LB}/\sqrt{3}$.
Potencia base: S_{TB}, $S_{MB} = S_{TB}/3$.

Se cumple que:

$$V_F\,pu = V_L\,pu$$
$$I_F\,pu = I_L\,pu \qquad (40)$$
$$S_M\,pu = S_T\,pu$$

No hay que distinguir entre sistema monofásico y trifásico en p.u.

$$I_{LB} = \frac{S_{TB}}{\sqrt{3}V_{LB}} = \frac{S_{MB}}{V_{FB}}$$
$$Z_B = \frac{V_{LB}^2}{S_{TB}} = \frac{V_{FB}^2}{S_{MB}} \qquad (41)$$

Una vez elegida una base es necesario saber hacer cambios de base debido a:

- Las impedancias de las máquinas se expresan en p.u. (ó %) sobre los valores nominales de la propia máquina.
- Necesidad de unificar bases ⇒ CAMBIO DE BASE.
- Dada Zp.u. (sobre una base V_B, S_B) para obtener Z''p.u. (sobre V''_B, S''_B)

$$Z''p.u. = Zp.u.\frac{V_B^2}{S_B}\frac{S''_B}{V''^2_B} \qquad (42)$$

7.- CÁLCULOS EN SISTEMAS DE GRAN DIMENSIÓN.

7.1.- Matriz de admitancia de nudos.

La fuente de tensión de la figura 22a puede transformarse en la fuente de corriente de la figura 22b y viceversa siempre que se cumpla que:

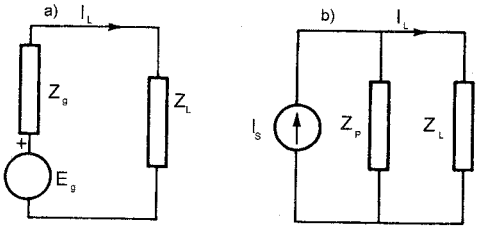


Figura 22.

$$Is = \frac{Eg}{Zp}$$
$$Zp = Zg \qquad (43)$$

Planteamos el sistema de cuatro conductores que corresponde al diagrama unifilar de la figura 23a y que puede representarse por la red de la figura 23b, para poder definir los elementos de la matriz de admitancia de nudos de una red trifásica genérica.

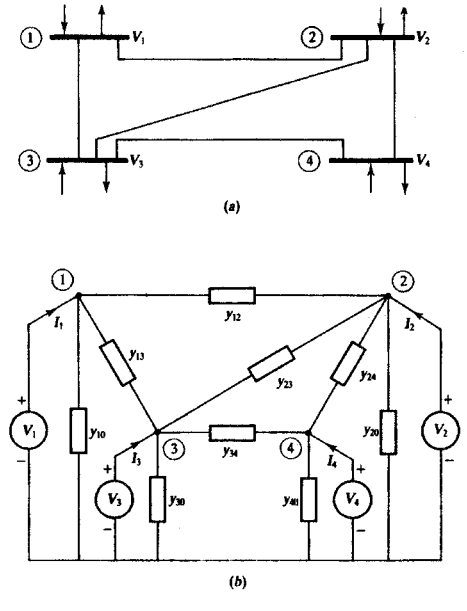


Figura 23.

En función de los voltajes de nudo V_1, V_2, V_3 y V_4 y de las admitancias dadas, la ley de las corrientes de Kirchhoff conduce a:

$$I_1 = V_1y_{10} + (V_1 - V_2)y_{12} + (V_1 - V_3)y_{13}$$
$$I_2 = V_2y_{20} + (V_2 - V_1)y_{12} + (V_2 - V_3)y_{23} + (V_2 - V_4)y_{24}$$
$$I_3 = V_3y_{30} + (V_3 - V_1)y_{13} + (V_3 - V_2)y_{23} + (V_3 - V_4)y_{34}$$
$$I_4 = V_4y_{40} + (V_4 - V_2)y_{24} + (V_4 - V_3)y_{34}$$

Reacomodando estas ecuaciones y reescribiéndolas en forma de matriz, obtenemos:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y10 + y12 + y13 & -y12 & -y13 & 0 \\ -y12 & y20 + y12 + y23 + y24 & -y23 & -y24 \\ -y13 & -y23 & y30 + y13 + y23 + y34 & -y34 \\ 0 & -y24 & -y34 & y40 + y24 + y34 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (44)$$

La ecuación anterior se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (45)$$

donde:

$$Y_{11} = y_{10} + y_{12} + y_{13}$$
$$Y_{22} = y_{20} + y_{12} + y_{23} + y_{24}$$
$$Y_{33} = y_{30} + y_{13} + y_{23} + y_{34}$$
$$Y_{44} = y_{40} + y_{24} + y_{34}$$
$$Y_{12} = Y_{21} = -y_{12}$$
$$Y_{13} = Y_{31} = -y_{13}$$
$$Y_{14} = Y_{41} = -y_{14}$$
$$Y_{23} = Y_{32} = -y_{23}$$
$$Y_{24} = Y_{42} = -y_{24}$$
$$Y_{34} = Y_{43} = -y_{34}$$

Cada admitancia Yii (i = 1, 2, 3, 4) se llama autoadmitancia (o admitancia de punto de excitación) del nudo i y es igual a la suma algebraica de todas las admitancias conectadas en el nudo. Cada uno de los términos no diagonales Yik (i, k = 1, 2, 3, 4) se llama admitancia mutua (admitancia de transferencia) entre los nudos i y k, y es igual al negativo de la suma de todas las admitancias conectadas directamente entre esos nudos. Más aún, Yik = Yki.

Así pues, para una red general con N nudos la primera ley de Kirchhoff se puede escribir en términos de tensiones del nudo como:

$$[I] = [Y_{NUDOS}] [V] \quad (46)$$

donde $[Y_{NUDOS}]$ es:

$$Y_{NUDOS} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & . & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & . & Y_{2N} \\ . & . & . & . \\ Y_{N1} & Y_{N2} & . & Y_{NN} \end{bmatrix} \quad (47)$$

se llama matriz de admitancia de nudos, y [V] e [I] forman la matriz de N elementos de tensiones de nudo y la matriz de las corrientes de nudo, respectivamente.

El primer subíndice de cada Y indica el nudo en el cual la corriente está expresada y el segundo subíndice indica el nudo cuyo voltaje es responsable de una componente particular de la corriente. Además, las admitancias a lo largo de la diagonal son las admitancias propias, y las admitancias fuera de la diagonal son las admitancias mutuas. Se deduce que la corriente que entra en un nudo k está dada por:

$$I_K = \sum_{n=1}^{N} Y_{Kn} V_n \tag{48}$$

7.2.- Matriz impedancias (Z_{BUS}).

La matriz de impedancias del conductor se define por:

$$[Z_{BUS}] = [Y_{NUDOS}]^{-1} \tag{49}$$

Por lo tanto, la tensión en los nudos se puede escribir como:

$$[V] = [Z_{BUS}] * [I] \tag{50}$$

donde:

$$Z_{BUS} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & . & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & . & Z_{2N} \\ . & . & . & . \\ Z_{N1} & Z_{N2} & . & Z_{NN} \end{bmatrix} \tag{51}$$

El procedimiento para determinar los elementos de Z_{BUS} es similar al que se estudió en la sección de la matriz de admitancias. Así, la segunda de las ecuaciones representadas por (50) se puede escribir como:

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + Z_{23}I_3 + + Z_{2N}I_N \tag{52}$$

de la cual obtenemos:

$$Z_{22} = \frac{V_2}{I_2}\Big|_{I_1 = I_3 = I_N = 0}$$
$$Z_{21} = \frac{V_2}{I_1}\Big|_{I_1 = I_3 = I_N = 0} \tag{53}$$

Las matrices de impedancia y de admitancia del conductor se utilizan, con ayuda del ordenador, en el estudio del flujo de potencia y los cálculos de faltas eléctricas.

7.3.- Cálculo de la intensidad de cortocircuito.

El cortocircuito trifásico equilibrado se produce difícilmente en la práctica, pero, es el más grave y fácil de analizar. Como el sistema es equilibrado podemos hacer un análisis por fase.

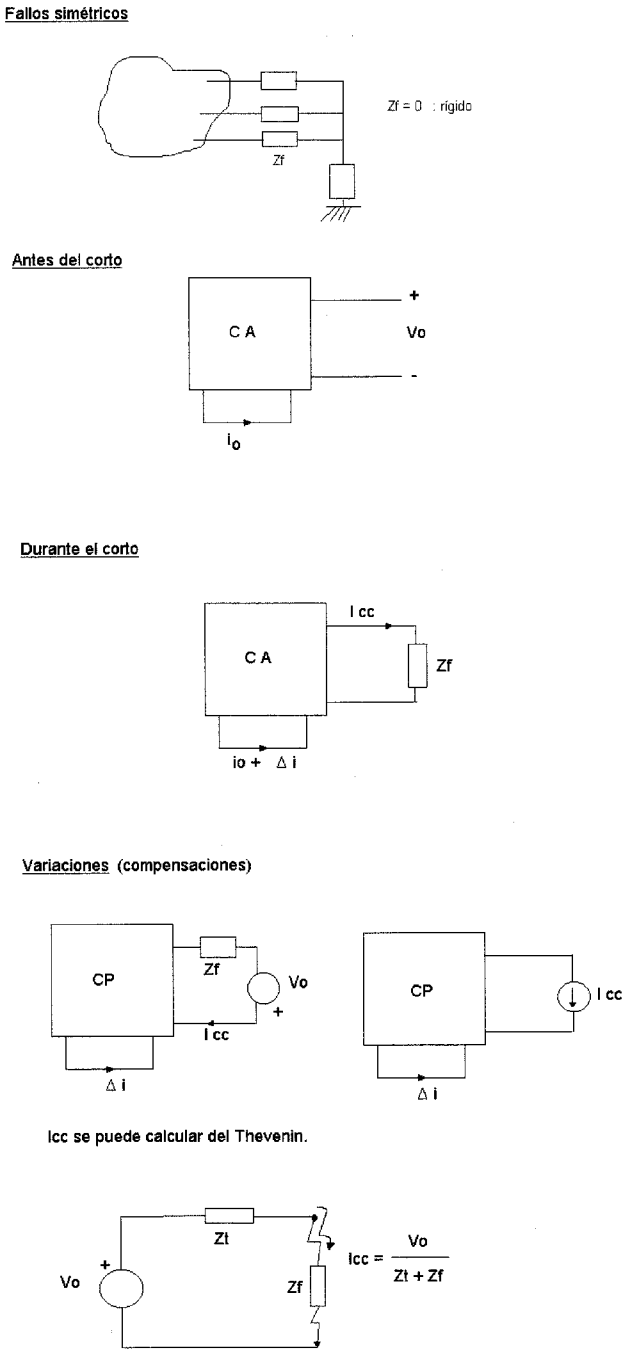


Figura 24. Teoremas para el análisis de un cortocircuito trifásico equilibrado

En la figura 24 se muestra el esquema de un sistema de gran dimensión con un cortocircuito trifásico así como los teoremas utilizados para la solución del circuito analizado.En un sistema de gran dimensión los cálculos matriciales se hacen con ordenador. Antes de producirse el cortocircuito el estado del sistema es el resultante de LOAD FLOW. Para la resolución del problema se consideran las siguientes simplificaciones.

- V = 1 p.u. en todos los nudos;
- sistema en vacío;
- sólo se tienen en cuenta elementos rotativos (generadores, motores) que contribuyen a la intensidad de cortocircuito.

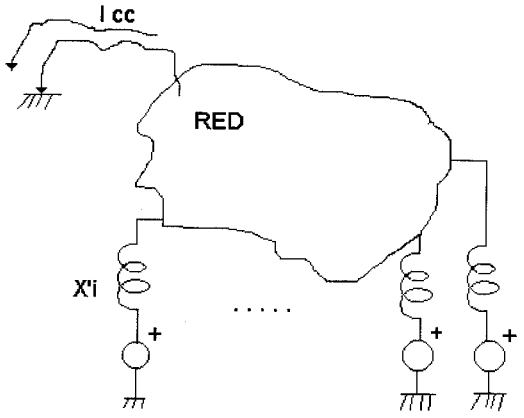


Figura 25. Red trifásica activa con un cortocircuito.

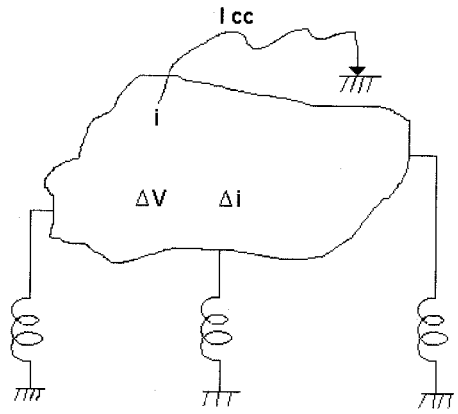


Figura 26. Red trifásica pasiva.

$$[Y_{NUDOS}]_{CC} = [Y_{NUDOS}]_{L.F.} + \begin{bmatrix} \frac{-1}{X''_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{X''_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} j \qquad (54)$$

$$V_o = \left[V_1^0 \;\; . \;\; . \;\; V_i^0 \;\; . \;\; V_n^0\right]^t$$
$$\Delta V = \left[\Delta V_1 \;\; . \;\; . \;\; \Delta V_i \;\; . \;\; \Delta V_n\right]^t \qquad (55)$$

$$[Y_{NUDOS}]_{CC}[\Delta V] = [I]$$
$$I = \left[0 \;\; . \;\; . \;\; -I_{CC} \;\; . \;\; 0\right]^t \qquad (56)$$

La matriz de impedancia de nudos [Zbus] = $[Z_N] = [Y]^{-1}$.

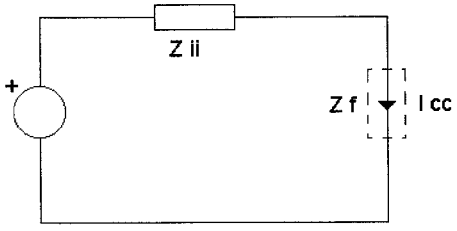
$$\begin{bmatrix} . \\ . \\ \Delta Vj \\ . \\ . \end{bmatrix}_{CC} = \begin{bmatrix} . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & Zji & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -Icc \\ 0 \end{bmatrix} i \qquad (57)$$

$$\Delta V = Z_N I$$

$$Icc = \frac{V_i^{\circ}}{Z_{ii} + Z_f}$$

$$\Delta Vj = -Z_{ji} Icc \qquad (58)$$

$$Vj = V_j^{\circ} - \frac{Z_{ji} V_i^{\circ}}{Z_{ii} + Z_f}$$



$\Delta V j = - Z ji I cc$

Figura 27. Equivalente Thevenin.

Sólo es preciso conocer una columna de Z_{BUS} que se determinará a partir de la siguiente igualdad:

$$[Y_{NUDOS}] \begin{bmatrix} \\ Zij \\ \\ \\ \\ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} i \qquad (59)$$

Conocidas Vj es inmediato calcular Icc por las ramas como:

$$Iij = \frac{Vi - Vj}{Zij} \qquad (60)$$

TEMA 6. LA DISTRIBUCIÓN EN B.T.. PROTECCIÓN DE PERSONAS

1.- RIESGOS DE LA UTILIZACIÓN DE LA ELECTRICIDAD.

La utilización de la electricidad presenta unos riesgos:

- Riesgos de incendio y explosión.
- Riesgos de electrización y electrocución.

Se emplea el término electrización para todas las víctimas, sobrevivientes o fallecidas (en el caso de las sobrevivientes, algunas conservan secuelas, debidas principalmente a las quemaduras). Se emplea el término electrocución, para las víctimas fallecidas (del orden de 50 por año de media en España).

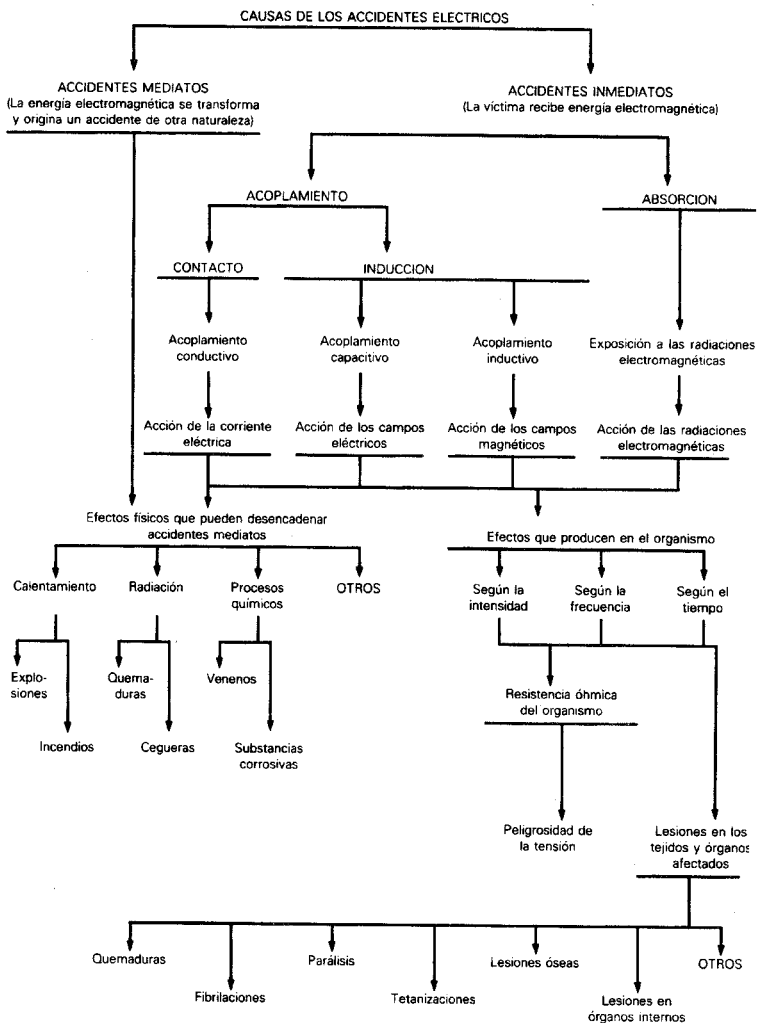


Figura 1. Estructura de los accidentes eléctricos.

Las masas de los elementos de una instalación no recorridas normalmente por una corriente, pueden, accidentalmente, estar sometidas a un potencial elevado respecto a tierra o respecto a otras masas. En esta situación, estas masas constituyen un grave peligro para las personas que puedan tocarlas. Es lo que se entiende por contacto indirecto a diferencia de contacto directo con los conductores normalmente bajo tensión.
Por tanto, la electrización puede producirse:

- Por contacto directo:
  - Con dos conductores activos o dos piezas conductoras, normalmente en tensión.
  - Con un conductor activo o una pieza conductora, normalmente en tensión, y tierra, (u otros cuerpos conductores conectados a tierra).
- Por contacto indirecto con masas puestas bajo tensión accidentalmente y tierra (u otros cuerpos conductores conectados a tierra).

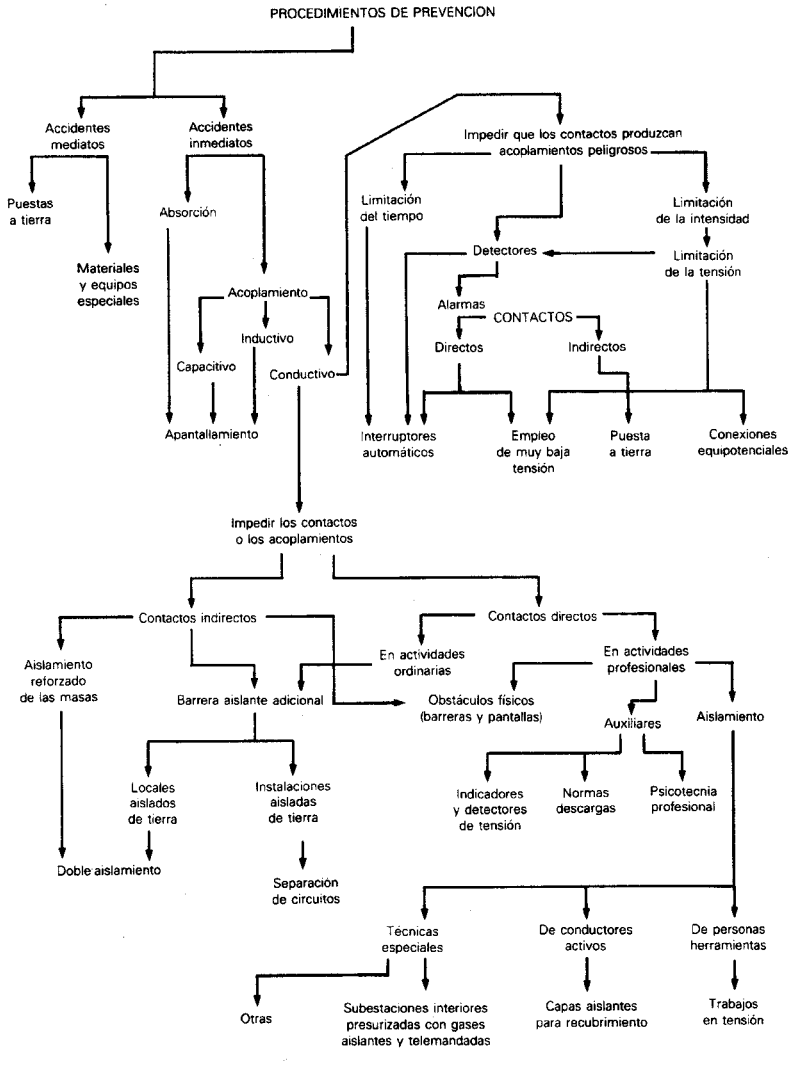


Figura 2. Estructura prevención de accidentes eléctricos.

Para evitar estos peligros, en toda la Comunidad Económica Europea existen reglamentaciones y normas que van aceptando por igual todos los países. El Reglamento electrotécnico de baja tensión (B.O.E. nº 42 del 09.10.73), el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación (B.O.E. nº 288 del 01.12.82), Instrucciones Técnicas complementarias y normas UNE sobre la materia, precisan las técnicas de protección a emplear.

Antes de seguir adelante, creemos imprescindible conocer los límites de sensibilidad del cuerpo humano a las corrientes eléctricas. En una primera aproximación, podemos asimilar el cuerpo humano a una resistencia eléctrica no constante (R), ver figura 3. Al producirse un contacto accidental, la energía disipada por el paso de una corriente (Id), durante un tiempo (t), será:

$$W = R\, Id^2 t \qquad (1)$$

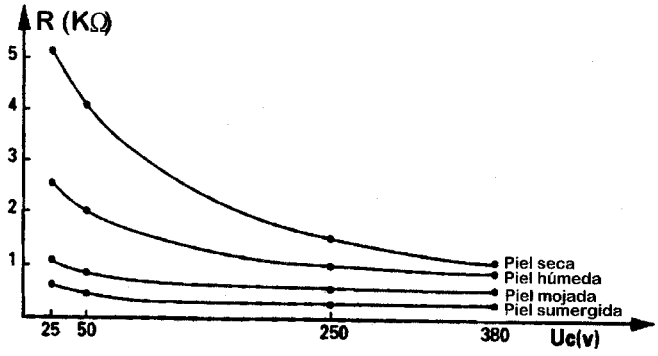


Figura 3. Resistencia del cuerpo humano en función de la tensión de contacto y del estado de la piel

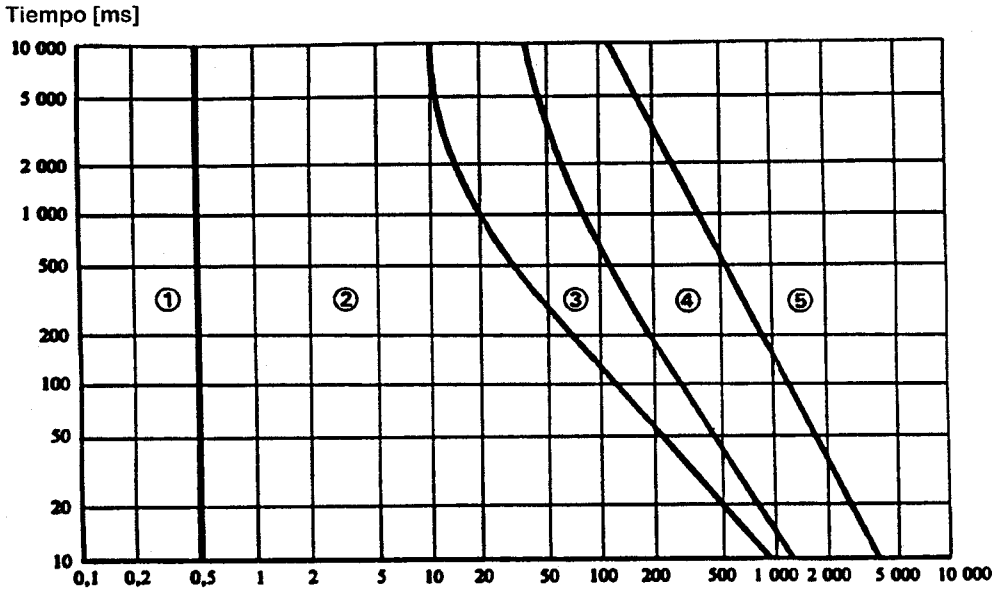
Esta energía, disipada en el cuerpo, se traducirá en quemaduras externas e internas. Realmente existen, además, otras acciones específicas sobre el organismo como:

- La tetanización de los músculos y miembros que se traduce en una contracción que impide cualquier movimiento. Si la corriente se interrumpe rápidamente, el sistema muscular afectado recupera su estado normal y en general el fenómeno no deja secuela.
- La tetanización del diafragma: si la corriente no se interrumpe rápidamente, desciende el valor de la resistencia del cuerpo humano, con lo que aumenta la corriente que atraviesa el organismo. A partir de un valor de 25 mA, el diafragma, que acciona nuestra respiración es afectado por la tetanización y ello representa la muerte aparente por asfixia.
- La fibrilación ventricular desajusta la actividad eléctrica rítmica autoprogramada del corazón. Este fenómeno, una vez disparado, es espontáneamente irreversible.

Hay que llamar la atención que la muerte no es inmediata y el ser humano se encuentra en un principio en un estado de muerte aparente. Teniendo en cuenta que los primeros instantes (segundos y minutos) que siguen al accidente son importantísimos para la sobrevivencia, es fundamenta conocer las acciones inmediatas a realizar es decir:

- Cotar la corriente eléctrica.
- Practicar la respiración artificial forzada y el masaje cardíaco, mientras se espera la llegada de socorros especializados.

La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) ha estudiado los efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano. Los efectos, sobre adultos, de corriente alterna de 50-60 Hz, según edición 1.974 de la publicación 479 preparada por el comité de estudios número 64 de la CEI se exponen en la figura 4.



Zona 1: habitualmente ninguna reacción
Zona 2: habitualmente algún defecto fisiopatológico
Zona 3: habitualmente algún riesgo de fibrilación
Zona 4: posibilidad de fibrilación (hasta 50%)
Zona 5: riesgo de fibrilación (superior al 50%)

Figura 4. Efectos de la C.A. sobre el cuerpo humano.

De esta forma los efectos de la corriente por el cuerpo humano pueden resumirse en:

- Sensación de paso de corriente eléctrica: el límite de percepción es muy variable entre una persona y otra: algunas perciben el paso de corriente para intensidades inferiores a 1 mA mientras otras no empiezan a notar el paso de corriente a través de su cuerpo hasta intensidades más elevadas, del orden de 2 mA.
- Confracciones musculares: ciertas personas se quedan "agarradas" al conductor para intensidades de menos de 10 mA mientras otras pueden todavía liberarse para intensidades superiores (diferentes sensibilidades según el sexo, la edad, el estado de salud, el nivel de atención, ect.).
- Paro respiratorio: para intensidades del orden de 20 a 30 mA, la contractura muscular puede difundirse y alcanzar los músculos respiratorios provocando un paro respiratorio.
- Fibrilación ventricular: existe una relación aproximada entre el peso de una persona y la intensidad que provoca la fibrilación, permitiendo de esta manera situar el umbral entre 70 y 100 mA (Dalziel). Este umbral puede variar considerablemente con las condiciones fisiológicas de la persona, pero también con los parámetros físicos del accidente: trayecto de la corriente a través del cuerpo, resistencia del organismo, tipo de contacto y tiempo de paso de la corriente.

- Riesgo de quemaduras: las quemaduras provocadas por la corriente eléctrica son frecuentes en accidentes domésticos y sobre todo industriales (más del 80% de quemaduras en los accidentes eléctricos observados por EDF). Podemos distinguir entre:
    - Quemadura por el arco, quemadura térmica provocada por la radiación calórica del arco eléctrico.
    - Quemadura electrotérmica, provocada por el paso de la corriente por el cuerpo humano.

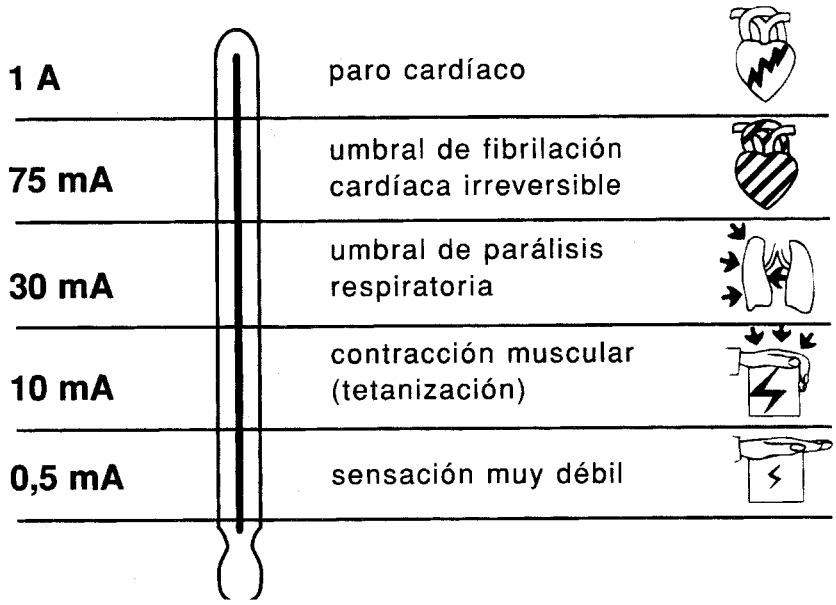


Figura 5. Resumen de efectos fisiológicos.

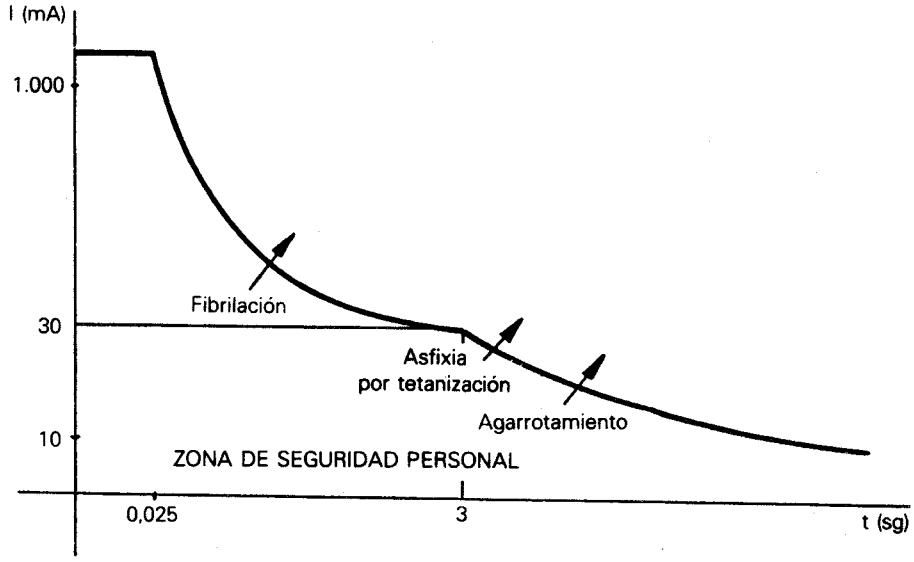


Figura 6. Curva de seguridad.

2.- ESQUEMAS DE DISTRIBUCIÓN.

Por la CEI se han considerado como normales tres regímenes del neutro, que, además, tienen carácter de aplicación obligada en los países de la C.E.C.:

- Neutro a tierra (TT) (figura 7): corresponde a las instalaciones alimentadas directamente por una red de distribución pública en B.T. en las que el neutro está conectado directamente a tierra. Las masas de los aparatos eléctricos de utilización están conectadas, también, directamente a tierra. Es el caso de todas las instalaciones domésticas y la mayoría de las instalaciones en España.
- Puesta al neutro (TN) (figuras 8, 9): en este sistema el neutro del transformador está conectado directamente a tierra:
    - TN-C: corresponde al caso en el que el conductor de neutro es, al mismo tiempo, el conductor de protección (PEN), al que se conectan obligatoriamente todas las masas de utilización.
    - TN-S: corresponde a las instalaciones en las que el conductor del neutro y el de protección están separados. Raramente existe en España.
- Neutro aislado o impedante (figura 10) IT: corresponde a las instalaciones en las que el punto neutro del devanado de B.T. del transformador de distribución no está puesto a tierra o lo está a través de una impedancia elevada (de 1.000 Ω a 2.000 Ω). En este sistema, las masas de utilización se conectan directamente a tierra.

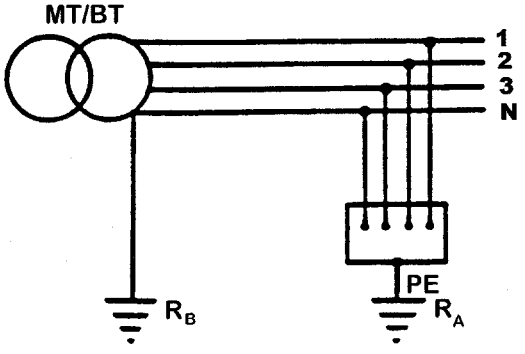


Figura 7. Esquema de distribución TT.

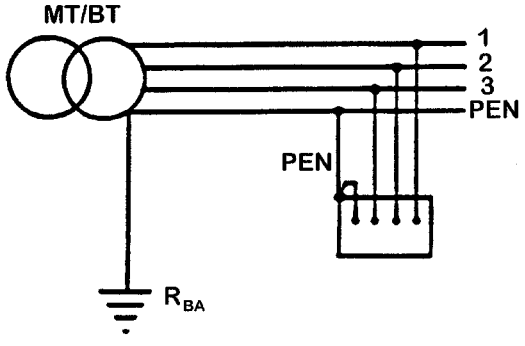


Figura 8. Esquema de distribución TN-C.

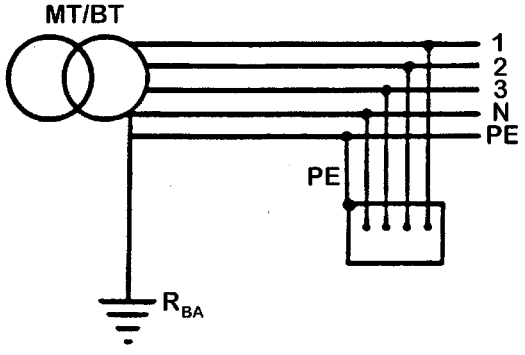


Figura 9. Esquema de distribución TN-S.

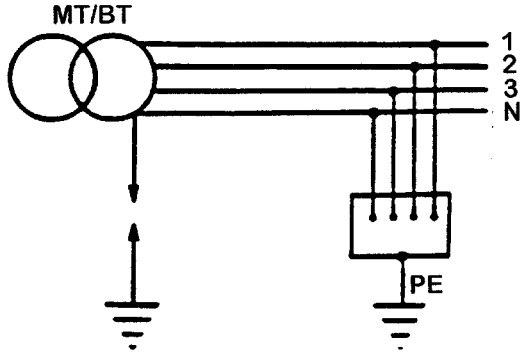


Figura 10. Esquema de distribución IT.

Ejemplos corrientes donde el régimen del neutro viene impuesto (o muy recomendado) por los reglamentos oficiales		
Edificio alimentado por una red de distribución pública (doméstico, pequeño terciario, pequeño taller)		NEUTRO A TIERRA (TT)
Escuela de enseñanza profesional (I.F.P.) o técnica (U.P.).		NEUTRO A TIERRA (TT)
Quirófanos y salas de curas en hospitales o clínicas.		NEUTRO AISLADO (IT)(1)
Circuitos de seguridad (alumbrado).		NEUTRO AISLADO (IT) (2)
Minas y canteras.		NEUTRO AISLADO O NEUTRO A TIERRA (TT) (3)

Tabla 1. Ejemplos corrientes donde el régimen del neutro viene impuesto (o muy recomendado) por los reglamentos oficiales.

Criterios para la elección del régimen de neutro

Mantenimiento asegurado por personal electricista cualificado	**Continuidad de servicio**	
	SI	**NO**
SI	**Neutro aislado (IT)** Combinado con otras medidas eventuales (socorros-normales, selectividad de las protecciones, localización y busca automática del primer defecto ...), constituye el medio más seguro para evitar al máximo los cortes en explotación. **Ejemplos:** ■ industrias donde la continuidad es prioritaria para la conservación de los bienes o de los productos (siderúrgica, industrias alimenticias ...). ■ explotación con circuitos prioritarios de seguridad: inmuebles de gran altura, hospitales establecimientos de concurrencia pública (1); ■ laboratorios, plataformas de ensayo (2).	**Neutro aislado (IT)** **Neutro a tierra (TT)** **Puesta al neutro (TN).** Elección definitiva después de examinar: ■ las características de la instalación (naturaleza de la red, de los receptores); ■ el grado de complejidad de la puesta en servicio de cada régimen; ■ el coste de cada régimen (estudio, instalación, verificación, y explotación).
NO	**Ningún régimen es satisfactorio** por el hecho de la incompatibilidad de estos dos criterios.	**Neutro a tierra (TT)** Es el más simple de poner en servicio y de explotar (en particular si se preveen modificaciones en la instalación en explotación).

Tabla 2. Criterios para la elección del régimen del neutro.

3.- PROTECCIÓN DE PERSONAS.

La energía eléctrica es empleada en la mayoría de las actividades industriales y nos proporciona bienestar en nuestra vida diaria. También hemos visto como esta energía es generada en un punto y transportada para su utilización a otros lugares. En el transporte de la energía eléctrica se utilizan conductores eléctricos. Los conductores eléctricos transitan por las edificaciones industriales, de viviendas, etc., constituyendo las instalaciones eléctricas. Hay que señalar que esta "convivencia" con los conductores eléctricos implica riesgos, para las personas, pues la energía eléctrica en sí es susceptible de transformarse en "calor" y, por tanto, existe el riesgo de incendios en nuestras edificaciones y por supuesto, existe el riesgo en sí de la corriente eléctrica, que puede producir efectos perjudiciales, en su paso a través del cuerpo humano. Para un valor dado de la corriente y para la frecuencia de nuestras instalaciones (50 Hz) el peligro de ésta es función del tiempo durante el cual la corriente recorre el cuerpo de la persona. Aparte de esto, la corriente eléctrica produce quemaduras más o menos importantes.

De todo lo expuesto, se deduce que en las instalaciones eléctricas, debemos poner especial cuidado en la protección de las personas, contra los posibles incendios (sobreintensidades) y contra los efectos de las corrientes eléctricas (contactos directos e indirectos).

3.1.- Protección contra contactos directos.

Esta protección trata de evitar en lo posible el contacto directo de una persona con una parte en tensión de la instalación eléctrica. Para considerar satisfecha esta protección en una instalación eléctrica, se tomará una de las medidas siguientes MIE BT 021:

- Alejamiento de las partes activas de la instalación a una distancia tal, del lugar donde las personas habitualmente se encuentran o circulan, que sea imposible un contacto fortuito. Estas distancias son:

    - 2,5 m hacia arriba;
    - 1,0 m lateralmente;
    - 1,0 m hacia abajo.

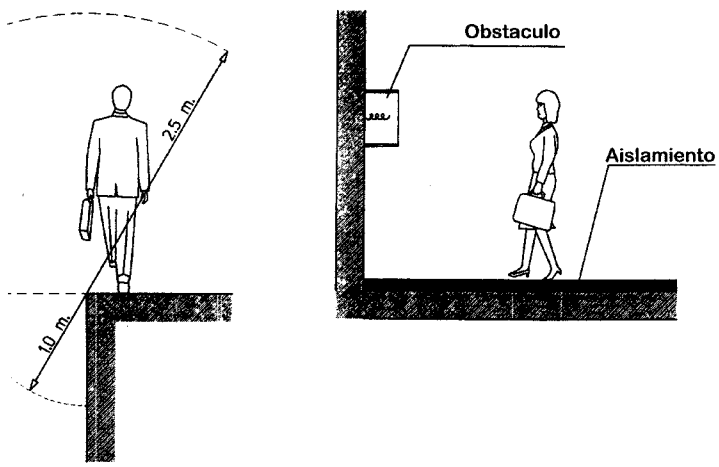


Figura 11. Medidas de protección ante contactos directos.

- Interposición de obstáculos que impidan todo contacto accidental con las partes activas de la instalación. Si los obstáculos son metálicos y deben ser considerados como masa, se aplicará una de las medidas de protección previstas contra los contactos indirectos.
- Recubrimiento de las partes activas de la instalación por medio de un aislamiento apropiado. Existen varios tipos de aislamientos apropiados, porejemplo, el aislamiento propio o funcional de los conductores eléctricos. El aislamiento de un lugar o emplazamiento como el suelo de un centro de transformación.

3.2.- Protección contra contactos indirectos.

El riesgo eléctrico por contacto indirecto proviene del contacto de la persona con las masas puestas accidentalmente en tensión (generalmente como consecuencia de un defecto de aislamiento). Cuando el aislamiento entre conductores activos y masa de los receptores es el correcto, no aparece ninguna tensión entre masas y tierra. En este caso, el contacto entre masas y tierra no representa ningún riesgo (figura 12).

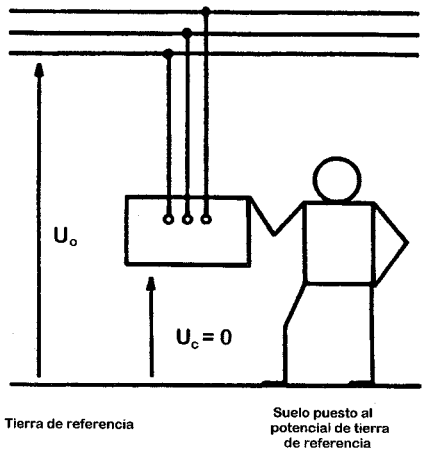


Figura 12. Situación sin defecto eléctrico

Si se produce un descenso del aislamiento entre un conductor activo y masa, esta masa puede adquirir un potencial peligroso Uo, respecto a tierra (figura 13).

Si se produce un defecto de aislamiento entre un conductor activo y una masa próxima a él, conectada a una toma de tierra de valor R_A, esta masa adquiere un potencial:

$$U_C = U_O \frac{R_A}{R_d + R_A} = U_O \frac{1}{\frac{Rd}{R_A} + 1} \qquad (2)$$

En esta expresión, la tensión Uo es un "dato invariable", Rd es la resistencia de aislamiento y R_A la resistencia de la toma de tierra de las masas de utilización. Para limitar el valor de la tensión de las masas con respecto a tierra podemos:

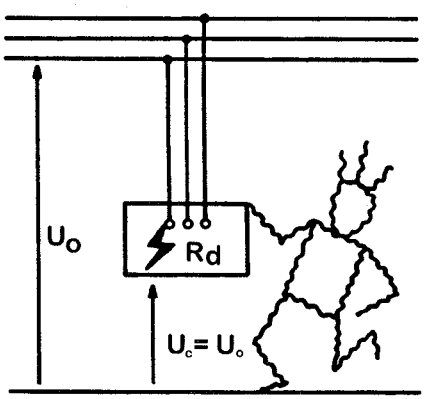


Figura 13. Situación con defecto eléctrico

a) Reducir la tensión de la red. Esto no es posible en la mayoría de los casos ya que, además, la sección de los conductores limita la elección de la tensión, para una potencia determinada.
b) Reducir el valor de R_A por la interconexión de diversas tomas de tierra existentes, las estructuras y todos los elementos metálicos de la construcción o edificio.
c) Aumentar Rd, es decir, conservar un nivel alto de aislamiento en la instalación. Si bien ello es ya difícil en una instalación nueva a veces es mucho más difícil en una instalación anticuada.

La norma UNE 20.460 presenta una clasificación detallada de diferentes locales, en función de múltiples parámetros, teniendo en cuenta las condiciones ambientales y de utilización (figura 14). Según el tipo de local, se definen tres valores de tensión de seguridad, que no deben rebasarse:

- Curva A2. Locales secos. Tensión máxima U_L=50V.
- Curva A3. Locales húmedos. Tensión máxima U_L=25V.
- Curva A4. Locales sumergidos. Tensión máxima U_L=12V.

Estas tensiones, consideradas como no peligrosas, provocan la circulación, por el organismo humano, de una corriente interior a 25 mA (posibilidad de fibrilación ventricular). Como la peligrosidad de la corriente eléctrica va directamente asociada al tiempo de circulación, se establecen tres curvas de seguridad que dan el tiempo máximo de paso de la corriente en función de la tensión de defecto.

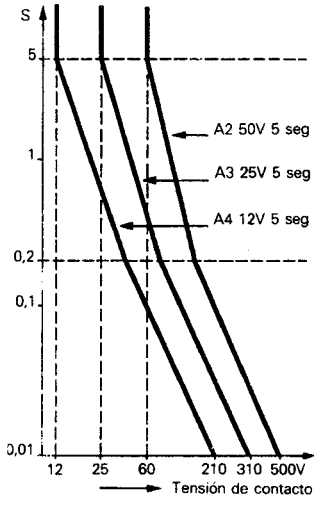


Figura 14. Curvas de seguridad para tensiones alternas.

En cualquier régimen de neutro, todo defecto susceptible de provocar una tensión de defecto superior a 12V, 25V ó 50V, según el tipo de local, deberá ser automáticamente eliminado por los dispositivos de protección en un tiempo inferior o igual al definido por las curvas de seguridad (figura 14).

Para las tensiones normales de uso de nuestras instalaciones eléctricas, la MIE BT 021 contempla dos clases de medidas de protección contra los contactos indirectos:

CLASE A: Medidas pasivas. Estas medidas consisten en tomar disposiciones destinadas a suprimir el riesgo mismo, haciendo que los contactos no sean peligrosos, o bien, impidiendo los contactos simultáneos entre la masa y elementos conductores, entre los cuales pueda aparecer una diferencia de potencial peligrosa. Los sistemas de protección de la clase A son:

- Separación de circuitos.
- Empleo de pequeñas tensiones.
- Separación entre las partes activas y las masas accesibles, por medio de aislamientos de protección.
- Inaccesibilidad simultánea de elementos conductores y masas.
- Recubrimiento de las masas con aislamientos de protección.
- Conexiones equipotenciales.

CLASE B: Medidas activas. Estas medidas consisten en la puesta a tierra directa o la puesta al neutro de las masas, asociándola a un dispositivo de corte automático que origine la desconexión de la instalación defectuosa. Los sistemas de protección de la clase B son:

- Puesta a tierra de las masas y dispositivos de corte por intensidad de defecto.
- Puesta a tierra de las masas y dispositivo de corte por tensión de defecto.
- Puesta a neutro de las masas y dispositivo de corte por intensidad de defecto.

Como bien señala la Instrucción MIE BT 021, la aplicación de los sistemas de protección de CLASE A, no es generalmente posible, sino de manera limitada y solamente para ciertos equipos, materiales o partes de una instalación.

- **CLASE A:**

1) **Separación de circuitos:** con este sistema se pretende anular todos los posibles caminos para la corriente en el caso de producirse un defecto en el circuito de utilización, para ello tendremos que hacer:

   - Separar la red de alimentación del circuito de utilización, mediante un transformador separador (separación galvánica).
   - Las masas del circuito de utilización no estarán unidas a tierra ni a las masas de aparatos conectados a otros circuitos.

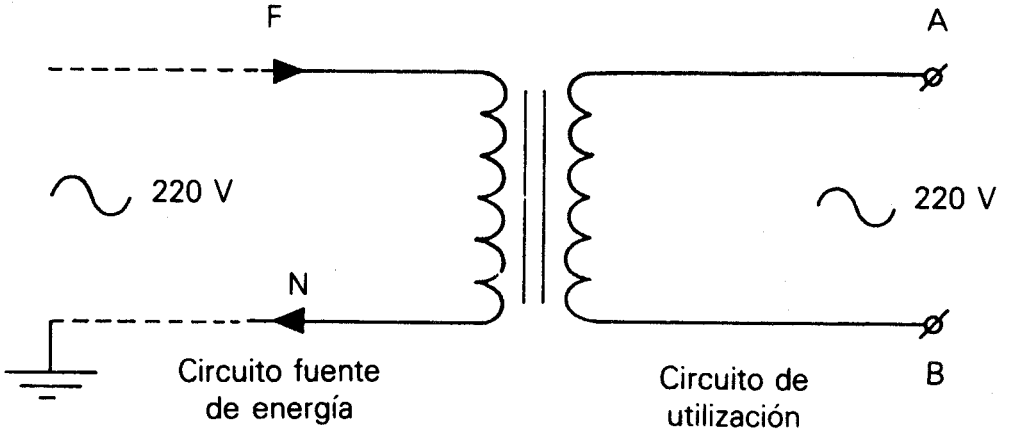


Figura 15. Transformador separador de circuitos.

2) **Empleo de pequeñas tensiones:** este sistema de protección consiste en la utilización de pequeñas tensiones de seguridad. Según MIE BT 021, estas tensiones serán de 24 V, valor eficaz, para locales o emplazamientos húmedos o mojados y 50 V en locales o emplazamientos secos. De esta forma se evitan tensiones de contacto peligrosas, considerándose inofensivas las tensiones existentes para las personas adultas. Se requiere además que:

   - La tensión de seguridad será suministrada por transformadores, generadores o fuentes autónomas de energía.
   - El circuito de utilización no estará puesto a tierra, ni en unión eléctrica con circuitos de tensión más elevada, bien sea directamente o por medio de conductores de protección.

3) **Separación entre las partes activas y las masas accesibles par medio de aislamientos de protección:** este sistema de protección consiste en el empleo de materiales que dispongan de aislamiento de protección o reforzado entre sus partes activas y sus masas accesibles.

4) **Inaccesibilidad simultánea de elementos conductores y masas:** este sistema consiste en disponer las masas y los elementos conductores de tal manera que no sea posible, en circunstancias habituales, tocar simultáneamente e involuntariamente una masa y un elemento conductor.

5) **Recubrimiento de masas con aislamiento de protección:** este sistema se basa en recubrir las masas con un aislamiento equivalente a un aislamiento de protección. El empleo de esta medida dispensa de tomar otras contra los contactos indirectos.

6) **Conexiones equipotenciales:** consiste en unir todas las masas de la instalación a proteger entre sí y a los elementos conductores no activos, para evitar que puedan aparecer tensiones peligrosas entre ellos. En esta medida se puede también conectar la superficie equipotencial a tierra, evitando así las posibles diferencias de tensión entre masas y tierra. Esta protección está indicada para emplazamientos mojados asociada con uno de los sistemas de protección CLASE B.

- **CLASE B**:

1) **Puesta a tierra de las masa y dispositivo de corte por intensidad de defecto:** este sistema deberá impedir la permanencia de una tensión de contacto demasiado elevada en una pieza conductora (masa) que no forma parte del circuito activo, desconectando la instalación defectuosa. Para comprender mejor como se limita la tensión de contacto en una masa, en este tipo de protección, recuérdese lo señalado por la MIE BT 008 - Esquemas de Distribución.

   a) *La alimentación tiene el neutro unido directamente a tierra.* Las masas de la instalación receptora están conectadas a una toma de tierra separada de la toma de tierra de la alimentación. (En este esquema, las intensidades de defecto fase-masa o fase-tierra, pueden tener valores inferiores a los de cortocircuito, pero puede ser suficientes para provocar la aparición de tensiones peligrosas). En este tipo de instalaciones el sistema de protección debe cumplir las siguientes condiciones según MIE BT 021:

      - La corriente a tierra producida por un sólo defecto rígido (impedancia nula), debe hacer actuar el dispositivo de corte en un tiempo no superior a 5 segundos.
      - Una masa cualquiera no puede permanecer con relación a una toma de tierra eléctricamente distinta, a un potencial superior, en valor eficaz, a:

         - 24 V en locales o emplazamientos conductores (mojados, húmedos, etc.)
         - 50 V en los demás casos.

      - Todas las masas de una misma instalación deben estar unidas a la misma toma de tierra.

b) *Instalaciones con el punto neutro aislado de tierra* unido a ella por medio de una impedancia que limite la corriente de defecto. En este esquema de distribución la intensidad resultante de un primer defecto fase-masa o fase-tierra, tiene un valor lo suficientemente reducido para no provocar la aparición de tensiones de contacto peligrosas. Debido precisamente a la ausencia de conexión del neutro a tierra en la alimentación o bien, por la inserción de una impedancia, es necesario limitar la extensión de la instalación para disminuir el efecto capacitivo de los cables respecto a tierra. En este tipo esquema, se recomienda no distribuir el neutro. Para este tipo de instalación, el sistema de protección debe cumplir lo siguiente:

- Se cumplirán las tres condiciones fijadas en a) (neutro unido directamente a tierra), si bien puede admitirse que la primera condición no se cumpla, siempre y cuando se cumplan las siguientes:

    - Un dispositivo de control debe señalar automáticamente la aparición de un sólo defecto de aislamiento en la instalación.
    - En caso de dos defectos de aislamiento simultáneos que afectan a fases distintas o a una fase y neutro, la separación de la instalación donde se presenten estos defectos ha de estar asegurada por un dispositivo de corte automático.
    - En las instalaciones en que el punto neutro de la red de alimentación esté directamente unido a tierra, pueden utilizarse como dispositivos de corte automático sensibles a la corrientede defecto, los interruptores de máxima y los cortocircuitos fusibles, siempre y cuando sus características intensidad-tiempo produzcan la apertura del circuito, antes de que puedan excederse las condiciones señaladas en a). Esta condición exige que la impedancia de cierre de defecto tenga un valor extraordinariamente bajo, y en general es difícil de conseguir. No obstante pueden utilizarse como dispositivos de corte automático sensibles a la corriente de defecto, los interruptores diferenciales. Estos son los que normalmente se utilizan en la práctica.

2) **Puesta a tierra de las masas y dispositivos de corte por tensión de defecto:** este sistema de protección contra contactos indirectos, tiene por objeto impedir la permanencia de una tensión de contacto demasiado alta en una masa, normalmente aislada de las partes activas, mediante la desconexión de la instalación cuando la tensión respecto de tierra de dicha masa supera 24 V (locales húmedos), 50 V (locales secos). Este sistema está formado por los siguientes elementos, según MIE BT 021:

    - Interruptor de protección con bobina de tensión. Cuando la tensión de una masa supera una tensión determinada (24, 50 V), el interruptor abre el circuito.
    - Conductor de protección.
    - Conductor de tierra auxiliar.

La aplicación de este sistema de protección no exige que las masas de una instalación deban estar unidas eléctricamente a tierra, requiere que se cumplan las condiciones siguientes:

- Apertura del circuito en un tiempo inferior a 5 s.
- Las tensiones de contacto serán inferiores a:
  - 24 V en locales mojados, húmedos.
  - 50 V en locales o emplazamientos secos.
- La toma de tierra auxiliar será eléctricamente distinta a cualquier otra toma de tierra.

Este método no es muy empleado en la práctica, debido al éxito de la protección diferencial.

3) **Puesta a neutro de las masas y dispositivo de corte por intensidad de defecto:** consiste este sistema de protección, según MIE BT 021, en unir las masas de la instalación al conductor neutro, de tal forma que los defectos rígidos de aislamiento se transformen en cortocircuitos fase y neutro, provocando el funcionamiento del dispositivo de protección de sobreintensidades y, en consecuencia, la desconexión de la instalación defectuosa. Este sistema exige que la resistencia global de tierra del neutro no sea superior a 2 Ω, para evitar la aparición de grandes tensiones masa-tierra, debido a las grandes intensidades de defecto que aparecen. Esto hace también que el riesgo de incendio sea mayor. Los dispositivos de corte utilizados serán, interruptores automáticos y fusibles, siempre que abran antes de 5 s. No obstante MIE BT 021 recomienda asociar a este sistema, la protección diferencial de alta sensibilidad, estableciendo la conexión del conductor neutro con el de protección, detrás del interruptor diferencial.

4.- PROTECCIÓN DIFERENCIAL.

Según hemos visto en el análisis de protección contra contactos indirectos CLASE B, la protección denominada diferencial, representa un papel importante, hasta el punto que es la más utilizada en la práctica (el sistema más empleado en la actualidad es la puesta a tierra de las masas y dispositivo de corte por intensidad de defecto [protección diferencial]).

En una instalación eléctrica, en cualquier instante, la suma vectorial de las intensidades en los conductores de alimentación es siempre "cero" (figura 16).

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 = 0 \qquad (3)$$

Si se produce un defecto a tierra esto deja de cumplirse y se tiene:

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 = \vec{I}_T \qquad (4)$$

El mismo planteamiento puede hacerse para una instalación trifásica, con conductor neutro o sin él.

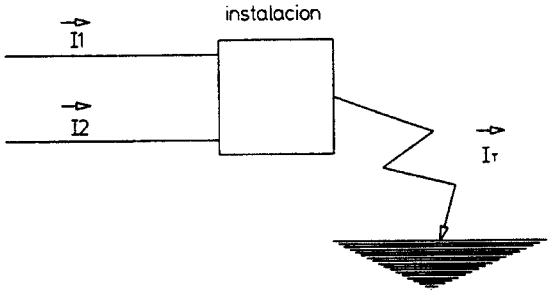


Figura 16. Instalación eléctrica con defecto

La parte de la protección sensible a la corriente diferencial, está formada por un toroide de material ferromagnético, atravesado por los conductores que alimentan la instalación (excluido el conductor de protección o tierra) figura 17.

En caso de no existir defecto, aplicando (3) $I_1=I_2$; ó $\Phi_1=\Phi_2$ y siendo el flujo resultante nulo. Cuando se produce un defecto a tierra, aplicando (4) $\Phi_1<>\Phi_2$ apareciendo un flujo resultante. Al aparecer el flujo como consecuencia del defecto se induce en la bobina "A", una fuerza electromotriz (ley de Faraday) la cual se emplea en alimentar el mecanismo de disparo, que abre o desconecta la instalación eléctrica defectuosa.

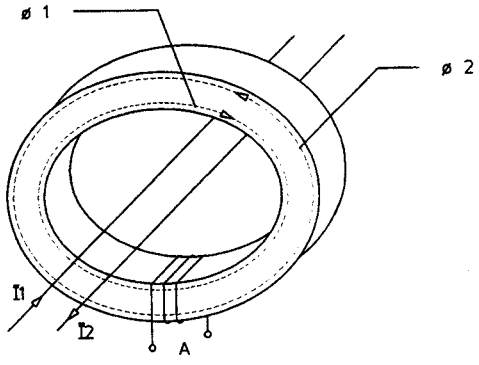


Figura 17. Toroide de detección de corrientes de fuga.

La norma de construcción de estos dispositivos prevé una tolerancia constructiva y funcional con los dos límites:

- Si Id > IΔn se produce siempre desconexión.
- Si Id < IΔn/2 no se produce nunca desconexión.

siendo:

Id: intensidad de defecto;
IΔn: sensibilidad del interruptor diferencial.

El margen pues, se sitúa entre estos dos valores (figura 18).

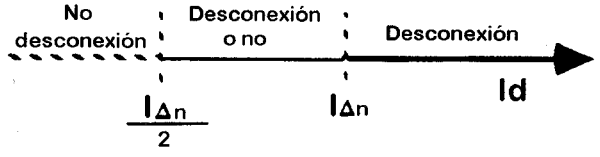


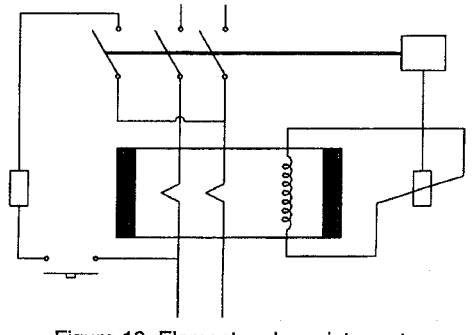
Figura 18. Umbrales de actuación de un interruptor diferencial

Comercialmente, la protección diferencial la podemos encontrar como interruptor diferencial para pequeñas instalaciones (receptores) o el conjunto formado por relé y transformador diferencial e interruptor automático.

4.1.- Interruptor diferencial.

Tal y como se describe en MIE BT 021, es un bloque compacto que provoca la apertura automática de la instalación cuando la suma vectorial de las intensidades que atraviesan los polos del aparato alcanza un valor predeterminado. Un esquema de los elementos que lo componen se presenta en la figura 19.

- Transformador diferencial de intensidad.
- Relé que actúa sobre el mecanismo de retención de los contactos abriendo el circuito cuando se detecta una corriente de fuga.


Figura 19. Elementos de un interruptor diferencial

- Mecanismo de retención de los contactos móviles.
- Contactos móviles.
- Circuito de prueba, cuando P se cierra estando conectado el interruptor, aparecerá una intensidad en el relé diferencial que hará abrir el circuito.

Las características fundamentales de estos interruptores son:

* I_N: Intensidad nominal del interruptor diferencial, es el valor máximo que pueden soportar los contactos principales; los valores más usuales son 25, 40 y 63 A, aunque pueden llegar a valores más elevados.
  Se presentan normalmente los interruptores diferenciales con 2 polos (bipolares) y 4 (tetrapolares). El poder de corte de los interruptores diferenciales es bastante reducido, y es función de la intensidad nominal; los valores usuales están entre 2 y 4 kA. Así mismo, el interruptor diferencial no detecta sobreintensidades (sobrecargas o cortocircuitos), sólo detecta corrientes diferenciales, por lo que el interruptor diferencial, como la instalación, deberá protegerse a sobreintensidades mediante fusibles o interruptores automáticos.
* **IΔn:** Sensibilidad del interruptor diferencial, es el valor mínimo de la corriente de defecto, a partir de la cual, el interruptor diferencial debe abrir automáticamente, en un tiempo conveniente, la instalación a proteger; determina la sensibilidad de funcionamiento del aparato. Dicha sensibilidad puede ser alta (menor o igual a 30 mA) o baja (superior a 30 mA, normalmente se utiliza 300 mA).

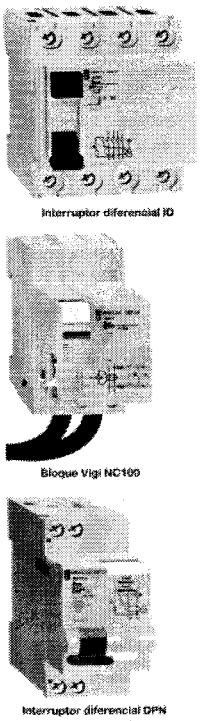


Figura 20. Interruptor diferencial comercial.

4.2.- Relé y transformador diferencial e interruptor automático.

La protección diferencial puede ser un interruptor diferencial que se fabrica con intensidades nominales de 16, 25, 32, 40 y 63 A, o un relé diferencial asociado a un núcleo toroidal, que se emplean cuando las intensidades del circuito a proteger son mayores que las indicadas. En este último caso (figura 21), el relé diferencial (1), en función de la intensidad diferencial medida por el núcleo toroidal (2), da la orden de apertura a un interruptor automático (3), que generalmente, tiene también la protección contra sobrecargas y cortacircuitos (4), y dispone de un disparador shunt o bobina de disparo a emisión que es la que recibe la orden del relé diferencial.

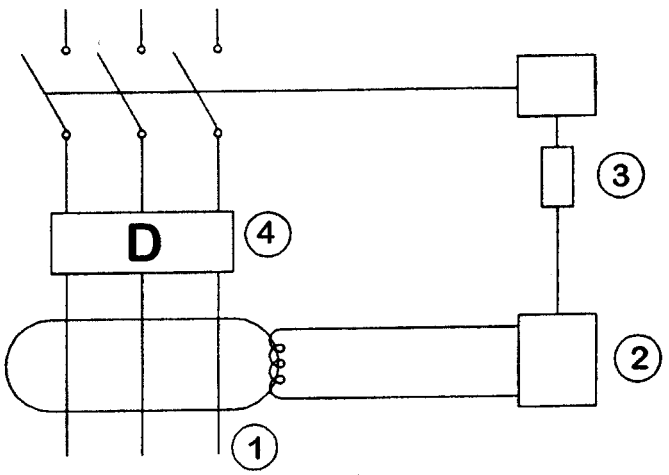


Figura 21. Interruptor automático y diferencial asociado.

Los núcleos toroidales se fabrican de forma circular o rectangular. La forma circular se utiliza para el paso de cables, y se fabrican con diámetros interiores de 35, 70, 105, 140 y 210 mm. La forma rectangular se utiliza para el paso de pletinas conductoras y se fabrican con unas dimensiones interiores de 70 x 175, 115 x 305 y 150 x 350 mm.

4.3.- Utilidades de la protección diferencial.

4.3.1.- Protección contra contactos directos.

La protección diferencial de alta sensibilidad puede proteger a las personas, no sólo a contactos indirectos, sino también directos.

Si en una instalación de 220 V de tensión nominal, una persona, con una resistencia media de 2000 Ω, toca una parte en tensión, se cierra a través de ella una corriente de tierra de 220/2000 = 0,11 A, 110 mA. Dicha corriente tan pequeña es imperceptible para las protecciones de sobreintensidades, pero puede ser mortal para una persona. El interruptor diferencial de alta sensibilidad abre el circuito apenas la corriente de defecto llegue a 30 mA (figura 22).

4.3.2.- Protección contra incendios.

Los interruptores diferenciales de alta sensibilidad, aportan una protección muy eficaz contra incendios, al limitar a potencias muy baja las eventuales fugas de energía eléctrica por defecto de aislamiento. En una instalación con protección diferencial a 220 V, la máxima potencia disipada, en un defecto a tierra será:

$$Pd = 220 \times 0{,}03 = 6{,}6\ W \qquad (5)$$

Valor insignificante, con lo que se descarta la posibilidad de incendio.

4.3.3.- Protección contra contactos indirectos.

La protección contra contactos indirectos que más ventajas ofrece y que más se utiliza en la práctica, es la puesta a tierra de las masas y como dispositivo de corte el interruptor diferencial. Las ventajas de la protección diferencial quedan de manifiesto, si analizamos las condiciones que se exigen, en la protección contra contactos indirectos:

- Tiempo de desconexión de la instalación defectuosa, menor o igual a 5s.
- Tensión de contacto masa-tierra inferior a 24 V (locales mojados-húmedos) y 50V (locales o emplazamientos secos).

La corriente que provocaría el disparo inferior a 5 s en un fusible o interruptor automático es del orden de 5 veces la intensidad nominal. Una instalación con un interruptor general de 15 A (3.300 W), para cumplir la condición b), se necesitaría una resistencia de tierra de:

$$Rt = \frac{U}{Id} = \frac{50}{5*15} = 0{,}67\Omega \qquad (6)$$

Resistencia prácticamente inalcanzable y económicamente irrealizable.

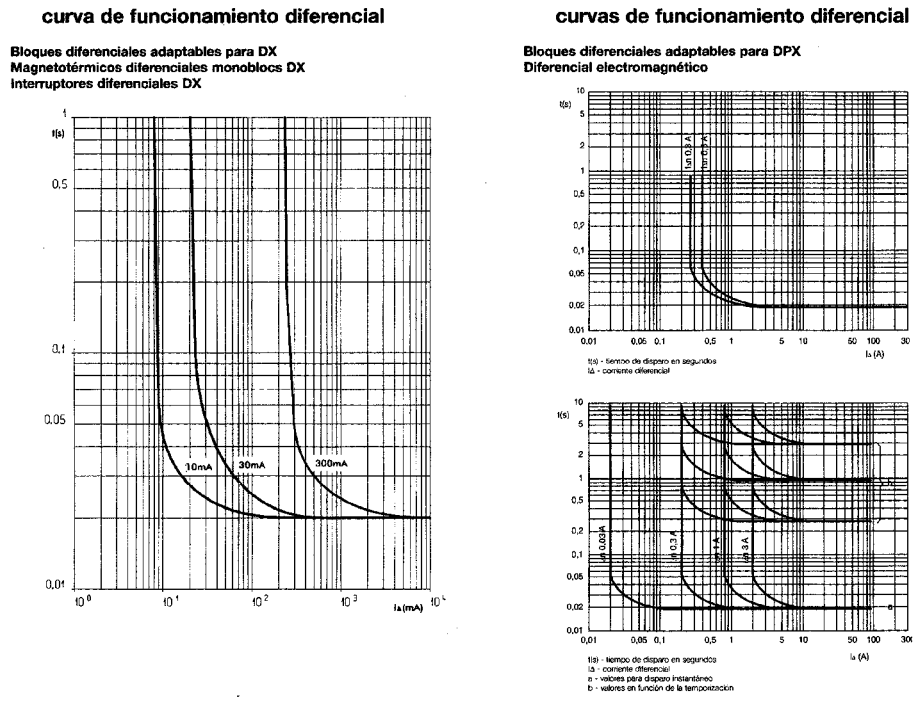


Figura 22. Actuación del interruptor diferencial

En cambio utilizando un interruptor diferencial, se tendrá, según la sensibilidad, los siguientes valores de la resistencia de tierra (Rt), para tener tensiones de contacto inferiores a 50 V.

Sensibilidad (IΔn) [A]	Rt [Ω]
0,03	1666
0,3	166

Tabla 3. Resistencia del electrodo de tierra (curva 50V) en función de la sensibilidad de la protección diferencial.

Estos valores serán más fáciles de conseguir y la instalación será desconectada nada más llegar la intensidad de defecto al valor de la sensibilidad en mA.

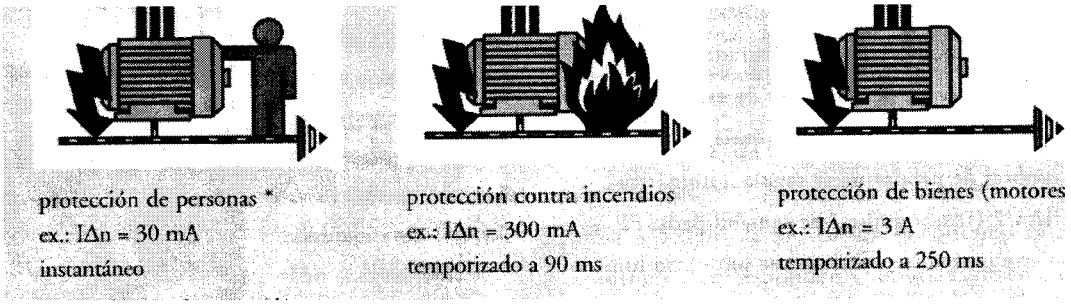


Figura 23. Ejemplos de aplicación de la protección diferencial.

TEMA 7. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INSTALACIONES SELECTIVAS EN LA PROTECCIÓN DE PERSONAS

1.- INTRODUCCIÓN.

La aplicación de reglamentos y normas en las instalaciones de baja tensión para la protección ante contactos indirectos es diferente según sea el régimen de neutro de las mismas. Es, pues, indispensable examinar y estudiar por separado los tres regímenes de neutro existentes:

- Neutro a tierra (TT).
- Puesta al neutro (TN).
- Neutro aislado (IT).

Las reglas de selectividad ante contactos indirectos de la instalación serán distintas atendiendo al régimen de neutro que se adopte. El Reglamento Electrotécnico Baja Tensión MIE BT 008 y la norma UNE 20.460 regulan las condiciones de los regímenes de neutro.

2.- REDES CON EL NEUTRO CONECTADO DIRECTAMENTE A TIERRA (TT).

2.1.- Estudio de un defecto de aislamiento.

En el caso de que todas las masas de utilización y el neutro de la instalación estén conectadas a unas tomas de tierra independientes (figura 1).

Si un defecto de aislamiento (figura 2) pone la masa de un receptor en contacto con un conductor de fase, la corriente de defecto Id circula por la fase 1 de la red y retorna por el neutro por medio de las tomas de tierra R_A y R_B. No se puede determinar con precisión la impedancia del bucle que se forma. Supondremos, con poco riesgo de error, que es totalmente resistencia, despreciando la reactancia de los cables.

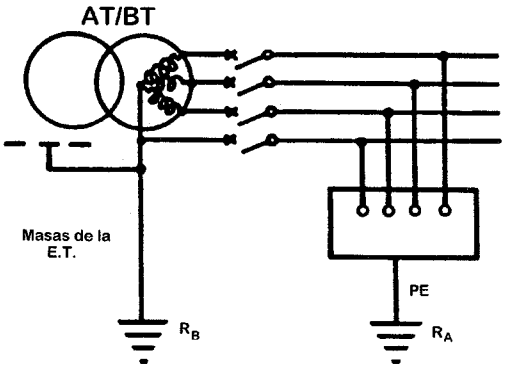


Figura 1. Esquema TT con tomas de tierra independientes

$$Id = \frac{Uo}{R_A + R_B + Rd + Zs} \qquad (1)$$

siendo:

Uo:	Tensión simple.
Zs:	Impedancia del bucle (conductor).
Rd:	Resistencia de aislamiento.

Si una persona entra en contacto con la masa en defecto, se verá sometida a un potencial de defecto Uc respecto a tierra o potencial de referencia.

Consideremos el caso más desfavorable, es decir, cuando accidentalmente la persona se halla al potencial de tierra por contacto directo con una canalización metálica de agua, por ejemplo. Esta persona establece un circuito paralelo con R_A y no es un error grave considerar que toda la corriente circulará por R_A, o sea, que:

$$Uc = R_A * Id$$

$$Uc = \frac{Uo * R_A}{R_A + R_B + Rd + Zs} \qquad (2)$$

Si el defecto de aislamiento se produce en un extremo de arrollamiento y Rd = 0, la tensión de defecto será máxima. Se trata del caso más desfavorable.

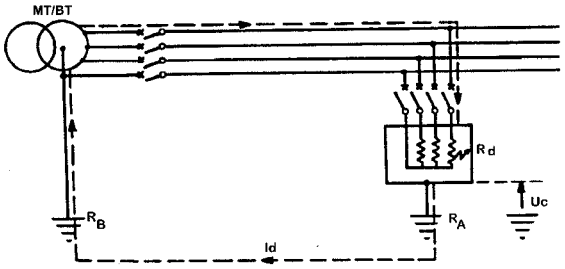


Figura 2. Esquema TT. Defecto de aislamiento.

- ***Por ejemplo, si:***

R_B: 3Ω; R_A: 5Ω; Uo = 220 V y despreciamos Zs.
Ucmax = 137, 5 V

Se comprueba, por este ejemplo, que la tensión de defecto puede ser peligrosa para las personas y obligatoria la **desconexión al primer defecto**.

Ante un defecto rígido se han de verificar dos puntos:

- El dispositivo encargado de eliminar la corriente de defecto debe actuar para este valor de la corriente en un tiempo inferior a 5 s.
- El dispositivo debe desconectar en un tiempo compatible con la curva de seguridad de protección de personas del local analizado.

El circuito con el defecto también está protegido contra las sobreintensidades por un aparato adecuado (fusible o interruptor automático). Este aparato ve pasar la corriente del circuito de las cargas y la corriente Id por una de sus fases. El orden de magnitud de Id la sitúa en el dominio de las sobrecargas. Así, para el interruptor automático que debe dar la orden de desconexión por efecto térmico, la dará en un tiempo largo (orden de magnitud: varios segundos). Y el tiempo máximo permitido es de 120 ms (según curva de U_L = 50 V) para una tensión de contacto máxima de 137,5 V (figura 3). Por ello, no podemos contar con la protección contra las sobrecargas para la protección de personas en este esquema de conexión a tierra.

Hemos de instalar un dispositivo que el sistema de disparo sea sensible a las corrientes de defecto del orden de 220/8 = 27.5 A y actúe en tiempos muy cortos. Este dispositivo será un interruptor diferencial (DF).

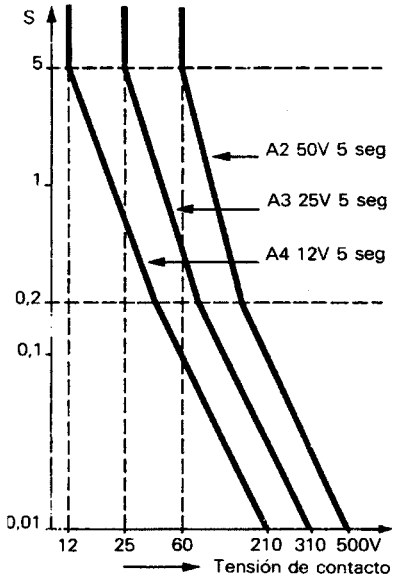


Figura 3. Curvas de seguridad tensión-tiempo para las personas y corriente alterna.

2.2.- Sensibilidad de los dispositivos de protección en el esquema TT para asegurar la protección en contactos indirectos.

En caso de defecto de aislamiento (figura 4), aparece una tensión de defecto en las masas:

$$Uc = Id * R_A \qquad (3)$$

A partir del momento que Uc supera el valor de la tensión límite convencional U_L (umbral de la tensión peligrosa) debe darse la orden de desconexión. Este valor corresponde a una intensidad:

$$Id = \frac{U_L}{R_A} \qquad (4)$$

El umbral del interruptor diferencial podrá ajustarse en:

$$I_{\Delta}n \leq \frac{U_L}{R_A} \qquad (5)$$

Es conveniente indicar que este umbral es independiente del valor de la resistencia de la toma de tierra (R_B). Es importante precisar que un abonado baja tensión debe cuidar sólo la toma de tierra de las masas de su instalación.

Un punto fundamental es el tiempo de funcionamiento del aparato que haga compatible la seguridad de personas atendiendo a la curva de seguridad. Para ello hay que conocer que las normas (UNE 20.119) definen cuatro clases de aparatos de protección de corriente diferencial-residual en función de su tiempo de corte. Los tiempos indicados son los tiempos totales de apertura (tiempo de sensibilización del relé + tiempo de extinción del arco en la cámara de ruptura). En general, cuanto mayor sea la corriente de defecto detectada por el relé, tanto menor será el tiempo de apertura (tabla 1).

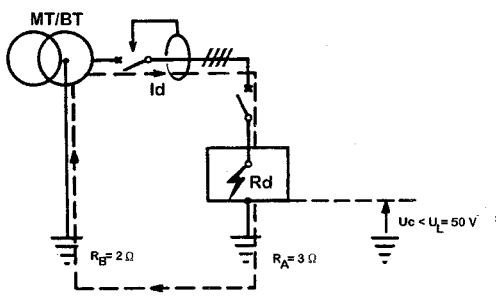


Figura 4. Defecto de aislamiento.

UNE 20.119	Tiempo de apertura [ms]		
Clase	IΔn	2IΔn	10IΔn
T01	1.000	150	30
T02	200	100	30
T1	1.000	250	150
T2	200	100	100

Tabla 1. Tiempos de apertura de dispositivos diferenciales.

- Estos valores de tiempo no tienen en cuenta como es lógico los retardos que eventualmente pueden ajustarse en algunos aparatos.
- Los dispositivos diferenciales de alta sensibilidad $I\Delta n \leq 30$ mA deben ser obligatoriamente de una de las clases T0.
- En caso de defecto de aislamiento en un receptor, la corriente de fuga, en la mayoría de los casos, es superior a 300 mA, es decir, más de diez veces 30 ms. Con ello y cumpliéndose las normas, hay que considerar que un diferencial de alta sensibilidad elimina estas intensidades de defecto en menos de 30 ms.

- ***Ejemplo:***

Consideremos un local cuyas condiciones ambientales exigen un límite de seguridad masa-tierra, según norma, de 50 V y con un electrodo de tierra en el centro de transformación y edificio de 2 Ω. Para la protección de personas, caso de un defecto (figura 5) debemos de instalar un dispositivo de protección de corriente diferencial-residual con una sensibilidad de:

$$I_{\Delta n} = \frac{U_L}{R_A} = \frac{50}{2} = 25\ A \qquad (6)$$

Instalamos, por ejemplo un interruptor diferencial de clase T2 y de sensibilidad I n= 1 A. La corriente que circula por el interruptor diferencial en caso de defecto rígido despreciando Zs es:

$$Id = \frac{Uo}{R_A + R_B} = \frac{220}{2+2} = 55\ A \qquad (7)$$

que es muy superior al doble de I n y por tanto el tiempo total de desconexión es como máximo de 100 ms. El potencial de contacto permitido (figura 6) por la curva de seguridad $U_L = 50$ V durante 100 ms es de 160 V. La corriente de defecto nos provocará una tensión de defecto de:

$$Uc = R_A * Id = 2 \times 55 = 110\ V < 160\ V \qquad (8)$$

La protección de personas está asegurada, ya que se ha cumplido con los dos imperativos requeridos: sensibilidad y tiempo de desconexión.

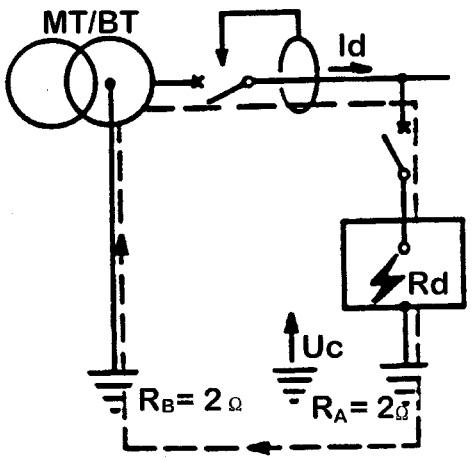


Figura 5. Defecto de aislamiento.

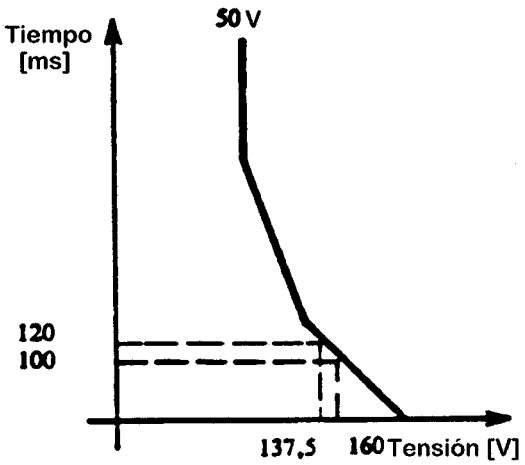


Figura 6. Curva de seguridad.

2.3.- Situación de los dispositivos de protección en el esquema TT.

- **1er caso. Todas las masas de utilización están interconectadas a una misma toma de tierra R_A (figura 7):**

Cualquiera que sea la derivación con defecto, la corriente de defecto Id pasará por R_A y R_B. Si el interruptor diferencial se halla situado en la cabecera de la instalación, será recorrido por la corriente de defecto. En este caso, un sólo interruptor diferencial en la cabecera de la instalación es la mínima protección exigida por las normas.

Si precisamos de una cierta continuidad de servicio podemos instalar un interruptor diferencial sobre cada derivación con un estudio de selectividad.

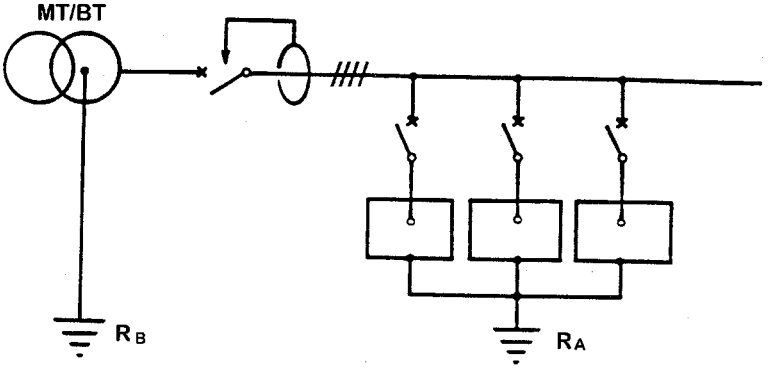


Figura 7. Localización de los interruptores diferenciales en la instalación eléctrica

- *Casos particulares:* sin interruptores diferenciales en cabecera.

Es posible entrar en una excepción de lo anterior, si:

- Las derivaciones principales están en un mismo cuadro o en cuadros contiguos (figura 8).
- La conexión entre el interruptor diferencial de cabecera y las derivaciones principales son de clase II, por ejemplo en conducción o tubo aislante (figura 9).

En los dos casos está permitida la exclusión del interruptor diferencial en cabecera con la condición de instalar un interruptor diferencial en cada derivación.

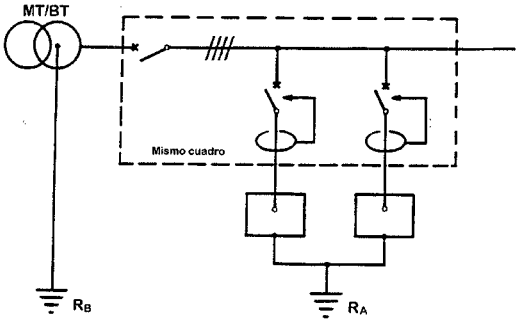


Figura 8. Interruptores diferenciales en un mismo cuadro

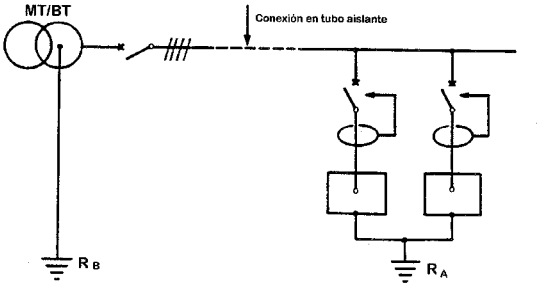


Figura 9. Conexión entre cabecera y derivación de clase II.

- **2° caso. Todas las masas de utilización no están interconectadas a una misma toma de tierra R_A.**

  - *Caso de derivaciones alejadas (figura 10):*

En principio parece suficiente situar un diferencial en el interruptor automático de cabecera, calibrado en función de la toma de tierra R_{A1} ó R_{A2}, la más elevada en valor y calcular:

$$I_{\Delta n} = \frac{U_L}{valor\ maxino\ de\ R_{A_i}} \qquad (9)$$

En estas condiciones, supongamos sobre la derivación número 2 un defecto de aislamiento entre el conductor neutro y la masa. No aparece corriente de defecto con lo que el interruptor diferencial de cabecera no está sensibilizado para detectar el defecto. Este defecto puede persistir en la instalación durante un tiempo indefinido.

Supongamos que aparece sobre la derivación número 1 un defecto de aislamiento entre una fase y la masa. La corriente de defecto i_1 se divide en i_2 que retorna al neutro a través del electrodo de tierra R_{A2} e i_3 que retorna al neutro a través del electrodo de tierra R_B. El interruptor diferencial de cabecera verá solamente el valor de $i_3 = (i_1 - i_2)$ que puede ser insuficiente para provocar su disparo, a pesar de que i_1 puede provocar una tensión de defecto:

$$Uc = R_A i_1 > U_L \qquad (10)$$

y por tanto peligrosa. Para obtener una protección correcta es necesario, en este caso, instalar un interruptor diferencial en cada derivación y otro en la cabecera de la línea.

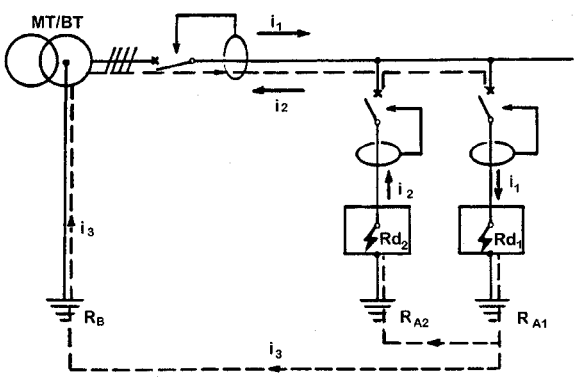


Figura 10. Defecto con electrodos de tierras separados en las masas de los receptores.

  - *Casos particulares.*

Como el caso precedente es posible ver que existen las mismas excepciones respecto a la selectividad horizontal (mismo armario o conexión de clase II).

2.4.- Selectividad entre los dispositivos de protección en el esquema TT.

En caso de un defecto sobre una fase (figura 11), los dos interruptores diferenciales A y B estarán recorridos por una misma corriente de defecto. Es necesario tener una selectividad entre estos dos aparatos para garantizar una mejor continuidad de servicio.

La selectividad entre los dos aparatos será total para toda corriente de defecto producida aguas abajo de interruptor diferencial B si solamente desconecta elinterruptor diferencial B. Se deduce inmediatamente que es necesario regular la sensibilidad de no-funcionamiento

del interruptor diferencial A ($I\Delta n_A/2$) al menos igual a la sensibilidad de funcionamiento del interruptor diferencial B ($I\Delta n_B$), ver figura 13.

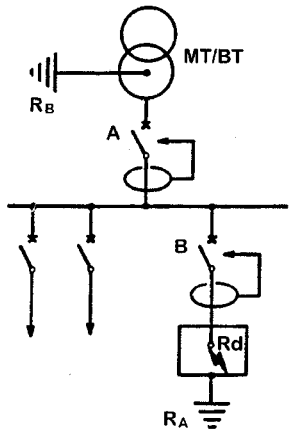


Figura 11. Selectividad de los interruptores diferenciales.

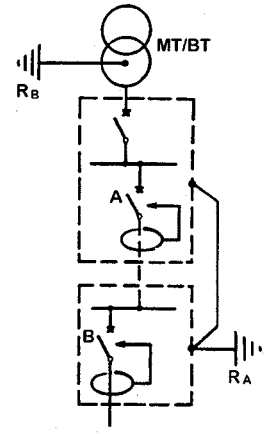


Figura 12. Selectividad de los interruptores diferenciales.

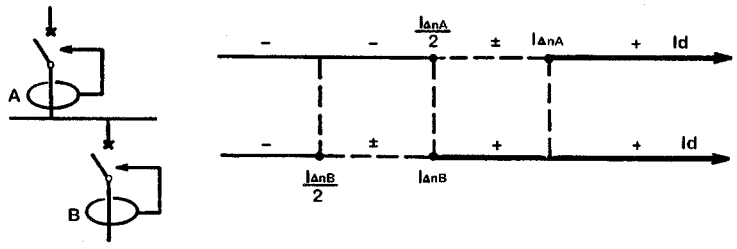


Figura 13. Sensibilidades de actuación de los interruptores diferenciales A y B.

Ante un defecto como el señalado se pueden producir varios casos, según el valor real de la corriente de defecto:

- *Idefecto* < $I\Delta n_B/2$

  En este caso la corriente de defecto es inferior a las sensibilidades de ambos interruptores diferenciales luego, ninguno de los dos desconecta, ya que lógicamente el defecto no es peligroso.

- $I\Delta n_A/2 \geq$ *Idefecto* $\geq I\Delta n_B/2$

  La sensibilidad a la desconexión del interruptor diferencial B es posiblemente alcanzada, pero no la del interruptor diferencial A. Desconectará el interruptor diferencial B pero no A. Luego, para este valor de corriente de defecto, hay selectividad.

- *Idefecto* $\geq I\Delta n_A/2$

  La sensibilidad del interruptor diferencial B se ha rebasado y también puede rebasarse la del interruptor diferencial A. En tal caso, desconectarían ambos aparatos. Luego, la selectividad está limitada a un valor de $I\Delta n_A/2$.

Se ha obtenido una selectividad amperimétrica parcial. Para obtener la selectividad en todos los casos, hemos de retardar el funcionamiento del interruptor diferencial A. Se tratará de un caso de selectividad cronométrica. El tiempo de no-funcionamiento del interruptor diferencial A deberá ser superior al tiempo total de ruptura del interruptor diferencial B.

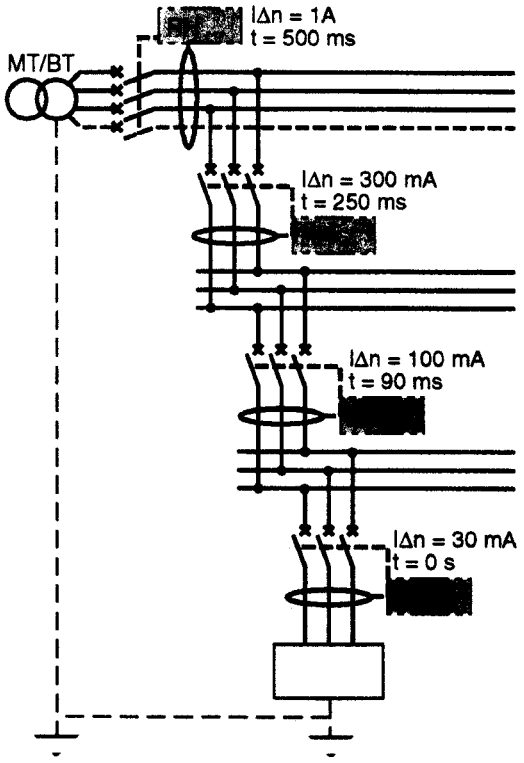


Figura 14. Esquema de selectividad de la protección interruptor diferencial.

3.- REDES CON PUESTA AL NEUTRO (TNC Ó TNS).

En el régimen TN, el neutro se pone a tierra y las masas están unidas directamente al neutro por un conductor de protección. En el caso general, el conductor de protección PE y el conductor de neutro, están confundidos en uno solo, denominado PEN, y el esquema se llama de cuatro hilos o TNC (conductor de protección y conductor de neutro Comunes)

Hay que llamar la atención que con este sistema, si accidentalmente se corta el conductor PEN, todas las masas situadas aguas abajo del punto de corte, estarán al potencial equivalente a la tensión simple cuando se conecte un receptor monofásico a la red (figura 15).

El riesgo que ocurra lo descrito anteriormente es inaceptable y cuando los conductores son de secciones débiles (inferiores a 10 mm^2 en cobre y a 16 mm^2 en aluminio) y, por tanto, mecánicamente frágiles las normas exigen separar el neutro del PE con lo que el sistema pasa de cuatro a cinco hilos o TNS (conductor de protección y conductor de neutro Separados) (figura 16).

3.1.- Estudio de un defecto de aislamiento.

Cuando se produce un defecto de aislamiento entre fase y masa, el retorno de la corriente de defecto al punto neutro del transformador o generador se produce a través del PEN (figura 17) o del PE.

Vemos pues que un defecto de aislamiento fase-masa se convierte en un defecto fase-neutro. La corriente que se produce, debido a este defecto, es muy importante ya que sólo está limitada por las impedancias de los cables y del transformador o generador.

Los dispositivos de protección contra las sobreintensidades (interruptores automáticos o fusibles) deberán ser capaces de eliminar estas sobreintensidades. La dificultad consiste en verificar que los dispositivos instalados separan los circuitos que protegen en un tiempo inferior al definido por la curva de seguridad.

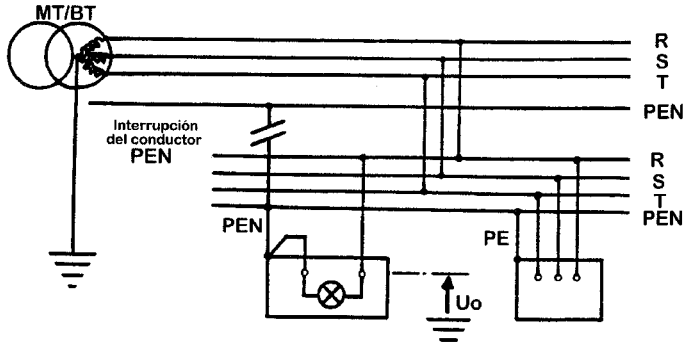


Figura 15. Esquema de conexión TN-C.

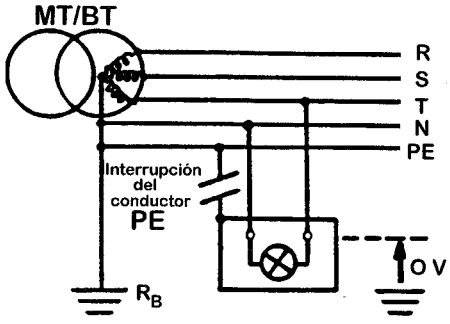


Figura 16. Esquema de conexión TN-S.

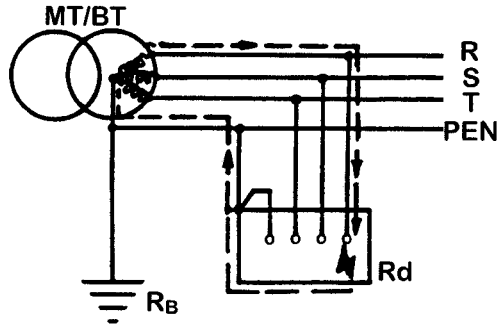


Figura 17. Esquema de conexión TN.

3.2.- Protección asegurada por los dispositivos de protección contra las sobreintensidades (interruptor automático o fusible).

Consideremos un defecto de aislamiento Rd (figura 18). Si Zs es la impedancia del circuito de defecto (OABCDEO), la corriente de defecto (Id) valdrá:

$$Id = \frac{Uo}{Zs + Rd} \qquad (11)$$

siendo:

Uo: Tensión simple.
Rd: Pérdida de aislamiento.
Zs: Impedancia del bucle de defecto.

Considerando un defecto rígido (Rd=0) debido a la corriente Id, la masa toma un potencial Uc. Supongamos, por ejemplo, que esta tensión sea de 110 V.

El tiempo total de desconexión del dispositivo de protección deberá ser, como máximo, de 200 ms para locales con $U_L = 50$ V (ver la curva de seguridad de la figura 19).

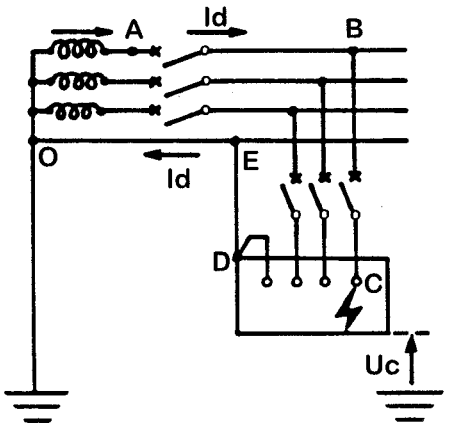


Figura 18. Bucle para un defecto de aislamiento en un sistema TN.

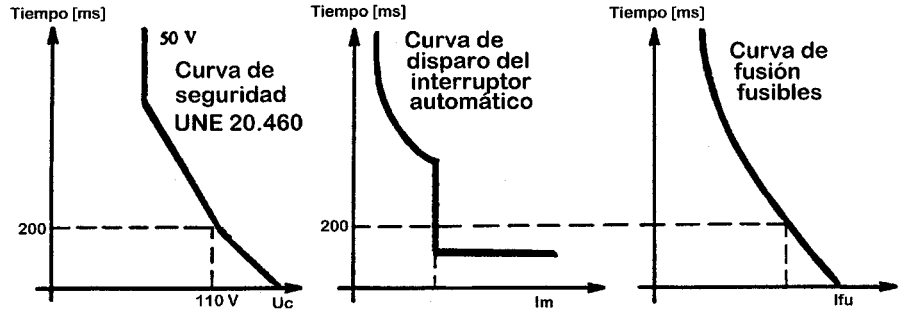


Figura 19. Curvas de seguridad.

Para que la desconexión sea efectiva en menos de 200 ms, deben cumplirse las condiciones:

- Id ≥ Im (caso interruptor automático).
- Id ≥ Ifu (caso de fusible).

Es decir, que la impedancia Zs del circuito de defecto deberá:

$$Zs \leq \frac{Uo}{Im} \text{ (interruptor automático)}$$
$$Zs \leq \frac{Uo}{Ifu} \text{ (fusible)} \qquad (12)$$

- **Determinación de la impedancia del circuito (Zs):**

El cálculo de la impedancia de un circuito de defecto es realmente delicado. Distinguiremos dos hipótesis:

- *El conductor de protección no está próximo a los conductores de fase (figura 20).* En este caso, prácticamente no es posible realizar un cálculo. Por el efecto de alejamiento de PE, el valor de la reactancia del circuito de defecto aumenta

notablemente, sobre todo si en el interior de dicho circuito existen elementos metálicos. No podemos predeterminar el valor de la impedancia, precisamente por la dificultad de predeterminación de la reactancia. La impedancia de este circuito sólo podrá conocerse una vez realizada la instalación.

- *El conductor de protección está próximo a los conductores de fase.*
  Esto ocurre generalmente y es cuando el conductor de protección forma parte de un mismo tubo. La impedancia del circuito de defecto está constituida por la suma de impedancias del transformador, los cables y en su caso, por la impedancia de los elementos de aparamenta instalados en el circuito.

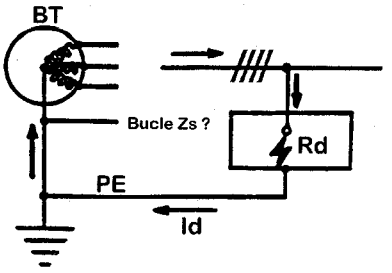


Figura 20. Conductor de protección separado en un sistema TN.

El cálculo exacto debería realizarse utilizando las componetes simétricas, pero es suficiente aplicar elmétodo simplificado que se indica en la norma UNE 20.460. Este método, consiste en ***calcular la longitud máxima de cable*** de una sección determinada como límite para que el dispositivo de protección de máxima intensidad pueda asegurar la protección de contactos indirectos en caso de defecto de aislamiento.

Como la impedancia Zs es proporcional a la longitud de los cables, entonces:

$$(R=\frac{\rho L}{S} \text{ y } X=kL) \qquad (13)$$

Para el cálculo simplificado, las normas parten de la hipótesis que con la aparición de un defecto rígido, (Rd=0) la tensión cae un 20% en el punto de instalación del dispositivo de protección (figura 21). En estas condiciones podemos escribir:

$$0{,}8 * Uo = Zs * Id \qquad (14)$$

donde:

Zs: Impedancia del bucle (cable de fase y de protección).

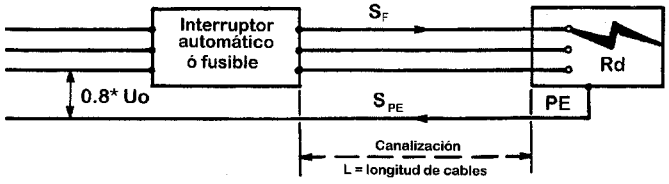


Figura 21. Método simplificado para el cálculo de la longitud de conductor protegida.

Para secciones de conductores de 120 mm² o inferiores se considera solamente la componente de resistencia. Para secciones superiores se tomará, por efecto de la reactancia, un coeficiente sobre el valor de la resistencia de:

- 150 mm² R + 15%
- 185 mm² R + 20%
- 240 mm² R + 25%

Luego:

$$Zs = \frac{\rho L}{S_F} + \frac{\rho L}{S_{PE}} = \rho \frac{L}{S_F}\left(1 + \frac{S_F}{S_{PE}}\right) \qquad (15)$$

Si $m = S_F/S_{PE}$ queda:

$$Zs = \rho \frac{L}{S_F}(1 + m) \qquad (16)$$

- **Longitud máxima de cables para mantener la protección contra los contactos indirectos con interruptores automáticos y fusibles:**

La corriente que circulará por el circuito de defecto será:

$$Id = \frac{U}{Zs} = \frac{0.8\,Uo}{\rho \frac{L}{S_F}(1 + m)} \qquad (17)$$

Esta corriente Id elevará el potencial de la masa del receptor en defecto al valor:

$$Uc = Z_{PE} * Id \qquad (18)$$

$$Uc = \rho \frac{L}{S_{PE}} * \frac{0.8\,Uo}{\rho \frac{L}{S_F}(1 + m)} = 0.8\,Uo * \frac{m}{m+1} \qquad (19)$$

Para el caso de una red 220/380 V, con la ayuda de la curva de seguridad para un local con U_L = 50 V (figura 22), obtenemos los tiempos máximos totales de desconexión expuestos en la figura 22 y tabla 2.

m = Sph/Spe	Uc [V]	Tiempo [ms]
1	88	532
2	117,3	182
3	132	143
4	141	126

Tabla 2. Tiempo de desconexión del ejemplo.

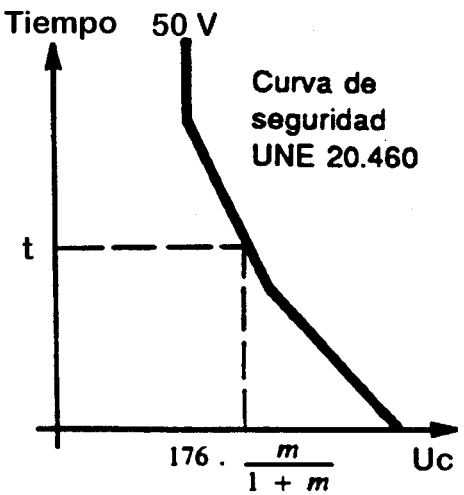


Figura 22. Tiempos de desconexión en sistemas TN para la protección de personas.

Estos tiempos son tan cortos que sólo pueden obtenerse en los interruptores automáticos por intervención del dispositivo magnético, a tiempo independiente, con la condición:

$$Id \geq Im$$

$$\frac{0.8Uo}{\rho \frac{L}{S_F}(1+m)} \geq Im \qquad (20)$$

y despejando las longitudes en la desigualdad:

$$L \leq \frac{0.8 * Uo * S_F}{\rho(1+m) * Im} \quad (Interruptor\ automático)$$

$$L \leq \frac{0.8 * Uo * S_F}{\rho(1+m) * Ifu} \quad (Fusible) \qquad (21)$$

A partir de la fórmula anterior se determinarán las longitudes máximas protegidas por interruptor automáticos de la tabla 3. Si las longitudes son superiores a las máximas de protección, para garantizar la protección de personas se puede:

- Aumentar la sección de los cables (PE ó F + PE).
- Disminuir la intensidad de disparo magnético (pero atención a la selectividad).
- Realizar una conexión equipotencial suplementaria (figura 23).
- Instalar un interruptor diferencial (figura 23).

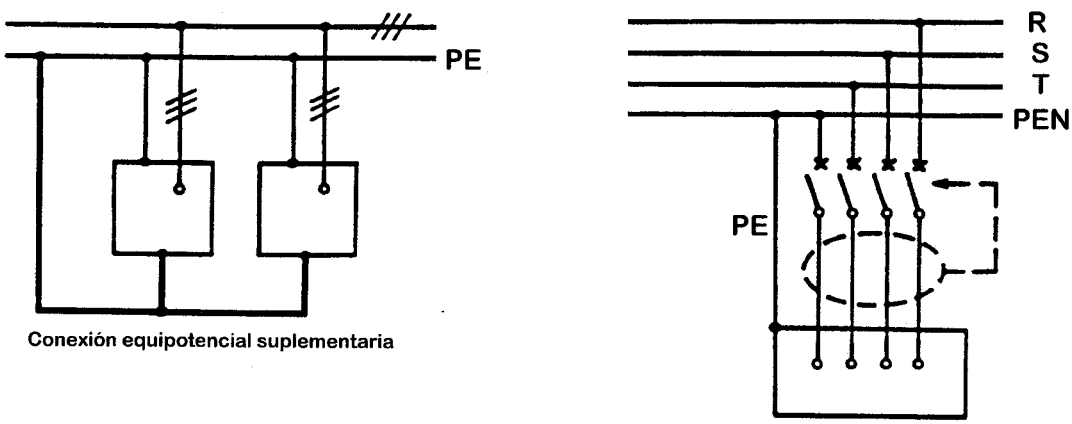


Figura 23. Medidas complementarias para asegurar la protección de personas en sistemas TN.

Longitudes máximas (en metros) de cables para sistemas TN protegidos por magnetotérmicos contra contactos indirectos.

A ph. = sección transversal del conductor de protección.

cable: Cobre.

C60/NC 100 curva B

A ph.	calibre (A)																	
mm²	1	2	3	4	6	8	10	13	16	20	25	32	40	45	50	63	80	100
1,5	1227	613	409	307	204	153	123	94	77	61	49	38	31	27	25	19	15	12
2,5			681	511	341	256	204	157	128	102	82	64	51	45	41	32	28	20
4			1090	818	545	409	327	252	204	164	131	102	82	73	65	52	41	33
6					818	613	491	377	307	245	196	153	123	109	98	78	61	49
10						1022	818	629	511	409	327	256	204	182	164	130	102	82
16								1006	818	654	523	409	327	291	262	208	164	131
25										1022	818	639	511	454	409	325	258	204
35												894	716	636	572	454	358	288
50												1278	1022	909	818	649	511	409

C60/NC 100 curva C

A ph.	calibre (A)																	
mm²	1	2	3	4	6	8	10	13	16	20	25	32	40	45	50	63	80	100
1,5	613	307	204	153	102	77	61	47	38	31	25	19	15	14	12	10	8	6
2,5	1022	511	341	256	170	128	102	79	64	51	41	32	26	23	20	16	13	10
4		818	545	409	273	204	164	126	102	82	65	51	41	36	33	26	20	16
6			818	613	409	307	245	189	153	123	98	77	61	55	49	39	31	25
10				1022	681	511	409	315	256	204	164	128	102	91	82	65	51	41
16						818	654	503	409	327	262	204	164	145	131	104	82	65
25							1022	786	639	511	409	319	256	227	204	162	128	102
35									894	716	572	447	358	318	286	227	179	143
50										1022	818	639	511	454	409	325	258	204

C60/NC 100 curva D

A ph.	calibre (A)																	
mm²	1	2	3	4	6	8	10	13	16	20	25	32	40	45	50	63	80	100
1,5	438	219	146	110	73	53	44	34	27	22	18	14	11	10	9	7	5	4
2,5	730	365	243	183	122	88	73	56	46	37	29	23	18	16	15	12	9	7
4		584	389	292	195	141	117	90	73	58	47	37	29	26	23	19	14	12
6		876	584	438	292	211	175	135	110	88	70	55	44	39	35	28	21	18
10			974	730	487	352	292	225	183	146	117	91	73	65	58	46	35	29
16					779	564	467	359	292	234	187	146	117	104	93	74	58	47
25						881	730	562	456	365	292	228	183	162	146	116	88	73
35							1022	786	639	511	409	319	258	227	204	162	123	102
50									913	730	584	456	365	325	292	232	178	146

C60/NC 100 curva MA

A ph.	calibre (A)									
mm²	1,6	2,5	4	6,3	10	12,5	16	25	40	63
1,5	274	175	110	70	44	35	27	18	11	7
2,5	456	292	183	116	73	58	46	29	18	12
4	730	467	292	186	117	93	73	47	29	19
6		701	438	279	175	140	110	70	44	28
10			730	465	292	234	183	117	73	46
16				743	467	374	292	187	117	74
25					730	584	456	292	183	116
35					1022	818	639	409	256	162
50							913	584	365	232

*1 para sistemas IT con neutro distribuido aplicar un coeficiente de 0,5
para sistemas IT con neutro no distribuido aplicar un coeficiente de 0,72
*2 para 127/230 V, aplicar un coeficiente de 0,57.

Tabla 3. Longitud máxima de conductores para sistemas TN e IT protegidos por interruptores automáticos contra contactos indirectos. Red trifásica 230/400 V.

3.3.- Protección contra sobretensiones en el esquema TN.

En redes TN, el conductor del punto estrella debe estar conectado directamente con tierra. Esta puesta a tierra de servicio depende de la tensión nominal de la red; su resistencia de puesta a tierra puede ser, para una red de 380 V, 3F/N/PE 50 Hz, de 2 Ω, como máximo. De esta forma se impide que si una de las fases hace contacto con tierra, las otras adquieran, con respecto a tierra, una tensión superior a 250 V, y que se establezca una tensión de contacto excesivamente alta (figuras 24 y 25). El contacto a tierra de una de las fases, cuya resistencia R_E, en el punto de defecto, no es menor, en general, de 7 Ω (figura 24) tiene por consecuencia una corriente de defecto dada por la siguiente expresión:

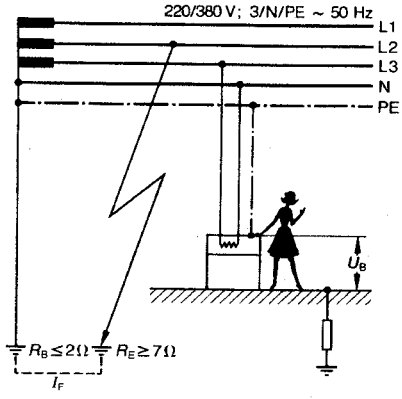


Figura 24. Contacto a tierra de una fase.

$$I_F = \frac{U_O}{R_E + R_B} \qquad (22)$$

donde:

- I_F: Intensidad de defecto.
- U_O: Tensión con respecto a tierra.
- R_E: Resistencia en el punto de defecto (contacto a tierra).
- R_B: Resistencia de la puesta a tierra de servicio.

La tensión de contacto que se establece en los receptores es

$$U_B = I_F * R_B \qquad (23)$$

De (22) y (23) se obtiene:

$$R_B = \frac{U_B R_E}{U_O - U_B} \qquad (24)$$

Para una red de 220/380 V:

$$R_B = \frac{50*7}{220-50} \approx 2\Omega \qquad (25)$$

Por lo tanto, en caso de contacto a tierra se obtiene:

$$U_B = \frac{U_O R_E}{R_E + R_B} = \frac{220*2}{7+2} \approx 49\ V \qquad (26)$$

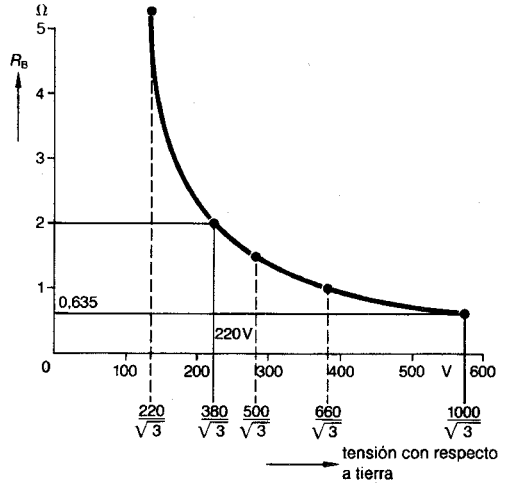


Figura 25. Resistencia a la puesta a tierra de servicio en redes con tensiones con respecto a tierra ≤ 1.000/√3 V.

Con ello se cumple el requisito básico U_B <50 V. El diagrama de la figura 25 muestra para redes con tensiones con respecto a tierra inferiores o iguales a 1.000 V/√3 las resistencias requeridas R_B de la puesta a tierra de servicio.

En la figura 26a se representa el diagrama de tensiones para al caso de contacto a tierra. La tensión nominal del aislamiento de 250 V y el límite de la tensión de contacto permanente admisible de 50 V no se sobrepasan.

En redes TT, en caso de un contacto a tierra en una de las fases, tiene lugar igualmente un incremento de la tensión con respecto a tierra en las otras fases. No obstante, no se establece ninguna tensión de contacto, debido a que las masas de los equipos están conectadas a tierra por separado del electrodo de puesta a tierra de servicio.

a) Diagrama de tensiones para desplazamiento del neutro por contacto a tierra en la fase.
b) Tensión de contacto U_E en función de la resistencia R_E del contacto a tierra.

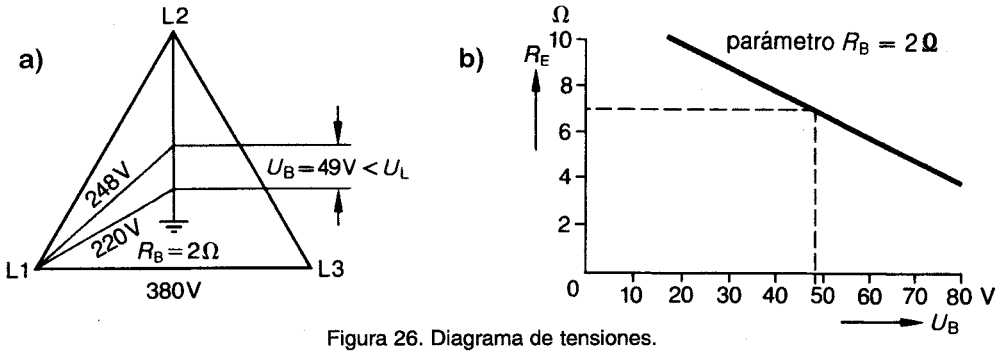


Figura 26. Diagrama de tensiones.

4.- RED CON NEUTRO AISLADO.

4.1.- Introducción.

La red con neutro aislado se caracteriza por (figura 27):

- Tener el neutro del transformador aislado de tierra;
- y las masas de utilización estar conectadas a tierra.

Este tipo de esquema puede encontrarse en toda la instalación que comprende un transformador M.T./ B.T.. Puede, además estar impuesto por reglamentos oficiales (por ejemplo: salas de operación o de anestesia).

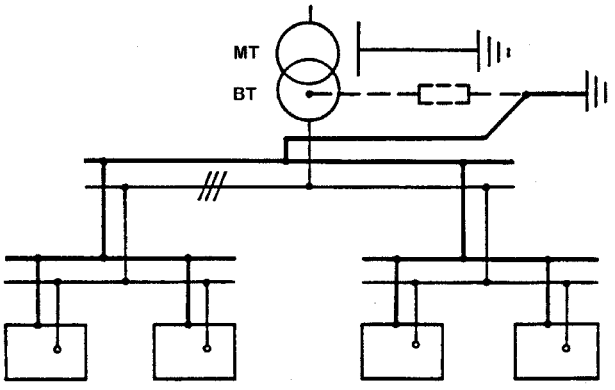


Figura 27. Esquema de distribución en una red de baja tensión

4.2.- Protección contra las sobretensiones.

Es necesario preservar las instalaciones de B.T. contra los riesgos de las sobretensiones que pueden dar origen a perforaciones dieléctricas del material aislante. Estas sobretensiones pueden provenir:

- de defectos de aislamiento del transformador (cebados de arco entre los arrollamientos primario y secundario);
- de fenómeno atmosféricos (caída de un rayo sobre la línea aérea de alimentación del centro de transformación);
- de maniobras en la aparamenta de M.T..

Al estar el neutro del transformador aislado de tierra es necesario derivar a tierra estas sobretensiones instalando un limitador de sobretensiones.

- **Emplazamiento de los limitadores (figura 28):**

Un limitador de sobretensiones es obligatorio para cada transformador M.T./B.T. Si se ceba el limitador, la red está en estos instantes con el neutro directamente a tierra. Para que la protección sea la adecuada el limitador debe constituir un punto débil de la instalación y constituirse en un enlace directo entre los conductores activos y tierra antes de la manifestación de tensiones superiores a la rigidez dieléctrica de los materiales de B.T. La tensión a la cual el limitador actúa es llamada tensión de cebado.

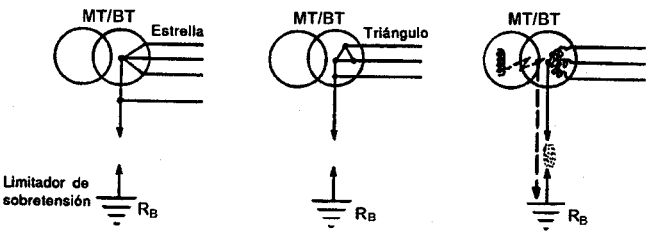


Figura 28. Esquemas posibles en B.T. que influyen en la elección de limitadores.

- **Elección de los limitadores:**

Tres son los criterios a considerar en la elección:

- la tensión nominal de la instalación;
- el nivel de aislamiento dieléctrico de la instalación;
- el modo de conexión de los limitadores de sobretensión: (neutro-tierra o fase-tierra).

Tensión nominal de la instalación (V)	Limitador conectado entre neutro y tierra			Limitador conectado entre fase y tierra		
	Nivel de aislamiento mínimo de la instalación (V)	Tensión nominal del limitador (V)	Nivel de protección efectivo (V)	Nivel de aislamiento mínimo de la instalación (V)	Tensión nominal del limitador (V)	Nivel de protección efectivo (V)
127/220	1 100	250	900	1 200	250	1 000
220/380	1 200 1 650	250 440 (*)	1 000 1 350	1 800	440	1 500
277/480 ou 290/500	1 700 2 300	440 660 (*)	1 400 1 900	2 600	660	2 150
380/660	1 800 2 400	440 660 (*)	1 500 2 000	2 800	660	2 300
580/1 000	2 700	660	2 240	—	—	—

Tabla 4. Cuadro de elección de limitadores de tensión

La tabla 4 indica para cada tipo de limitador normalizado el nivel de protección mínimo asegurado según el modo de conexión (UNE 20.460).

4.3.- Estudio de un defecto de aislamiento.

Toda instalación tiene un nivel de aislamiento no es infinito.Entre fase y tierra se tiene una resistencia de aislamiento finita que varia en función del envejecimiento de los aislantes de los receptores, de las condiciones climáticas, en especial de la humedad, etc. El orden de magnitud, para una instalación o red nueva, es de 10 MΩ/km. Además, los cables tienen entre fases y tierra una capacidad.

Podemos representar estas capacidades y las resistencias de aislamiento por tres condensadores puntuales C_1, C_2 y C_3 y tres resistencias puntuales ϱ_1, ϱ_2, ϱ_3 (figura 29). Para facilitar los razonamientos podemos reducir estos condensadores y resistencias a valores entre el neutro y tierra, lo cual nos da el esquema equivalente de la figura 30.

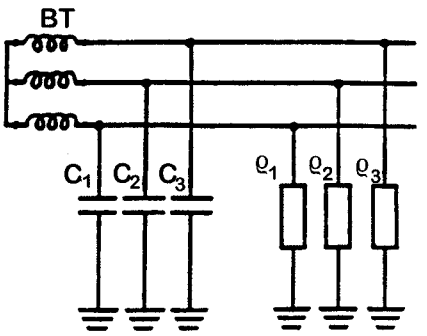


Figura 29. Capacidad y resistencia distribuida.

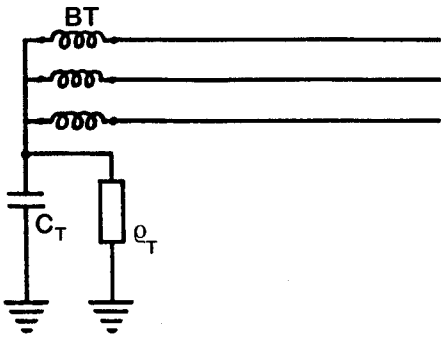


Figura 30. Capacidad y resistencia concentrada.

Si las tres fases tienen la misma longitud:

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_T/3 \quad y \quad \rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 3*\rho_T \qquad (30)$$

La capacidad uniformemente repartida entre fase y tierra corresponde aproximadamente a 0,3μF/Km por fase, para un cable B.T.. La resistencia uniformemente repartida entre fase y tierra corresponde aproximadamente a 10 MΩ/km para un cable B.T. sin defecto.

Si consideramos la red del esquema (figura 31) con cables de 10 km de longitud total tendremos:

$$C_T = 3x0,3 = 0,9\mu F$$
$$\rho_T = 10/3 = 3,3\ M\Omega \qquad (31)$$

de donde se deduce que la impedancia capacitiva vale:

$$Z_{CT} = \frac{1}{C_T * w} = \frac{1}{0.9*10^{-6}*10*314} = 353.85\ \Omega \qquad (32)$$

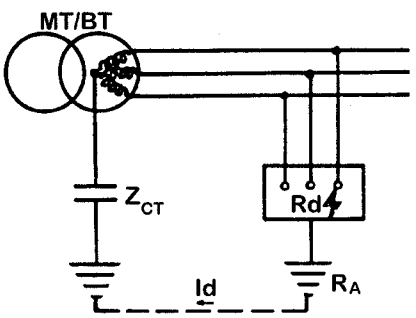


Figura 31. Defecto de aislamiento

Vemos que ϱ_T (muy elevada) tiene una influencia despreciable con relación a Z_{CT} (reducida). En consecuencia el esquema equivalente puede ser representado por el de la figura 31. Al despreciar la resistencia de aislamiento (muy grande frente a la impedancia capacitiva), la corriente de defecto viene limitada por la impedancia capacitiva.

- ***Ejemplo:***

Red 380/220 V, 1 Km de cables, R_A =10 Ω, C_i=0,3 μF/Km; C_T=3C_i, aislamiento nulo (Rd=0) y con una impedancia:

$$Z_{CT} = 1/(C_T{*}w) = 1/(3C_1w) = 3538.5\ \Omega$$

(R_A es despreciable ante Z_{CT}). De donde se deduce que la corriente de defecto será:

$$Id = Uo/Z_{CT} = 220/3538.5 = 0.062\ A$$

y la tensión de contacto:

$$Uc = R_A{*}\ Id = 10{*}\ 0.062 = 0.62\ V$$

Un defecto a masa supone unas corrientes capacitivas de fuga débiles. La subida de tensión de las masas será siempre inofensiva y muy inferior a las tensiones de seguridad.

- **Reglas que deben aplicarse:**

Acabamos de comprobar que los defectos simples no son peligrosos, por lo que la desconexión no es obligatoria. Este es, por tanto, el objetivo primero del esquema. Una instalación de este tipo puede mantenerse en servicio con una fase a masa sin peligro para las personas.

Sin embargo, veremos mas adelante que si se produce un segundo defecto (doble defecto) pueden aparecer efectos peligrosos. De ahí que los reglamentos obliguen a señalizar, localizar y eliminar el primer defecto. Si se realizan estas operaciones los riesgos de un segundo defecto serán reducidos al mínimo.

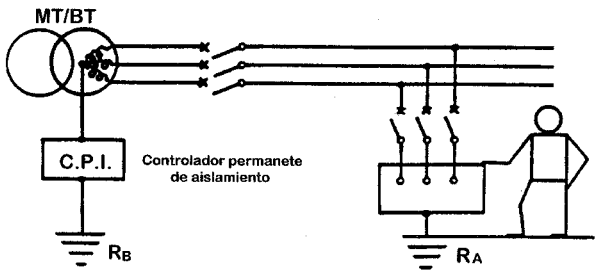


Figura 32. Situación del controlador permanente de aislamiento.

- **Señalización del defecto simple:**

La señalización de un defecto de aislamiento se logra mediante la ayuda de un Controlador Permanente de Aislamiento (CPI), figura 32.

- *CPI por inyección de una corriente continua, (figura 33):*

Un generador inyecta una tensión continua entre la red (a través de un punto neutro accesible o artificial) y tierra. Esta tensión determina en el conjunto de las resistencias de aislamiento (ϱ_1, ϱ_2, ϱ_3) una corriente de fuga cuyo valor es función de los valores de la tensión y de las resistencias de aislamiento.

Un aparato de medida recorrido por esta corriente y graduado directamente en kΩ, nos da el valor permanente del aislamiento.

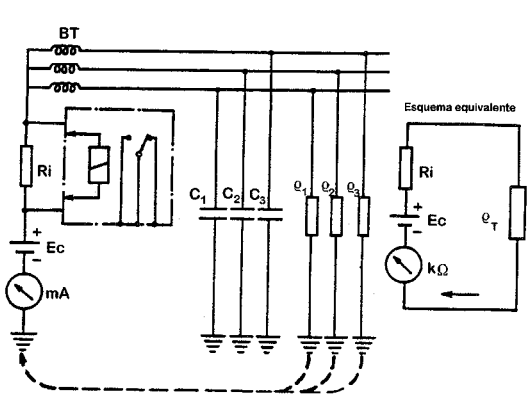


Figura 33. CPI por inyección de corriente continua.

Una resistencia Ri, por una parte asegura la protección del dispositivo en caso de una puesta a tierra directa y por otra entre sus bornes facilita la tensión necesaria para el mando de un relé electrónico que acciona los contactos de alarma. Como la medida se realiza con corriente continua es independiente del valor de las capacidades de los cables C_1, C_2 y C_3.

El aislamiento que se mide es el correspondiente al conjunto de las tres resistencias de fuga (ϱ_1, ϱ_2, ϱ_3) en paralelo, siendo la medida independiente del valor relativo a estas resistencias de fuga. Al realizarse la medida con corriente continua los dos esquemas representados son equivalentes. Cuando el aislamiento global de la red, por los defectos que sea, se reduce al valor de consigna, la tensión continua en los bornes del relé electrónico alcanza el umbral de funcionamiento de éste, provocando el funcionamiento de un relé electrónico.

El dispositivo controla el valor global ϱ_T del aislamiento de la red con relación a tierra sin tener en cuenta las capacidades. Cualquier reducción del aislamiento, aún cuando sea uniformemente repartido, es detectado por este dispositivo.

Este tipo de aparato sólo es válido para redes de corriente alterna. En ningún caso puede ser utilizado en una red de corriente continua. Sobre una red mixta (alterna-continua) sólo da resultados exactos si la parte continua de la red está sin defecto.

- *CPI por inyección de una corriente alterna de baja frecuencia, (figura 34):*

Un generador inyecta una tensión alterna de baja frecuencia entre la red (fases o neutro) y tierra. Esta tensión crea en el conjunto de las resistencias de aislamiento (ϱ_1, ϱ_2, ϱ_3) y las capacidades (C_1, C_2 y C_3) una corriente de fuga cuyo valor es función de la impedancia de aislamiento.

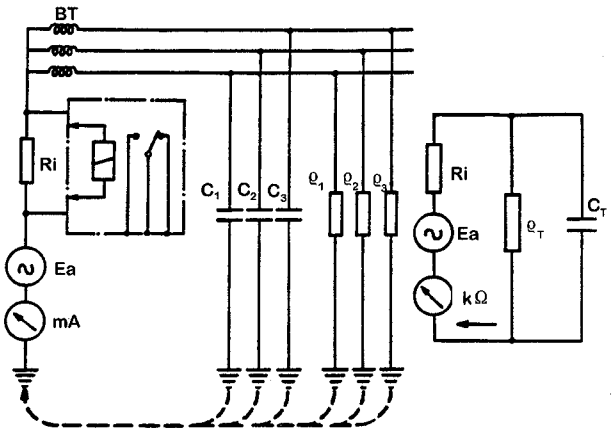


Figura 34. CPI por inyección de una corriente alterna de baja frecuencia.

Una resistencia Ri determina una tensión que depende de la corriente de defecto; esta tensión es aplicada un relé electrónico el cual al alcanzar aquella un determinado valor acciona un contacto de alarma. Un aparato de medida, recorrido por la corriente de fuga, directamente graduado en kΩ, nos da permanentemente el valor de la impedancia de la red respecto a tierra.

Realizándose la medida a muy baja frecuencia, resulta muy poco sensible al valor de las capacidades C_1, C_2 y C_3. Cuando el aislamiento global de la red se reduce a valores considerados como defectuosos y alcanza el valor de consigna, la tensión en los bornes del relé electrónico corresponde al umbral funcionamiento del mismo provocando la excitación de un relé de disparo. El dispositivo controla, pues, el valor del aislamiento global ϱ_T de la red respecto a tierra; las capacidades tienen generalmente una influencia despreciable. Cualquier reducción del aislamiento, aunque sea uniformemente repartida, es detectada por este dispositivo.

- **Localización de un defecto simple:**

  - *Localización por puesta fuera de tensión sucesiva de las distintas salidas, (figura 35):*

En cuanto un defecto es detectado por el controlador de aislamiento global, se procede a abrir y volver a cerrar sucesivamente todas las salidas de la red. Cuando la salida con el defecto es puesta sin tensión la señalización dada por el controlador desaparece. Es una solución simple, valida para todas las redes (alternas, continuas o mixtas). Ofrece, sin embargo, el gran inconveniente de perturbar seriamente la distribución.Cuando las condiciones de explotación no permiten tales cortes, este método no puede ser considerado.

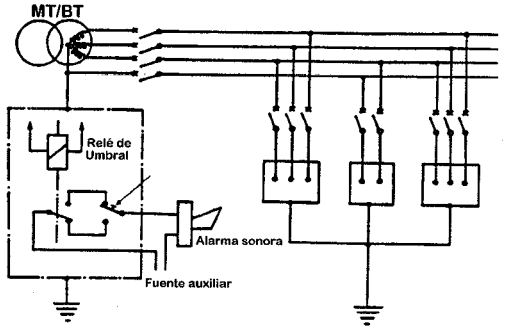


Figura 35. Localización de defecto por puesta fuera de servicio.

  - *Localización por inyección de una tensión de muy baja frecuencia (figura 36):*

Un generador de muy baja frecuencia es conectado por un lado a tierra y por el otro a uno cualquiera de los conductores activos de la red a controlar (neutro o fases en las redes alternas). La tensión suministrada por el generador determina en el defecto una corriente de la misma frecuencia. Un receptor, con un filtro selectivo sintonizado con esta frecuencia, detecta esta corriente mediante un transformador toroidal. La exploración sucesiva de las salidas se realiza:

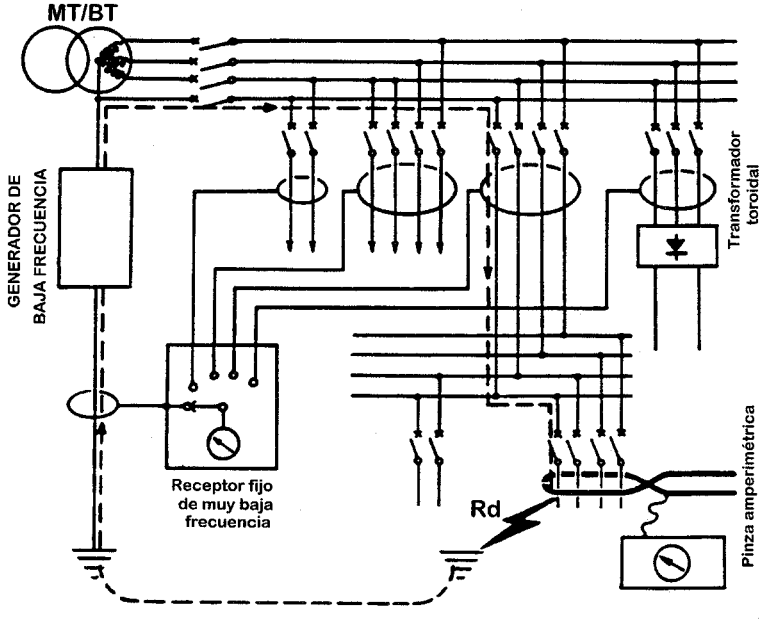


Figura 36. Localización del defecto por inyección de una tensión de baja frecuencia.

- Mediante un receptor instalado en un punto fijo. En este caso cada salida esta equipada con el captador toroidal. Un conmutador manual para un circuito de N direcciones permite aplicar las tensiones que nos dan los transformadores toroidales sobre el receptor.
- Con la ayuda de un receptor portátil. En este caso una pinza amperimétrica asociada al receptor permite comprobar sucesivamente cada salida.

- *Criterios determinantes en la elección de la frecuencia:*

La frecuencia de la tensión generada debe ser suficientemente baja para que:

- las corrientes capacitivas de las salidas sean muy reducidas con relación a las respectivas corrientes en caso de defecto;
- los filtros del amplificador selectivo pueden cortar la componente de 50 Hz que suministra el toro, sin atenuar la tensión a la frecuencia del generador.

Sin embargo, no debe ser demasiado baja, para evitar que la tensión que suministran los toros sea de muy débil amplitud y en consecuencia atenuar la sensibilidad del dispositivo detector.

En las instalaciones conectadas directamente a tierra el dispositivo puede ser utilizado suprimiendo momentáneamente el enlace a tierra. Es evidente que esta separación o ruptura no puede llevarse a cabo sin tomar previamente ciertas precauciones. En particular, es indispensable, conectar un limitador de sobretensión entre un borne del secundario del transformador y tierra (caso de un primario alimentado en M.T.).

4.4.- Estudio de un defecto doble.

Si un primer defecto no ha podido ser eliminado y aparece un segundo defecto, que afecta a un conductor activo de otro circuito nos encontraremos con la presencia de un defecto doble.

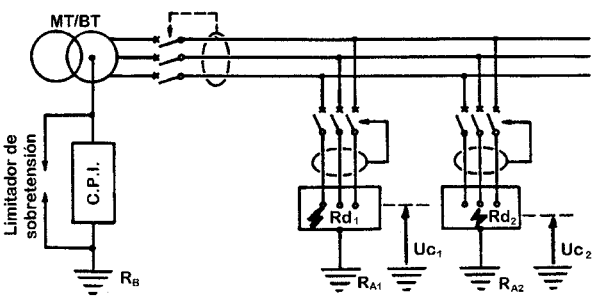


Figura 37. Defecto doble. Masas de utilización no interconectadas.

- **Las masas de utilización no están interconectadas (figura 37):**

Según los defectos afecten dos fases o fase y neutro, la corriente que se tendrá en las tomas de tierra R_{A1} y R_{A2} tendrán los valores:

$$Id = \frac{U(Uo)}{Zs + Rd_1 + Rd_2 + R_{A1} + R_{A2}} \qquad (30)$$

donde:

U: Tensión compuesta.
Uo: Tensión simple.
Zs: Impedancia del bucle.
Rd_i: Pérdida de aislamiento en la salida iésima.

Cuando las masas de utilización no estén interconectadas es necesario instalar un interruptor diferencial por masa (o grupo de masas) no unidas entre sí. Otros casos donde es necesario la instalación de un DF (figura 38):

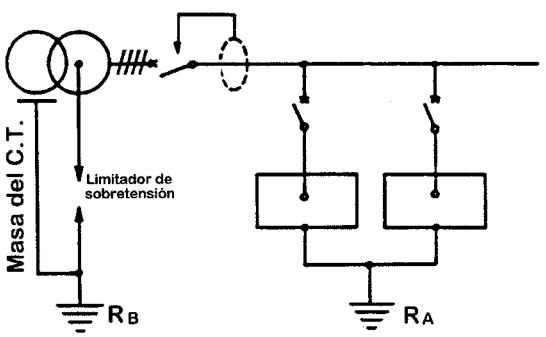


Figura 38. Instalación del DDR.

- si las tomas de tierra R_B y R_A no han sido interconectadas, es indispensable un DF en cabeza de línea;
- locales que presentan un riesgo de explosión o de incendio: DF < 300 mA;
- riesgo de rotura del conductor de protección: DF < 30 mA.

- **Ejemplo:**

R_{A1}= 7 Ω; R_{A2}=12 Ω . Supongo defectos rígidos Rd_1 y Rd_2 y despreciable la Zs.

$$Id = \frac{380}{7+12} = 20\ \Omega \qquad (31)$$

U_{C1} = 140 V
U_{C2} = 240 V. Al ser estos potenciales peligrosos la desconexión es obligatoria.

Las condiciones de protección son las mismas que en el esquema neutro a tierra. La desconexión se producirá por los interruptores diferenciales que se instalará en cada salida que alimenta un grupo de masas interconectadas.

- **Las masas de utilización están interconectadas (figura 39):**

Un defecto doble se transforma en un cortocircuito bifásico o fase-tierra. La protección de las personas queda entonces asegurada como en el esquema «puesta al neutro» por los dispositivos de protección contra las sobreintensidades.

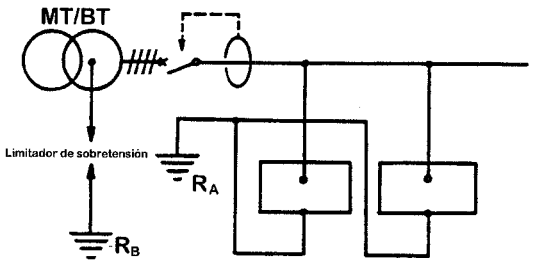


Figura 39. Masas de utilización interconectadas.

4.5.- Protección del defecto doble asegurada por los dispositivos de protección de sobrecorrientes (interruptores automáticos o fusibles).

- **Condiciones que deben satisfacer (figura 40):**

En todo lo que sigue llamaremos:
U, a la tensión compuesta (neutro no distribuido); Uo a la tensión simple (neutro distribuido).

Si Zs es la impedancia del bucle de defecto entonces la corriente de defecto será:

$$Id = \frac{U(U_o)}{Zs} \qquad (32)$$

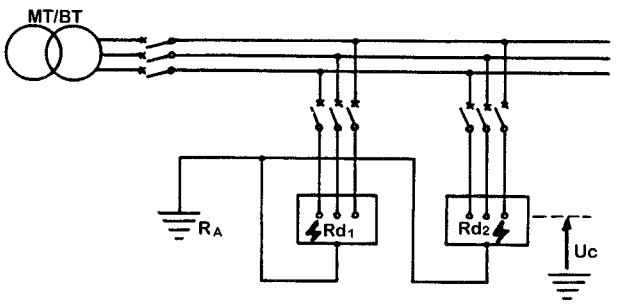


Figura 40. Protección con dispositivos de sobrecontinente.

Esta corriente puede llevar las masas a un potencial peligroso. Si suponemos que esta tensión sea de 110 V, el tiempo de ruptura del dispositivo de protecciónl puede ser como máximo igual a 200 ms para mantener la seguridad de las personas en la instalación (caso local seco) (figura 41).

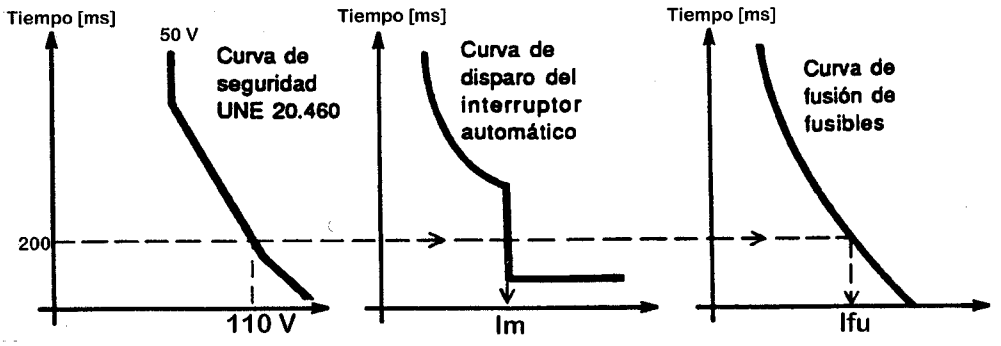


Figura 41. Curvas características.

Es necesario, pues, que se cumplan las condiciones siguientes:

- Id > I_{fu} (corriente de fusión en 200 ms del fusible) ó;
- Id > Im (umbral del relé magnético del interruptor automático).

Condición de desconexión:

$$Id = \frac{U(U_O)}{Zs} > Ifu \quad o \quad Im \tag{33}$$

de donde se deduce que:

$$-Zs < \frac{U(U_O)}{Ifu} \text{ (caso de un fusible)}$$
$$-Zs < \frac{U(U_O)}{Im} \text{ (caso de un interruptor automatico)} \tag{34}$$

El cálculo exacto de la impedancia del bucle es difícil, pero se tiene un método simplificado (UNE 20.460), cuando el conductor de protección sigue el mismo recorrido que las fases.

- **Longitudes máximas de los cables protegidos:**

Las longitudes máximas de los cables protegidos por los relés magnéticos de los interruptores automáticos o por fusibles contra el riesgo de contactos indirectos depende si tenemos el neutro distribuido o no. Como en el esquema TN, las condiciones de protección se determinan suponiendo que en el caso de un doble defecto las tensiones en el origen de cada circuito con defecto representa el 80% de la tensión sin defecto:

- *Si el neutro no está distribuido* (figura 42):

La impedancia del bucle de defecto es mayor que la de un cortocircuito que afecte a dos conductores de un mismo circuito. Sean Z_1 y Z_2 las impedancias respectivas de los bucles de defecto de los circuitos 1 y 2 ($Z_1 < Z_2$).

La impedancia del bucle de defecto Zs, estará entonces comprendida entre $2*Z_1$ y $2* Z_2$.

$$2*Z_1 < Zs < 2*Z_2 \tag{35}$$

La corriente del defecto doble Id, estará así mismo comprendida entre I_1 e I_2:

$$I_1 = \frac{0.8 * U}{2 * Z_1} > Id > \frac{0.8 * U}{2 * Z_2} = I_2 \qquad (36)$$

Por ello en cada salida se regulara el relé magnético de forma que:

$$I_{m1} < I_1 \text{ y } I_{m2} < I_2$$

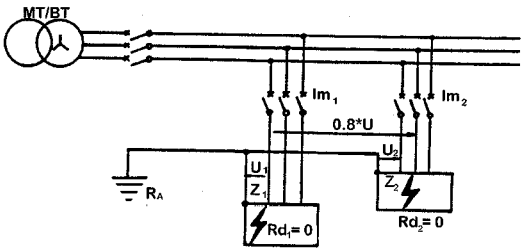


Figura 42. Esquema para el cálculo de la longitud protegida con dispositivos de sobrecorriente.

Uno de los dos interruptores automáticos eliminará el defecto doble.

La protección queda asegurada si para cada salida se verifica la condición:

$$I_{mi} < \frac{0.8 * U}{2 * Z_i} \qquad (37)$$

con:

$$Z = \rho * \frac{L}{S_F} + \rho * \frac{L}{S_{PE}} = \rho * \frac{L}{S_F}(1 + m) \qquad (38)$$

para la protección por interruptor automático:

$$L < \frac{0.8 * U * S_F}{2 * \rho * (1 + m) * I_m} \qquad (39)$$

para la protección por fusibles:

$$L < \frac{0.8 * U * S_F}{2 * \rho * (1 + m) * I_{fu}} \qquad (40)$$

- *Si el neutro está distribuido:*

La longitud máxima del cable para la protección por fusibles deberá ser:

$$L < \frac{0.8 * U_o * S_{NEUTRO}}{2 * \rho * (1 + m) * I_{fu}} \qquad (41)$$

y para un interruptor automático:

$$L < \frac{0.8 * U_o * S_{NEUTRO}}{2 * \rho * (1 + m) * I_m} \qquad (42)$$

A partir de estas fórmulas se construyen las tablas que dan las longitudes máximas de los cables protegidos por interruptor automático (tabla 3) o por fusibles en función de sus curvas de disparo o de fusión y de la sección de los conductores.

- ***Ejemplo de Fusibles:***

Para los fusibles, tenemos tres condiciones diferentes, según sea el valor de U_L (12 V, 25 V ó 50 V) ya que la curva del fusible I(t) no es una vertical:

- para U_L 12 V Id > I_{fu12};
- para U_L 25 V Id > I_{fu25};
- para U_L 50 V Id > I_{fu50}.

lo que impone evidentemente las longitudes máximas autorizadas diferentes.

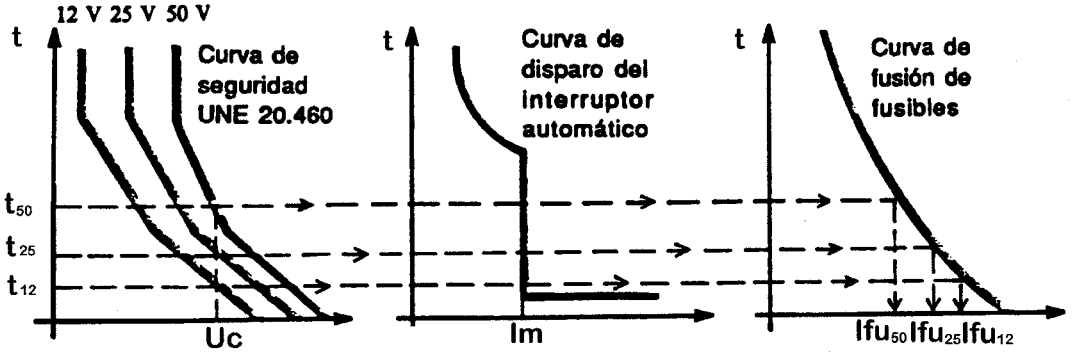


Figura 43. Curvas características.

- **¿Qué hacer cuando no se cumplimentan las condiciones de protección?.**

La gran diferencia del esquema neutro aislado (IT) con respecto a los otros esquemas (TT y TN) está en el hecho de que la aparición de un defecto simple no implica peligro y, por tanto, no es necesario provocar la desconexión automática ante esta incidencia. Por el contrario, en caso de defecto doble hay peligro, por lo que la desconexión es obligatoria.

Como en el caso del régimen TN, el disparo de las protecciones clásicas contra sobreintensidades (magnéticas de los interruptores automáticos y fusibles), debe realizarse respetando la seguridad, es decir, las longitudes de los cables no deben sobrepasar un cierto valor. Si esta condición no se cumple (cable demasiado largo), siempre será posible preservar la seguridad utilizando interruptores diferenciales instalados en las salidas afectadas.

TEMA 8. PROTECCIÓN DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE BAJA TENSIÓN CONTRA SOBRECARGAS Y CORTOCIRCUITOS

1.- INTRODUCCIÓN.

Las instalaciones eléctricas están diseñadas para que sus componentes (receptores, conductores, elementos de protección, etc.), puedan soportar en condiciones normales, unas intensidades máximas, que no ocasionan problemas en el correcto funcionamiento de dichas instalaciones, éstas serían lo que denominamos intensidades nominales.

Circunstancialmente pueden presentarse en alguna parte de las instalaciones, intensidades superiores a las nominales, que denominamos sobreintensidades, éstas originan aumentos de temperatura en los elementos de la instalación, reduciendo así su vida útil, y en especial los aislamientos de los conductores terminan por deteriorarse, provocando arcos eléctricos de elevada temperatura, que son causa de muchos incendios.

El MIE BT en su instrucción 020 señala que todo circuito eléctrico estará protegido contra los efectos de las sobreintensidades que puedan presentarse en el mismo, para lo cual la interrupción de este circuito se realizará en un tiempo conveniente o estará dimensionado para las sobreintensidades previsibles. Las sobreintensidades pueden estar motivadas por: sobrecargas y cortocircuitos.

2.- PROTECCIÓN CONTRA SOBRECARGAS.

Las sobrecargas pueden ser momentáneas y previsibles, (por ejemplo, la corriente de arranque de un motor), permanentes (demanda continua en un receptor de una potencia superior a la nominal) ó accidentales (defectos de aislamiento de gran impedancia).

Según MIE BT 020, en cuanto a la protección contra sobrecargas se tiene que el límite de intensidad de corriente admisible en un conductor (Iad), ha de quedar en todo caso garantizado por el dispositivo de protección utilizado. Una protección correcta contra sobrecargas cumplirá:

$$Ical < In < Iad \qquad (1)$$

siendo:

- Ical: intensidad de cálculo de la línea a proteger;
- Iad: Intensidad admisible del conductor;
- In: intensidad nominal del aparato o dispositivo de protección.

Según MIE BT 020, excepto los conductores de protección o tierra, todos los conductores que forman parte del circuito, incluyendo el conductor neutro, estarán protegidos. Para la protección del neutro se tendrá en cuenta:

a) Cuando el conductor neutro del circuito tenga una sección inferior a los conductores de fase y pueda preverse en él sobrecargas que no hagan actuar los dispositivos de protección destinados exclusivamente a aquéllos, se colocará un dispositivo de protección general que disponga de un elemento quecontrole la corriente en el

neutro. El dispositivo de protección general puede estar constituido por un interruptor automático de corte omnipolar, o por un interruptor automático que corte únicamente los conductores de fase bajo la acción del elemento que controle la corriente en el neutro.

b) En los demás casos (sección igual a los conductores de fase), la protección del neutro, está convenientemente aseguradas por los dispositivos que controlan las fases.

Como dispositivos de protección contra sobrecargas, serán utilizados los fusibles calibrados de características de funcionamiento adecuadas o los interruptores automáticos con curva térmica de corte.

3.- PROTECCIÓN CONTRA CORTOCIRCUITOS.

El cortocircuito es un defecto rígido (impedancia nula o despreciable) entre partes de la instalación a distinto potencial, y con una duración inferior a 5 s. Estos defectos pueden ser motivados por contacto accidental o por fallo de aislamiento y pueden darse entre fases, fase-masa, fase-tierra y fase-neutro.

En el caso de producirse un cortocircuito la intensidad alcanza valores muy por encima de los valores de la intensidad nominal (impedancia de defecto nula); esto produce elevaciones de la temperatura en los aislamientos reduciendo su vida útil y dando lugar a arcos eléctricos que son causa de muchos incendios. En estas condiciones es necesario desconectar el circuito lo mas rápidamente posible (el tiempo depende del valor de la sobreintensidad).

También hay que tener en cuenta que en el caso de cortocircuitos, aparte de los esfuerzos térmicos, se producen esfuerzos electrodinámicos (al ser muy elevadas las intensidades) y habrá que dimensionar la instalación para soportar estos esfuerzos, como por ejemplo en los embarrados de cuadros de baja tensión.

La MIE BT 020 nos dice que en el origen de todo circuito se establecerá un dispositivo de protección contra cortocircuitos, cuya capacidad de corte estará de acuerdo con la intensidad de cortocircuito que pueda presentarse en el punto de su instalación.

Se admite que cuando se trate de circuitos derivados de uno principal cada uno de los derivados disponga de protección a sobrecargas, mientras que un sólo dispositivo general pueda asegurar la protección contra cortocircuitos de todos los circuitos derivados.

Se admiten, como dispositivos de protección contra cortocircuitos, fusibles adecuados y los interruptores automáticos con sistema de corte electromagnético.

Estos dispositivos de protección se instalarán en el origen de los circuitos y donde la intensidad admisible disminuya por cambios de sección, condiciones de instalación, etc., no obstante no se exige instalar dispositivos de protección donde disminuya la intensidad admisible, si queda asegurada la protección por un dispositivo anterior. Esta prescripción no es válida en los circuitos de locales mojados o que presenten riesgo de incendio o explosión.

Por último MIE BT 020 señala que en el origen de toda instalación y lo más cerca posible de alimentación a la misma, se colocará un cuadro de distribución en el que se dispondrán, un interruptor general de corte omnipolar, así como dispositivos de protección contra

cortocircuitos y sobrecargas de cada uno de los circuitos que parten de dicho cuadro. Este cuadro será de materiales no inflamables.

En general, para la protección contra sobreintensidades es válido el criterio de que las sobrecargas normales de servicio deben ser desconectadas lo más tarde posible, pero siempre, por supuesto, antes de que se alcance un calentamiento peligroso de las partes protegidas de la instalación; por el contrario, los cortocircuitos deben ser desconectados con tanta rapidez como sea admisible considerando a la selectividad del conjunto de la red, para proteger todas las partes de la instalación atravesadas por la corriente de cortocircuito contra los efectos térmicos y, a ser posible, también contra los efectos electrodinámicos (éstos crecen proporcionalmente con el cuadrado de la intensidad de la corriente).

4.- ELEMENTOS DE CORTE O PROTECCIÓN FRENTE A CORTOCIRCUITOS.

Para la protección de cortocircuitos podemos adoptar fusibles de alta capacidad de ruptura y los interruptores automáticos o la combinación de ambos. En el caso de utilizar fusibles en muchas ocasiones, no es necesario obtener las intensidades de cortocircuito debido al elevado poder de corte de estos 100 kA, ya que difícilmente se presentará un valor de la corriente tan elevado. Los interruptores automáticos presentan la ventaja de que el mismo elemento protege contra sobrecargas y cortocircuitos (al estar dotado de sus correspondientes disparadores térmico y magnético), sirviendo, además, como elemento de maniobra (los fusibles deben llevar asociado un elemento para maniobra, como un interruptor de corte en carga). Ahora bien, en el caso del interruptor automático habrá que calcular la corriente de cortocircuito en el punto donde esté colocado.

4.1.- Interruptores automáticos de baja tensión.

El empleo del interruptor automático surge como consecuencia de las deficiencias que desde antaño venían presentando los fusibles en aras de la continuidad de servicio, la necesidad de ser repuestos, etc. aún a pesar de la mayor cuantía económica que conlleva el uso de interruptores automáticos.

4.1.1.- Definición de interruptor automático.

Un interruptor automático (figura 1) es un dispositivo de conexión capaz de cerrar e interrumpir un circuito ante cualquier valor de la corriente hasta su poder de ruptura último: Icu (norma CEI 947-2).

Su función básica es la interrupción de corrientes de cortocircuitos y de sobrecarga por acción refleja o comparativa con su propia corriente, pero permite también, por una acción exterior voluntaria, el corte de corrientes de sobrecarga y normales (de empleo y menor). Además, una vez abierto el circuito, asegura un aislamiento, en tensión, del circuito interrumpido.

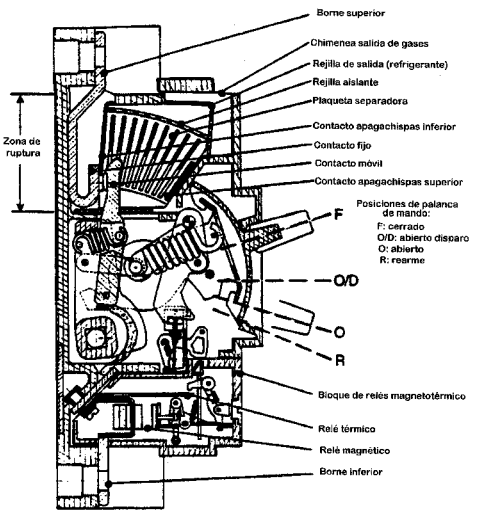


Figura 1. Sección de un interruptor automático B.T. industrial 400 A.

En la figura 2 podemos observar la estructura básica y el símbolo de un interruptor automático con protección contra sobrecargas y cortocircuitos. Sus componentes fundamentales son:

- Los contactos, fijo (1) y móvil (2), que forman un polo del interruptor y que abren o cierran el circuito.
- El accionamiento (3) que abre o cierra el interruptor y que puede ser manualo motorizado.
- El mecanismo de maniobra (4), que se encarga de acumular la energía para abrir el interruptor, de manera automática, cuando recibe la orden de los disparadores.

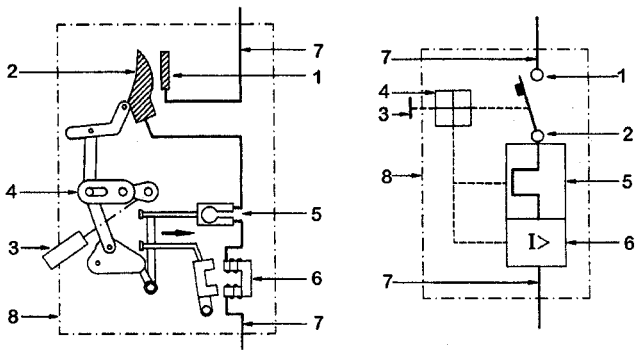


Figura 2. Estructura básica de un interruptor magnetotérmico.

- Los disparadores de sobreintensidad, que si son térmicos (5), generalmente están formados por un bimetal que al calentarse por el paso de una corriente excesiva, se deforma, dando la orden de disparo. Se designan con la letra 0. Si son magnéticos (6), están formados por un electroimán, que por la atracción de una armadura de hierro, da la orden de disparo cuando se supera un determinado umbral de intensidad. Se designan con la letra n.
- Los elementos de conexión (7), que según su forma permiten la conexión de cables o pletinas conductoras al interruptor.
- La envolvente (8) del aparato que protege al interruptor de los agentes externos y, a su vez evita que partes bajo tensión queden al descubierto.

La concepción de un interruptor automático que reúna en una misma caja todas las funciones ha desencadenado la adopción de soluciones específica en cuanto a:

- Mecanismo de cierre.
- Relés.
- Circuitos electrónicos de los polos.
- Elementos de corte (contactos, cámaras de corte etc.).

Los elementos encargados de soportar las intensidades de apertura y cierre son los contactos, que normalmente se mantienen cerrados mediante un dispositivo mecánico o magnético y se abren automáticamente para unas condiciones anómalas determinadas.

La utilización de este tipo de aparatos es muy diversa pero cabe destacar las siguientes aplicaciones:

1) Se utilizan para proteger los circuitos y receptores instalados a partir de ellos, tanto cuando la anomalía proviene del circuito (caso de sobrecargas y cortocircuitos) como cuando proviene de la línea (caso de sobretensión).
2) Para protección de:motores, condensadores, rectificadores, transformadores, etc., así como la utilización para la conexión o desconexión de los mismos, siempre que la frecuencia de maniobra no sea muy elevada.
3) Como interruptores principales en instalaciones de alumbrado y fuerza, cuadros de distribución, etc., siempre que la frecuencia de maniobra no sea muy elevada.

4.1.2.- Tipos de interruptores automáticos.

Los tipos de interruptores automáticos que se pueden encontrar en el mercado son:

- Interruptores automáticos modulares.
- Interruptores automáticos de caja moldeada.
- Interruptores automáticos abiertos o de bastidor.

Cada uno de los tipos de automáticos anteriormente mencionados se diferencian entre sí, por la intensidad nominal a la que han de trabajar y por su poder de corte.

- **Interruptores automáticos modulares:**

Los interruptores automáticos modulares están destinados a la protección de conductores y receptores en instalaciones domésticas y análogas, aunque con la aplicación de las nuevas normas internacionales sobre aparamenta en baja tensión (EN 60.898), los sectores domésticos e industrial tienen un punto de encuentro al ampiar el campo de aplicación de los interruptores automáticos modulares a instalaciones industriales.

Los interruptores automáticos modulares permiten la protección de receptores, tanto en sobrecarga, como en cortocircuitos. Tienen establecida una intensidad nominal fija. Por esta razón, sólo pueden utilizarse con reservas, como protección única de un receptor, por sus características y por su adaptación a la intensidad nominal individual del receptor, no pueden ofrecer una protección tan sensible para un receptor como, por ejemplo, los interruptores automáticos de caja moldeada, los cuales pueden seleccionar mediante reguladores, tanto su disparo térmico, como el electromagnético, adaptándose de una forma más precisa a las característica del receptor que se ha de proteger o los relés térmicos de sobreintensidad. Estos automáticos sólo pueden ofrecer una protección poco precisa contra sobrecargas de un receptor.

Los PIA,s o pequeños interruptores automáticos tienen la ventaja de poder aprovechar mejor el espacio de instalación en armarios de distribución, lo cual hace posible un montaje rápido y uniforme por tener una reducidas dimensiones. Su dimensión modular es de 18 mm (un módulo), su altura frontal es de 45 mm y su profundidad de empotramiento es de sólo 53/55 mm. Van fijados a presión sobre perfiles simétricosnormalizados de 35 mm de ancho (DIN/EN 50.022) o sobre cualquier otro soporte de aparatos de igual anchura, el resto de las medidas están sujetas a las prescripciones de las normas DIN 43.880. Están provistos de un disparador térmico (bimetal) retardado para pequeñas sobreintensidades, que depende del tiempo de permanencia de la sobrecarga y de un disparador electromagnético instantáneo, para

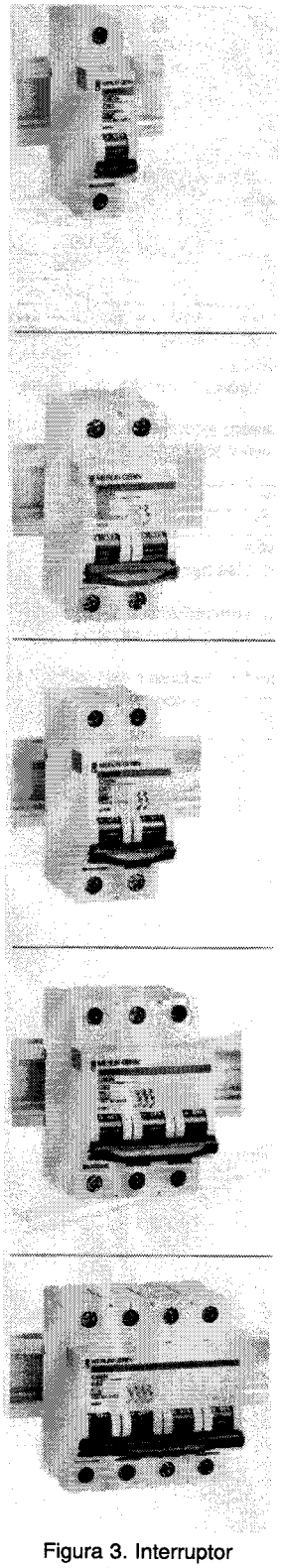


Figura 3. Interruptor automático modular.

sobreintensidades elevadas o cortocircuitos. En este último caso, por la desconexión rápida, los contactos se separan en menos de 1 ms.

La cámara de extinción del arco especialmente diseñada, reduce fuertemente la intensidad de cortocircuitos y la interrumpe mucho antes del paso por cero natural de las corrientes alternas. El material de los contactos es de plata especial, el cual ofrece una elevada seguridad contra la soldadura de los contactos y garantiza una larga endurancia (una media 20.000 maniobras) en operaciones de servicio normal.

Tanto el disparador térmico como el magnético, son calibrados en la fabricación, ya sea por sobrecarga o por cortocircuitos, el aparato se desconecta aunque se sujete la manecilla.

Los automáticos multipolares están acoplados no sólo mecánicamente por la manecilla de accionamiento, sino también internamente a través de los disparadores.

Hasta ahora el poder de corte de los automáticos modulares de que se puede disponer es de 10 kA y 4,5 kA a 380 V, pero con la aplicación de la nueva norma EN 60.898, el poder de corte de los PIA,s queda ampliado hasta 25 kA ya que se pretende incluir estos automáticos en el sector industrial donde, presumiblemente se presentan valores de intensidades de cortocircuitos considerablemente mayores que el sector doméstico. Los valores normales de poder de corte asignados expresados en kA son:

- 1,5 - 3 - 4,5 - 6 - 10 - 15 - 20 - 25.

El campo de los valores de corriente asignada en la norma EN 60.898 se ha extendido hasta 125 A en lugar del valor máximo de 75 A, previsto en la norma UNE 20.347.81; esta ampliación de la gama de intensidades de los interruptores modulares, ensancha considerablemente su campo de aplicación, y llena el vacío actualmente existente entre 75 y 100 A.

Los valores normalizados de la corriente asignada [In] quedan de la siguiente manera:

- 6, 10, 13, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, y 125 A.

- **Interruptores automáticos de caja moldeada:**

Los interruptores automáticos de caja moldeada son utilizados cuando la intensidad nominal de una determinada instalación está por encima de 125 A hasta unos 1250 A (según fabricantes). Estos pueden tener los disparadores térmicos y magnéticos regulables, adaptándose así al receptor a proteger y permitiendo que se pueda realizar una selectividad con aparatos aguas arriba o abajo.

El mecanismo de funcionamiento está concebido del tipo: apertura rápida, actuando el mecanismo de disparo, independientemente de la posición del mando manual con el fin de asegurar la apertura de los contactos en el caso de sobrecarga o cortacircuito. Dicha apertura es omnipolar, es decir, en los aparatos multipolo el mecanismo de apertura abre simultáneamente todos los polos.

Los aparatos se pueden accionar mediante el mando manual que indica claramente las dos posiciones fundamentales de funcionamiento: mando en posición superior (contactos cerrados) y mando en posición inferior (contactos disparados). También se le pueden acoplar a estos interruptores un mando rotativo.

El corte y extinción del arco se consigue a través de los contactos y de un conducto circundante (o toberas) a estos contactos.

Estos aparatos incorporan el corte plenamente aparente con lo cual la posición del mando manual no puede indicar "sin tensión", si no es que los contactos estén efectivamente abiertos y separados a una distancia conveniente. Opcionalmente pueden estar provistos de un doble aislamiento de la cara frontal que permitirá la instalación de auxiliares sin la unidad aislante.

Con el objetivo de cumplir adecuadamente sus misiones de mando y protección, los interruptores automáticos de potencia suelen estar provistos de toda una serie de mecanismos y dispositivos de desenganche o desconexión (relés auxiliares). A continuación citamos los más interesantes:

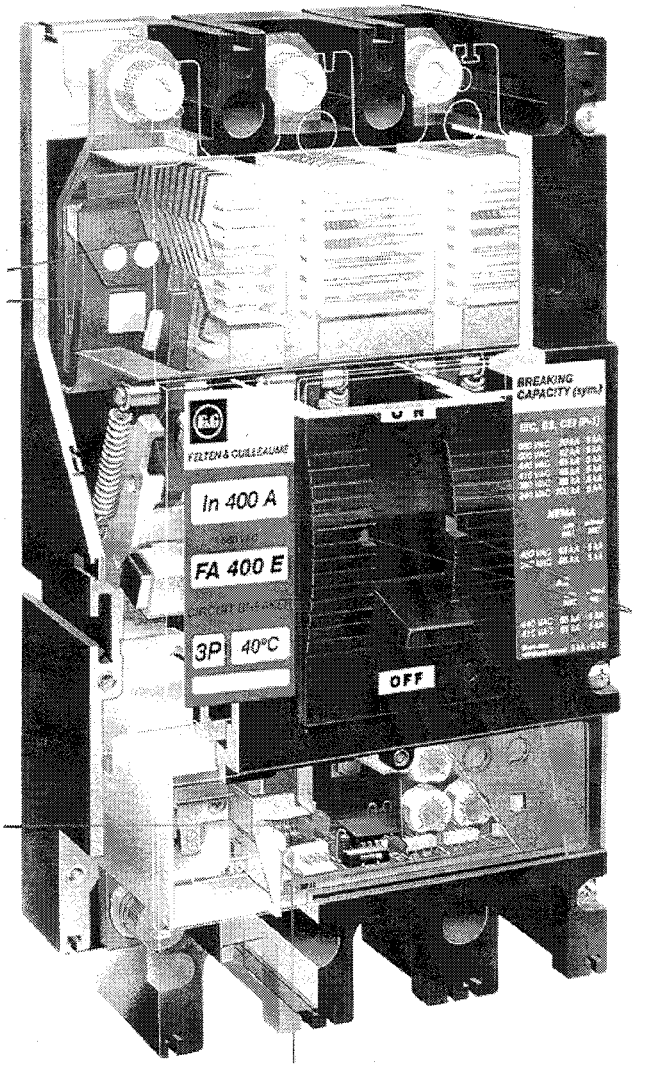


Figura 4. Interruptor automático de caja moldeada.

a) **Dispositivos de corte térmicos** con retardo dependiente de la corriente, que se utilizan para la protección contra sobrecargas.

b) **Dispositivos de corte electromagnéticos de sobreintensidad**, utilizados como desenganches rápidos para la protección contra cortocircuitos. Estos dispositivos actúan por atracción electromagnética no retardada (o sólo brevemente retardada) de una armadura y se ajustan, según los impulsos de carga admisibles, a un múltiplo de la corriente nominal, de forma que no reaccionan a las intensidades de arranque y a las sobrecargas normales de servicio. Los dos dispositivos de desenganche citados son atravesados por la corriente principal.

c) **Dispositivos de corte magnetotérmicos** constituidos por la combinación, en un sólo bloque, de los dispositivos térmicos contra sobrecargas y electromagnéticos contra cortocircuitos.

d) **Dispositivos de corte electromagnéticos con retardo** por dispositivo mecánico de freno, que tienen una curva "sobreintensidad-tiempo" que depende de la corriente y dispara sin retardo en caso de cortocircuito. Al contrario de lo que sucede con

los dispositivos térmicos de desenganche, el tiempo de desconexión es independiente de la carga previa: resultan insuficientes para la protección de motores con grandes picos de arranque.

e) **Dispositivos de corte electromagnético de mínima tensión**, que están conectados a la tensión de servicio y disparan al disminuir la tensión hasta un 50% de su valor nominal, aproximadamente, soltando su armadura magnética. De esta forma, impide el nuevo arranque automático de los motores u otros órganos protegidos. Al volver la tensión de servicio a un 70%, aproximadamente, de la tensión nominal permite la conexión de su interruptor. Mediante un dispositivo temporizador con un retardo de unos 2 s, en interruptores de 100 A en adelante, puede impedirse el disparo en el caso de caídas de tensión de corta duración. Los interruptores con dispositivo de desenganche de mínima tensión sin retardo pueden emplearse también para desenganche a distancia; para los que tienen dispositivo de retardo es necesaria una bobina de desenganche por corriente de trabajo. Para el disparo a distancia se interrumpe el circuito de la bobina de mínima tensión, o se puentea su bobina a través de una resistencia limitadora.

f) **Dispositivos de corte electromagnético de corriente de trabajo** (emisión de corriente). Se utilizan para el disparo a distancia, por cierre de su circuito de corriente, en interruptores de trinquete. Reaccionan con un 50% de su tensión nominal y se desconectan por medio de un contacto auxiliar del interruptor automático.

g) También se utilizan como dispositivo de corte las **bobinas de tensión**, las cuales pueden ser accionadas por un contacto auxiliar de un dispositivo de detección de corriente residual haciendo que el interruptor automático funcione también como diferencial.

h) Los relés limitadores asociados a un interruptor automático son muy importantes, pues hacen disparar al interruptor antes de que la corriente de cortocircuito llegue a su valor máximo, y de esta forma, se pueden utilizar interruptores automáticos con menor poder de corte que la intensidad de cortocircuito que se produzca en sus bornes (limitación).

En cuanto al poder de corte, en la norma CEI 157-1/UNE 20.103-1, coexisten, para un mismo interruptor automático dos niveles de poder de corte, P1 y P2, diferenciados por el ciclo de pruebas y por las exigencias después del ensayo de cortocircuito. La nueva norma CEI 947-2, elimina esta ambigüedad, a partir de su aplicación el poder de corte que caracteriza a los interruptores automáticos será el poder de corte último asignado (Icu) expresado en kA.

- **Interruptores automáticos abiertos o de bastidor:**

Los interruptores automáticos abiertos, tienen su utilización en instalaciones en las que la intensidad nominal es elevada y en las que se producen intensidades de cortocircuito importantes.

La gama de intensidades nominales oscila entre los 800 y los 6300 A de una forma general, aunque puede variar algo según los fabricantes y poder de corte hasta 50 kA.

Tienen las mismas características técnicas que los interruptores de caja moldeada con la salvedad de que los bloques de relés auxiliares o dispositivos de desenganche,

estánalimentados a través de un transformador de intensidad montador en su interior y son físicamente exteriores al interruptor.

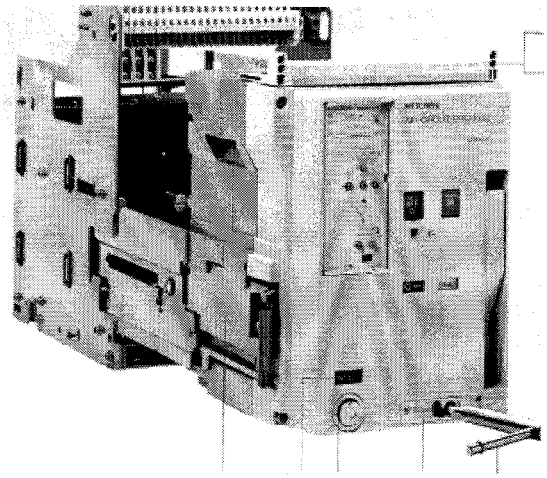


Figura 5. Interruptor automático de bastidor

4.1.3.- Funciones de los interruptores automáticos.

1) **Cerrar el circuito.**
   Por acción sobre el mecanismo al mínimo contacto, los receptores reciben alimentación en corriente; con la entrada en tensión, algunos receptores absorben valores de corriente netamente superiores al valor nominal In (ejemplo: motor 7 a 8 In durante algunos segundos). Para que estas sobreintensidades no den lugar a fenómenos nefastos para la zona de contactos (erosión producida por el arco), la aproximación al cierre debe ser brusca para valores In > 100 A.
   Para atender a todos los casos usuales sin problemas, los interruptores automáticos deben poder establecer corrientes de 15 a 20 veces superiores a su valor nominal.
   La realización de esta función requiere unas especificaciones ya que un interruptor automático debe estar siempre a punto para abrir, en caso de defecto en la instalación, incluso inmediaciones a su conexión o cierre.
2) **Conducir la corriente.**
   Esta función pasiva precisa de precauciones constructivas para responder a las prestaciones de calentamiento admisibles y posibilidad de apertura rápida.
   Y, además, si el interruptor automático es selectivo, puede precisar una capacidad electrodinámica elevada para soportar las corrientes de cortocircuito en el tiempo de selectividad, necesario para el funcionamiento de los aparatos situados aguas abajo.
3) **Abrir el circuito, cortar la corriente.**
   - Por acción voluntaria sobre el mecanismo manual o telemandado, cualquiera que sea la corriente.
   - Por acción refleja sobre el mecanismo provocada por el relé inmediatamente después de una sobreintensidad, ello provoca una apertura automática y definitiva del interruptor automático aunque el órgano de maniobra se mantenga en posición "cerrado".
   - Por acción de un relé auxiliar sobre el mecanismo:

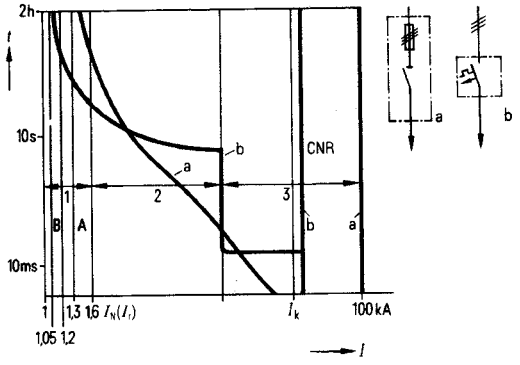
4) Asegurar el seccionamiento.

Cuando el interruptor está abierto se requiere un nivel de aislamiento entre partes "en tensión" y partes "sin tensión". Este nivel de aislamiento es el requerido para los ensayos dieléctricos prescritos en la norma CEI 947-2:

- Un ensayo de corriente de fuga máxima entre entrada y salida bajo una tensión Uemáx.
- Una tensión de choque superior (por ejemplo a 12,3 kV en vez de 9,8 kV exigibles para un aparato de un mismo tipo que no tenga esta función).
- Un ensayo de resistencia mecánica del mecanismo denominada "de contacto soldado".

4.1.4.- Ventajas acerca de la utilización del interruptor automático frente a el fusible.

En el diagrama de tiempo y corriente (figura 6) están trazadas la curva característica de fusión de un fusible de la clase de servicio gL y la curva característica de disparo de un interruptor de potencia. La corriente nominal del fusible y la corriente de ajuste del diparador con retardo dependiente de la corriente son iguales.



1 Rango de las corrientes límite
A Margen para la prueba de los fusibles
B Margen para las pruebas de las corrientes límite de disparo de los interruptores de potencia
2 Corrientes de sobrecarga
3 Corrientes de cortocircuito
CNR Capacidad nominal de ruptura

Figura 6. Curvas características y capacidad nominal de ruptura del fusible a y del interruptor automático b.

La corriente límite (menor corriente de fusión) del fusible está entre 1,3 y 1,6 veces su corriente nominal; la corriente límite (menor corriente de disparo) del disparador contra sobrecargas, en comparación, está entre 1,05 y 1,2 veces su corriente ajustada. Un interruptor con un disparador contra sobrecargas ajustable y, por tanto, con corriente límite de disparo también ajustable, puede adaptarse mejor a la cargabilidad permanente del objeto a proteger que un fusible, ya que éstos últimos solamente pueden adquirirse para valores determinados, cuyo escalonamiento solamente permite un adaptamiento aproximado a la cargabilidad del objeto a proteger. La corriente límite de los fusibles es adecuada para la protección de cables y conductores.

En la zona de sobrecargas, la pendiente de la curva característica de fusión del fusible es mayor que la pendiente de la curva característica de disparo del disparador contra sobrecargas del interruptor. Esto es adecuado para la protección de cables y conductores; para la protección de motores, por el contrario, se precisa la curva característica de disparo del disparador contra sobrecargas, cuyos tiempos son más largos.

En el rango de las corrientes de cortocircuito, el disparador del interruptor de potencia, a partir de su corriente de reacción, registra las corrientes de cortocircuito másrápidamente que el fusible. A corrientes más altas el fusible interrumpe más rápidamente que el interruptor. Si las corrientes de cortocircuito son súmamente elevadas el fusible limita la corriente de choque.

De estas características proviene la alta capacidad nominal de ruptura de los fusibles, de más de 100 kA a 660 V. En comparación, la capacidad nominal de ruptura de los interruptores de potencia depende de diversos factores, como son la tensión de servicio y la forma constructiva del interruptor.

La comparación de las características de los fusibles e interruptores de potencia la muestra la tabla 1.

Atendiendo a las funciones mencionadas anteriormente, se pueden especificar las siguientes ventajas:

a) *Recuperación automática.*
Cuando se produce en la instalación una anomalía (sobrecarga o cortocircuito), el mecanismo de disparo del interruptor automático actúa interrumpiendo el servicio donde se ha producido la misma. Posteriormente, mediante un accionamiento manual o automático, se rearma el interruptor restableciéndose el servicio. Por tanto, no es necesario disponer de repuesto como ocurría en el caso de los fusibles.

b) *Mecanismo de disparo independiente del mecanismo de mando manual.*
Una vez que ha disparado el interruptor automático como consecuencia de la presencia de una anomalía en la instalación es posible rearmar manualmente el mismo. Si a la hora de efectuar el rearme, la anomalía persiste, el mecanismo de disparo del interruptor actuará independiente del mecanismo de mando manual, interrumpiendo el servicio.

c) *Poder de corte elevado.*
El poder de corte de este tipo de aparatos es muy elevado de tal forma que es muy superior al valor de la intensidad de corriente que se produce en el caso de existir una sobrecarga. En este caso, es posible maniobrar sin peligro alguno, ya que el arco producido en la apertura o cierre de los contactos va a ser inofensivo a los mismos.

d) *Comprobación de sus características sin destrucción del mismo.*
Así como para comprobar experimentalmente la característica intensidad-tiempo de un fusible es necesario la destrucción del mismo, para comprobar la misma característica de los interruptores automáticos no es necesaria su destrucción debido a su propiedad de recuperación automática.

Característica	Fusible	Interruptor de potencia
Capacidad de ruptura para corriente alterna	100 kA, 660 V	f(I_u, U, forma constructiva [1])
Limitación de la corriente	f(I_N, I_k)	f(I_u, I_k, U, forma constructiva [1])
Espacio de extinción en comparación con la capacidad de ruptura	Pequeño	f(I_u, U, Forma constructiva)
Espacio adicional para la expansión y deionización de gases	Ninguno	f(I_u, I_k, I_k, forma constructiva [1])
Indicación externa visible de aptitud de funcionamiento	Si	No
Accionamiento sin peligro	Con gastos adicionales [2])	Si
Mando a distancia	No	Si
Desconexión en todos los polos	Con gastos adicionales [3])	Si
Posibilidad de señalización	Con gastos adicionales [4])	Si
Posibilidad de enclavamientos	No	Si
Disponibilidad de reconexión después de una desconexión por		
sobrecarga	No	Si
cortocircuito	No	f(estado)
Interrupción del servicio	Si	f(estado)
Gastos de mantenimiento	No	f(N^0 de maniobras, estado)
Selectividad	Sin gastos adicionales	Con gastos adicionales
Intercambiabilidad	Si [5])	Solamente con el mismo modelo

Tabla 1. Comparación de las características de los fusibles e interruptores automáticos.

4.1.5.- Elementos constituyentes de un interruptor automático.

Los principales elementos de que constan los interruptores son:

- Material soporte, bloques o bases.
- Elementos de protección contra anomalías de corriente.
- Elementos de protección contra anomalías de tensión.
- Contactos.
- Contactos auxiliares.
- Número de polos.
- Neutro seccionable.
- Cámaras apagachispas.
- Mando manual y eléctrico.
- Elementos de seguridad contra falsas maniobras.
- Protección contra agentes exteriores.

- **Material soporte, bloques o bases:**

Los bloques en los que se montan los elementos de los interruptores automáticos son de materiales cerámicos, resinas o plásticos termoendurecidos prensados, como melanina, baquelita, urea, micaina, poliestireno, cloruro de polivinilo, etc..

Estos bloques deben reunir unas condiciones de aislamiento. Las fases deberán estar aisladas suficientemente entre sí y entre fases y tierras (neutro) para soportar los ensayos previstos por las normas. Como las fases terminan en bornes y estos están encastrados en los bloques, el material del que esté fabricado deberá ser suficientemente dieléctrico para soportar las tensiones de ensayo con los espesores que tengan los tabiques entre bornes.

También reunir unas condiciones de carencia de higroscopicidad, debido, a que, como consecuencia de las tensiones y temperaturas que deben soportar, se puede correr el peligro de arcos cebados por causa de la humedad.

Entre otras propiedades que debe presentar este material se encuentran las características mecánicas para poder soportar el peso de todos los elementos que componen el interruptor, los esfuerzos electrodinámicos de las corrientes de cortocircuito, etc..

- **Elementos de protección contra anomalías de corriente:**

Las fuentes de energía de las instalaciones eléctricas son los generadores. Estos generadores, a pesar de la perfección de su diseño y construcción, presentan una impedancia interna. Esta impedancia interna produce dos efectos muy importantes:

- En régimen normal, esta impedancia provoca una caída de tensión de vacío, llevándola al valor de servicio o nominal Un cuando el generador provoca la circulación de una corriente In.
- En caso de cortocircuito, esta impedancia limita la corriente a un valor, que normalmente se expresa en múltiplos de In.

Si tomamos el caso de los transformadores, su tensión de cortocircuito Ucc (en %) corresponde al límite superior de su caída de tensión relativa para In. A título de ejemplo, a una tensión de cortocircuito del 5 % corresponde un valor de Icc de In/5% = 20In que para un transformador de 1000 kA y 400 V toma un valor de 29 kA.

Es fácil imaginar los daños que puede ocasionar en una instalación una corriente de esta magnitud (calentamiento y esfuerzos electrodinámicos que son proporcionales al cuadrado de la corriente). Así aunque se tomen las máximas precauciones para que estas corrientes no se presenten, es necesario prever los dispositivos de protección capaces de cortar las corrientes de cortocircuito.

- *Tipos de corrientes a cortar.*

El sólo conocimiento del valor de la corriente a interrumpir no es suficiente para la concepción de un dispositivo apropiado de corte. La interrupción de las corrientes es función de múltiples parámetros condicionados por los generadores (alternadores o transformadores),líneas y receptores.

Un circuito eléctrico es siempre inductivo por lo que las variaciones de corriente a cortar generan, a partir de la apertura del circuito, unas contratensiones, que contribuyen al mantenimiento de la corriente. Esta fuerza contraelectromotriz, de tipo Ldi/dt puede presentar un valor importante, cualquiera que sea el valor de la corriente i, en el instante de la anulación de dicha corriente.

El valor resistivo del circuito a cortar contribuye al corte, siempre que la corriente tenga un valor significativo y no presenta ninguna ayuda cuando i =0 en cuyo caso la caída de tensión óhmica resulta despreciable.

Las capacidades entre conductores activos, tanto si están repartidas (capacidades parásitas de generadores y cables) o adicionales (batería de condensadores de compensación de energía reactiva o de filtro), modifican las condiciones del corte.

La frecuencia de la corriente a cortar, ya que en principio parece más fácil cortar una corriente alterna con sus pasos periódicos por valor cero, que una corriente continua.

Finalmente, por la tensión permanente producida por el generador, el aparato de corte debe, una vez anulada la corriente, resistir dieléctricamente la tensión de red, siempre presente.

En la práctica se definen tres tipos de corriente a cortar:

1) Corriente de cortocircuitos.

Su valor depende de las características del generador, 30 % > Ucc > 7 % por ejemplo.
- Según que el defecto sea más o menos rígido.
- Según la longitud y sección de las líneas aguas arriba.

Su valor será mucho mayor si muchos generadores están acoplados en paralelo.

2) Corriente de sobrecarga.

La corriente puede rebasar el valor nominal y resultar inaceptable a partir de un cierto tiempo.
- Durante el período transitorio de arranque o de funcionamiento de un receptor.
- Si la suma de las potencias de los receptores en funcionamiento rebasa las precisiones del diseñador para toda o parte de la instalación (coeficiente de funcionamiento).

3) Corriente nominal.

Un interruptor automático destinado a cortar las fuertes corrientes de cortocircuito y de sobrecarga, podrá con corrientes menores: este aparato de corte podrá asegurar el mando y protección en los circuitos receptores.

En este apartado tan sólo se van a mencionar las principales protecciones contra estas anomalías, entrando en más detalle posteriormente. Existen interruptores automáticos que tienen:

a) Protección térmica, constituido por un bimetal.
b) Protección magnética.
c) Protección magnetotérmica, que actúan independientemente sobre el mecanismo de disparo.

- **Elementos de protección contra anomalías de tensión:**

En general se pueden presentar dos tipos de anomalías de tensión:

- Sobretensión.
- Subtensión o falta de tensión.

Los interruptores automáticos llevan incorporadas unas bobinas que detectan y desconectan el circuito protegido cuando se presentan estas anomalías.

- **Contactos:**

Los contactos de los interruptores automáticos de baja tensión constituyen partes de elementos conductores que trabajan con presión entre sí, en la misma dirección de desplazamiento (figura 7), no como los contactos de "cuchilla" de muchos interruptores. Especial atención merecen dos fenómenos físicos que están directamente ligados a la naturaleza de los materiales empleados y a las fuerzas de contacto.

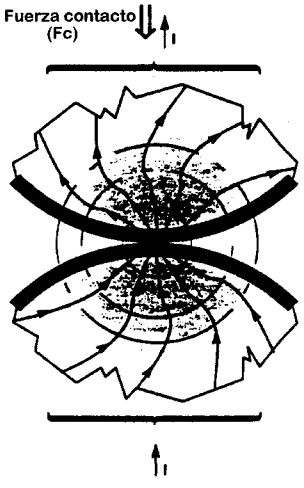


Figura 7. Fuerza en el contacto.

- Resistencia de contacto:

Su valor debe ser el menor posible ya que condiciona la potencia y energía desarrollada en el punto de contacto, que debe evacuarse por conducción. Los calentamientos producidos por este fenómeno pueden acelerar la oxidación y corrosión. Para preservarlos de esta acción, los contactos pueden ser de cobre hasta unos 100 A y a partir de este valor han de ser de aleaciones de plata o recubrimientos superficiales a base de este metal.

Al producirse el paso de grandes corrientes, en el punto de contacto, la potencia generada puede superar, en mucho, la potencia disipable. En este caso, la zona de contacto alcanza y rebasa la temperatura de fusión del material; para evitar la soldadura de los contactos, éstos se construyen de una mezcla heterogénea, por ejemplo con adición de teluro o de carbono. La técnica de contacto único se emplea hasta In = 630 A. Para mayores valores nominales es recomendable utilizar varios "dedos" de contacto en paralelo.

- Repulsión por estricción:

Por efecto de interacción magnética entre las líneas de corriente "radiantes", aparece una fuerza de repulsión de los contactos que llamamos de repulsión de estricción. Esta fuerza produce consecuencias nefastas ya que durante su acción hay:

- Erosión inútil de las pastillas de contacto por la energía de arco.
- Riesgo de soldadura ó microsoldadura, si los contactos no están separados.
- Creación de puntos calientes que favorecen el estancamiento del arco y la emisión termoiónica; comprometiendo las condiciones de extinción de arco en su fase de regeneración. Para mejorar las condiciones de solicitación electrodinámica, por encima de In 30 A, la repulsión de estricción recomienda utilizar la técnica multicontactos. Resumiendo: la elección de los materiales y la fuerza de contactos son determinantes en cuanto a la resistencia de contacto, al umbral de repulsión y también a otros aspectos como erosión, microsoldaduras, etc..

Cuando un interruptor en servicio está cerrado existe una cierta presión entre las piezas de contacto que hace que su superficie común de contacto efectivo sea máxima y si circula una corriente, la densidad de corriente en ella será mínima. En la maniobra de apertura, al iniciarse el despegue de los contactos, lo primero que se tiene es una disminución de presión y de superficie con el consiguiente aumento de la densidad de corriente. En el instante de la separación de los contactos, la ligera capa de aire que se interpone entre ellos es atravesada por la corriente, lo que determina una elevación rapidísima de su temperatura que da lugar al resplandor azulado, extremadamente brillante de la chispa, a la vez que se tiene un elevado campo eléctrico entre los contactos capaz de producir una fuerte emisión de electrones en el contacto que hace de papel de cátodo.

Los materiales a emplear para la ejecución de los contactos deben poseer:

- Baja resistividad eléctrica.
- Elevadas temperaturas de fusión.
- Elevada resistencia a la corrosión.
- Elevada resistencia a la oxidación.
- Elevada resistencia a los agentes atmosféricos.
- Elevada resistencia mecánica a la percusión.
- Elevada resistencia mecánica al frotamiento.

Los materiales que cumplen estas características son principalmente los metales preciosos:

- Oro y platino.
- Tungsteno y sus aleaciones.
- Plata y sus aleaciones.

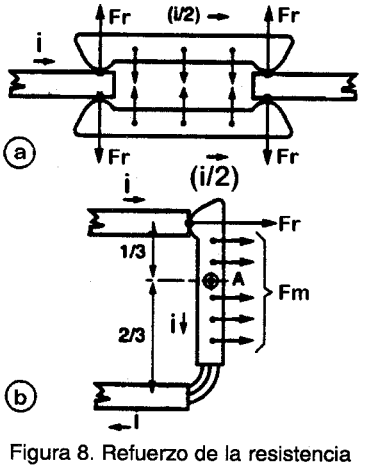


Figura 8. Refuerzo de la resistencia electrodinámica.

Suelen ser de cobre hasta unos 100 A y a partir de este valor han de ser de aleaciones de plata o recubrimiento superficiales a base de este metal.

- **Contacto móvil:**

Para fuertes corrientes, a partir de 15 In, se aprovechan una serie de fenómenos como:

- Para aparatos que deben permanecer cerrados, se refuerza la resistencia electrodinámica por un efecto de compensación, con la corriente propia. Son posibles varias disposiciones:
  - Por atracción mutua, sistema utilizado en interruptores con apertura impedida ante puntas de corriente (figura 8a).
  - Por repulsión equilibrada, sistema utilizado con los interruptores automáticos de fuerte intensidadnominal (figura 8b). Estos interruptores, situados normalmente en cabecera de instalación, son de disparo temporizado para obtener selectividad; su resistencia electrodinámica debe ser elevada, a nivel de valores de cortocircuito "20 In".

- Para aparatos que deban abrir y cerrar rápidamente, se mejoran las condiciones de repulsión del contacto móvil para obtener lo antes posible una tensión de arco. Son posibles varias soluciones: (figura 9):
  - Un simple circuito de repulsión.
  - Una doble repulsión (habitualmente con un doble contacto).
  - Con "martillo" o "extractor", un núcleo magnético empuja o tira del contacto móvil. Los efectos de repulsión pueden reforzarse utilizando circuitos magnéticos.
  - Con efectos proporcionales al cuadrado de la corriente:
  - circuito prolongado en U (figura 10a);
  - circuito expulsor en X (figura 10b).
  - Con efectos proporcionales a la pendiente de la corriente (di/dt) con particular eficacia para fuertes corrientes (Icc) (figura 10c).

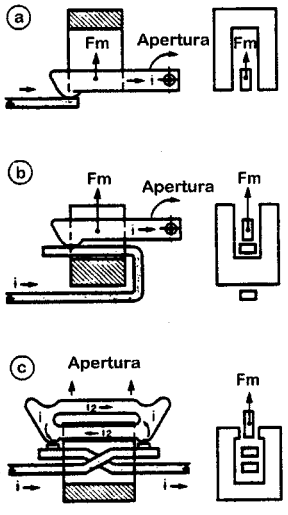


Figura 9. Dispositivos de repulsión de los contactos.

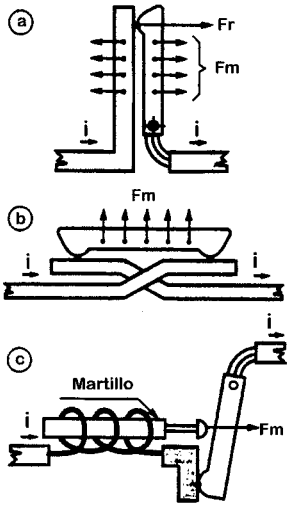


Figura 10. Principio de repulsión de los contactos.

Podemos esperar que los contactos móviles se reenganchen "ellos sólos" transcurrido un tiempo de apertura no reabriendo definitivamente salvo el caso que el cortocircuito no haya sido eliminado por un interruptor automático situado aguas abajo.

- **Contactos auxiliares:**

Los contactos auxiliares sirven para abrir o cerrar circuitos distintos del principal o de potencia, tales como señalización, circuitos de mando y control, etc..

En general se llaman contactos auxiliares abiertos aquellos que están abiertos cuando los contactos principales están cerrados. Se llaman contactos auxiliares cerrados cuando ocurre lo contrario.

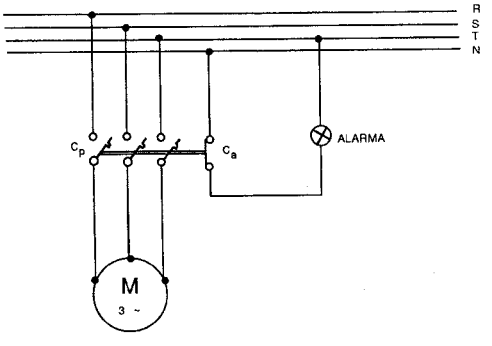


Figura 11. Contacto auxiliar.

La figura 11 muestra un ejemplo de empleo de los contactos auxiliares, donde la actuación del guardamotor activa una señal de alarma.

- **Número de polos:**

Los interruptores automáticos pueden ser: unipolares, bipolares, tripolares y tetrapolares. Si se producen anomalías en alguna de las fases, se dispara el automático correspondiente arrastrando consigo a las restantes, efectuándose la ruptura en todas ellas al mismo tiempo.

Es evidente que no es aconsejable la protección de motores, transformadores, rectificadores, etc., con interruptores automáticos unipolares.

El uso de los interruptores automáticos unipolares queda reservado casi exclusivamente a la protección de instalaciones de alumbrado, donde el propio interruptor automático hace las veces de interruptor de apertura y cierre del circuito. La actual normativa del Ministerio de Industria prohíbe el empleo de interruptores automáticos unipolares en instalaciones de baja tensión, sustituyéndose por bipolares (figura 12).

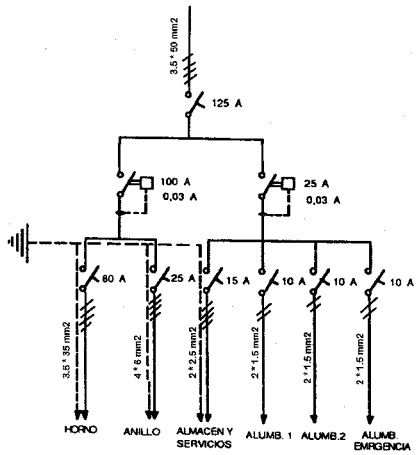


Figura 12. Protección con un sólo polo

- **Neutro seccionable:**

Es un contacto diferencial de los auxiliares, que abre con retraso respecto a los contactos principales para permitir la descarga estática de interruptor automático por el neutro y cierra con cierta antelación para que, en el caso de que las fases estén desequilibradas, este desequilibrio encuentre hilo de retorno.

- **Cámaras apagachispas:**

La función esencial de esta zona es mantener la tensión de arco a un valor conveniente y al mismo tiempo absorber la energía desarrollada por el arco (esta energía es a veces, enorme: si Ua = 500 V e I_{cc} = 10.000 A, durante 2 ms, resulta que P_a = 5 MW y W_a = 10 kJ).

Esta zona debe satisfacer también las condiciones suficientes de regeneración dieléctrica para garantizar la ruptura definitiva al paso de la corriente por cero, a pesar de la presencia de la tensión de la red y la transitoria de restablecimiento. Los fenómenos físicos a considerar, para garantizar el corte de la corriente, no son todos esencialmente eléctricos: los térmicos (fusión, sublimación, evaporación), los aerodinámicos, las radiaciones, juegan un papel igualmente importante en los balances instantáneos de energía.

El principio básico de una cámara de ruptura consiste en desplazar el arco contra una batería de separadores o plaquetas, dispuestas transversalmente a la columna del arco con el fin de:

- Fraccionarlo en una serie de arcos elementales, tantos como espacios interseparadores, con los que cada uno de ellos producirá una caída de tensión de arco mínima de 20 a 40 V por el fenómeno de caídas anódica y catódica (figura 13a). La caída de tensión de arco, cuando este está fraccionado, podemos calcularla:

$$Ua \approx NU_{AC}+(L-Ne)U_L$$
$$Ua \approx N*20+ (L/2)*.75 \text{ si } Ne= (L/2)$$

siendo:

e: espacio entre dos separadores;
N: número de separadores;
L: longitud de la cámara de ruptura. Por ejemplo: si N = 10 y L = 40 cm. Ua = 200 + 150 = 350 V.

- Almacenar, por calentamiento o licuefacción temporal de los separadores, la energía producida, en condiciones de fuertes corrientes, en la columna de plasma.

  Pero en unas condiciones determinadas, existe un límite superior de la intensidad por encima del cual, el arco permanece entre los separadores a pesar de los intercambios térmicos producidos, (figura 13b). Si el arco no puede, en estas condiciones extinguirse, hemos rebasado la capacidad de corte del aparato en cuestión.

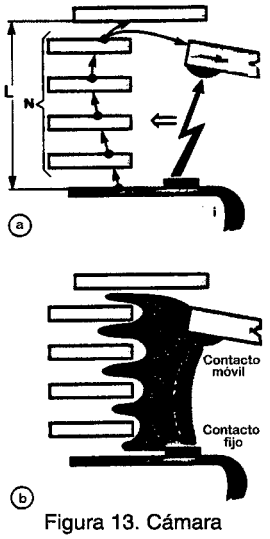


Figura 13. Cámara apagachispas.

• ***La precámara:***

Esta zona comprende el volumen de separación entre la zona de contactos y la cámara de arco o de ruptura, es decir, las plaquitas separadoras o divisoras del arco.

Su disposición es necesaria y generalmente indispensable para:

- Evitar el estancamiento del arco entre los contactos (erosión y puntos calientes); el apagachispas inferior contribuye a asegurar el desplazamiento de la base del arco desde los contactos fijos hacia el interior de los separadores de la cámara.
- Favorecer un alargamiento del arco más rápido y mayor que el que se provoca por la simple separación mecánica de los contactos.
  Los efectos magnéticos ya indicados por la repulsión del contacto móvil, también contribuyen a la consecución de estos objetivos, actuando sobre la corriente del arco.

  Además de este soplado magnético, un soplado real aerodinámico aparecerá si la energía del arco naciente vaporiza o sublima parte de los materiales gasógenos.

  En fin, una presión, inevitable al producirse la ruptura de fuertes corrientes en un recinto cerrado, favorece la evolución de la tensión de arco, ya que:
  - La sección derecha de la columna de arco se encuentra reducida y su resistencia incrementada.
  - Las diferencias de presión entre esta zona (sobrepresión debida al arco) y el fondo de la cámara de ruptura (presión atmosférica) favorecen su entrada y permanencia en el interior de la cámara.

• ***Elementos complementarios:***

El fondo de la cámara, las rejas o toberas de escape de los gases favorecen la ruptura:

- En la zona del fondo de los separadores, el empleo de rejillas aislantes en las que la distribución y el calibrado de los orificios contribuyen a que la cámara trabaje igualmente de arriba a abajo y de delante atrás de los separadores.
- Casi siempre, las rejas aislantes o metálicas que permiten la comunicación de la zona de ruptura con el exterior, aseguran un filtrado y sobre todo, un enfriamiento de los gases.

- ***Doble ruptura:***

Se puede mejorar el poder de corte con el sistema de doble ruptura con una cámara, apagachispas por punto de ruptura. La potencia eléctrica del arco, transformada en calorífica se reparte entre cada cámara, con lo que se puede interrumpir una potencia doble.

Es preciso un perfecto reglaje de los contactos para que abran al unísono porque de no ser así, en el caso de rupturas en paralelo, el último contacto en abrir será el más perjudicado, ya que al abrir el primero no se producirá arco por ser toda la intensidad conducida por el segundo contacto, aún cerrado, y por tanto en condiciones de conducción.

- **Mando manual y eléctrico:**

La mayoría de los interruptores automáticos de baja tensión son de mando manual. Los elementos de mando manual más generalizados son pulsadores, manetas, palancas o manivelas y mandos rotativos.

La palanca o manivela indica una intensidad considerable, porque es necesario una fuerza para la prensión de los contactos. La maneta se emplea en los interruptores automáticos de pequeña intensidad. El mando a distancia se realiza por un dispositivo eléctrico, tal como un solenoide alimentado por un relé de control. El fin perseguido por este mando es centralizar los mandos en una mesa, pupitre o tablero o bien, cuando se trate de tensiones que pueden llegar a 600 V, aislar al operario de condiciones peligrosas.

Otro sistema de mando a distancia es por motor. Mediante pulsadores se puede mandar desde el pupitre o cuadro la apertura o cierre de interruptor. El disparo a distancia se puede realizar mediante una bobina llamada "bobina de disparo por emisión de corriente". Al paso de una corriente por esta bobina producida por un pulsador, la bobina atrae una armadura que llega a hacer tope con su núcleo y mediante un juego de palancas acciona el mecanismo de disparo. Una vez realizado el disparo la bobina se desenergiza y la armadura se separa del núcleo.

- **Elementos de seguridad contra falsas maniobras:**

Enclavamiento de puertas: En los interruptores automáticos en cabina o armarios hay unos enclavamientos de seguridad, para que las puertas no se puedan abrir con el interruptor automático conectado y, por tanto, haya tensión en el circuito protegido.

Enclavamiento con llave: Se puede fijar la posición de desconectado mediante una llave en las palancas o manivelas de algunos interruptores automáticos destinados a salidas de cuadro o protección de línea. De esta forma enclavado el interruptor automático se puede trabajar con la tranquilidad de no ser electrocutado.

- **Protección contra agentes exteriores:**

Los interruptores automáticos deben de cumplir unas exigencias de protección contra agentes atmosféricos. Estas exigencias vienen impuestas por las normas DIN, aceptadas en nuestro país, y que se resumen en:

Sin protección contra contacto fortuito de dedos, ni contra entrada de cuerpos extraños ni agua	P00
Protección contra goteo en construcción abierta	P01
Protección contra contactos fortuitos	P10
Protección contra goteo y contactos fortuitos	P11
Protección contra contacto de dedos y entrada de cuerpos sólidos pero no de agua	P20
Protección P20 y contra goteo	P21
Protección de contacto de útiles y de entrada de cuerpos sólidos, pero no de agua	P30
Protección P30 y contra lluvia o goteo	P31
Protección de todo contacto, de polvo y contra la aspersión de agua	P43
Protección P43 y estanco al agua en todas las direcciones	P44
Protección P43 y estanco a chorro de agua en todas las direcciones	P54

Tabla 2. Protección contra agentes exteriores.

4.1.6.- Clasificación atendiendo a la función de protección.

Los elementos de protección de un interruptor automático se resumen en:

Elementos de protección	
Contra anomalías de corriente	**Contra anomalías de tensión**
Térmico	Bobina de disparo por sobretensión
Electromagnético	Bobina de disparo por baja tensión

Tabla 3. Elementos de protección de un interruptor automático.

- **Protección Térmica:**

Normalmente el dispositivo de protección térmica contra las sobrecargas es del tipo "tiempo dependiente" y se trata de un sistema indirecto. Es preciso conocer la curva tiempo-corriente admisible del aparato que tenemos que proteger y si no es así la aplicación de relés térmicos que cumplan con las normas UNE y CEI, suele ser suficiente.

El elemento básico es un bimetal. El bimetal está formado por la soldadura al vacío de dos láminas de muy diferente coeficiente de dilatación(generalmente ínvar y ferroníquel). Al circular la corriente eléctrica, los bimetales se calientan y curvan. Al llegar su curvatura a un punto determinado se acciona un mecanismo o deja en libertad un resorte que es el encargado de originar el disparo en el interruptor automático.

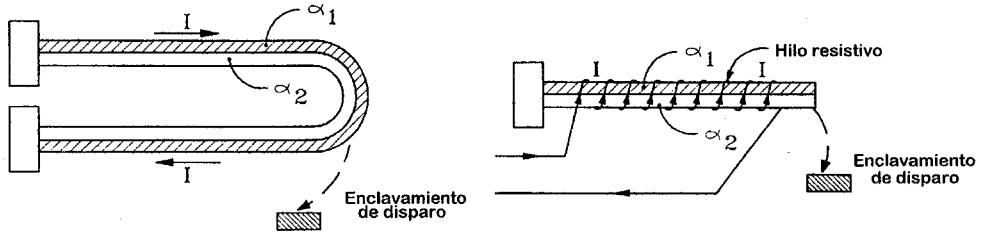


Figura 14. Bimetales de caldeo directo e indirecto.

Los bimetales pueden ser de caldeo directo o indirecto, los primeros se emplean hasta 15 A y los segundos su rango es a partir de 15 A y en ellos el bimetal se calienta debido al paso de la corriente por un hilo resistivo arrollado sobre él.

En un interruptor por el que pasa una intensidad eficaz I se producirá en un tiempo t una cantidad de calor:

$$Q = k * R * I^2 * t \qquad (2)$$

si se considera constante la pérdida de calor desde que se produce el disparo $I^2*t=K$, resultará la expresión analítica de una curva hiperbólica (en realidad R y Q no son constantes). Combinando la variabilidad de ambas magnitudes con los diferentes coeficientes de dilatación térmica de los metales, se obtienen bimetales diferentes para cada tipo de receptor (motores, líneas, rectificador, etc.). La curva real se obtiene por métodos empíricos y de ensayo.

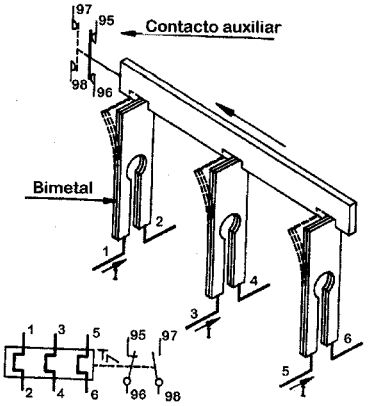


Figura 15. Estructura básica de un relé térmico.

El interruptor automático con protección térmica sólo se emplea para proteger frente a las sobrecargas, para proteger contra los cortocircuitos no responderían con la suficiente rapidez, debido a la inercia inherente al sistema bimetálico el cuál sufriría deformaciones irreversibles dada su poca masa y escasa capacidad térmica. Por tanto, cuando se utilizan deben ir asociados a otro elemento que proteja contra los cortocircuitos. Un ejemplo de interruptor automático térmico es el guardamotor.

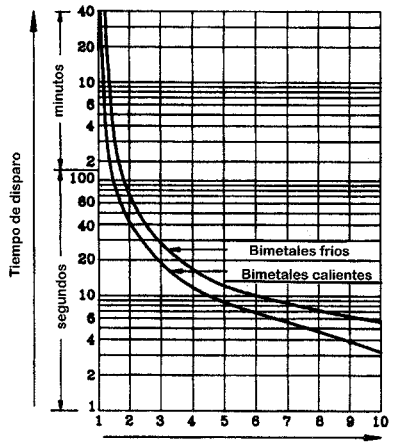


Figura 16. Característica tiempo-corriente de un relé térmico.

- **Protección Magnética:**

El elemento básico de esta protección es una bobina con su núcleo por la que pasa toda o una parte de la corriente de la carga. Al paso de una determinada corriente se produce una fuerza que atrae a una armadura móvil provista de un juego de palancas y resortes accionando el mecanismo de disparo del interruptor automático.

Hay dos factores que contribuyen a que el disparo no sea instantáneo:

- La inercia propia del sistema mecánico de resortes y palancas.
- Al ser la bobina un circuito inductivo, ni el flujo ni la corriente se anulan de forma instantánea en sentido estricto.

Las curvas de tiempos de disparo en función de la intensidad (figura 17), se reducen prácticamente a una recta paralela al eje de tiempos, con una abscisa que es la intensidad a la cuál está calibrado para que se produzca el disparo. La zona rayada corresponde al margen de disparo, el interruptor se disparará o no.

- **Bobina de Disparo por Sobretensión:**

Las sobretensiones se producen por falsas maniobras, bien en las subestaciones de las empresas distribuidoras de energía o bien en las subestaciones que reciben en alta yhacen la transformación para alimentar sus circuitos de fuerza y alumbrados. Estas bobinas son arrollamientos con núcleo de hierro y una armadura móvil, conectadas en paralelo con el circuito principal. Cuando la tensión es la nominal, las bobinas son recorridas por una corriente incapaz de atraer a la armadura, pero si sobreviene una tensión superior a la nominal (preestablecida por el fabricante), la intensidad será ahora capaz de atraer a la armadura y mediante un juego de palancas y resortes disparará al interruptor automático.

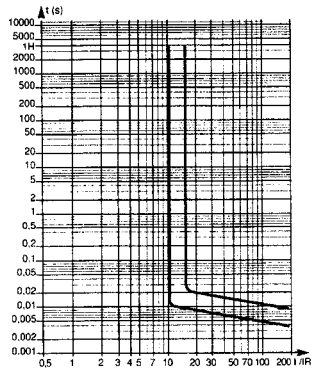


Figura 17. Curva de disparo para interruptores magnéticos.

- **Bobina de Disparo por Mínima Tensión:**

Estas bobinas hacen que el interruptor automático se dispare cuando la tensión de línea baja de unos límites preestablecidos por el constructor protegiendo así los circuitos receptores.

En el caso de un motor la baja tensión provoca una sobrecarga puesto que, si tiene que arrastrar una carga determinada el par prácticamente será constante; si la potencia es constante y la tensión es inferior a la nominal ocurre que aumentan las intensidades de corriente y decrecen las corrientes magnetizantes y de pérdidas en el hierro, (aparte de la repercusión que tiene en el factor de potencia de la instalación), todo ello según la magnitud de la falta de tensión. Al aumentar la intensidad de corriente que demanda la carga, aumentan las pérdidas en el cobre pero en mayor proporción en que disminuyen las del hierro, porque, además de crecer la corriente, al aumentar la temperatura aumentará o crecerá ligeramente la resistencia de los devanados. Como las pérdidas por rozamiento y las pérdidas adicionales son prácticamente constantes, el conjunto total de pérdidas aumenta y como consecuencia final disminuye el rendimiento.

CLASIFICACIÓN DE LOS I.A. EN FUNCIÓN DE LA PROTECCIÓN PRESTADA			
DEFECTOS	TIPOS DE INTERRUPTORES A.	DISPARO	APLICACIÓN
CONTRA ANOMALÍAS DE CORRIENTE	I.A.DE PROTECCIÓN TÉRMICA (GUARDAMOTOR)	Puede ser diferido de corta o larga duración	Guardamotores
	I.A. DE PROTECCIÓN MAGNÉTICA	Instantáneo	Protección de arrancadores
	I.A.PROTECCIÓN MAGNETOTÉRMICA	Térmico: de 4 a 10 I_n y Magnético: de 3 a 20 I_n	Protección de líneas de distribución
	I.A. SELECTIVO	Por disparo instantáneo y disparo diferido de corta y larga duración	Protección general
	I.A.ELECTRÓNICOS	Selectivo	Protección general
CONTRA ANOMALÍAS DE TENSIÓN	I.A. CONTRA BAJA TENSIÓN	Instantáneo	Protección en cabecera de las instalaciones particulares
	I.A. CONTRA SOBRETENSIONES	Instantáneo	En cabecera

Tabla 4. Clasificación de los interruptores automáticos según su protección y según su aplicación.

4.1.7.- Curvas de disparo.

Las curvas de funcionamiento de los interruptores automáticos se caracterizan por las siguientes corrientes de referencia:

In: Intensidad nominal. Corriente a la cual se refiere todas las especificaciones de construcción del aparato y que representa el valor unitario en la curva de funcionamiento.
Inf: Intensidad de no funcionamiento. Valor máximo de sobreintensidad que no hace disparar al interruptor dentro del tiempo convencional.
If: Intensidad de funcionamiento. Valor mínimo de sobreintensidad que hace actuar al interruptor dentro del tiempo convencional.
I_{m1}: Sobreintensidad mínima que puede hacer actuar al disparador electromagnético.
I_{m2}: Sobreintensidad mínima que hace actuar al disparador electromagnético.

Estas corrientes características adoptan diversos valores en función de la norma de referencia según el siguiente tabla.

Norma	Corriente nominal [A]	Inf/In	If/In	Tiempo convencional [h]
UNE EN 60.947-2	£ 63 > 63	1.05 1.05	1.30 1.30	1
UNE EN 60.898	£ 63 > 63	1.13 1.13	1.45 1.45	1

Tabla 5. Umbrales de disparo del relé térmico en interruptores automáticos.

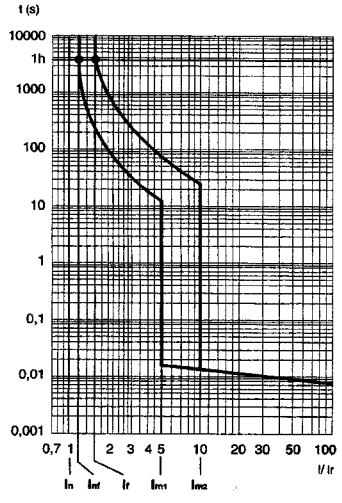


Figura 18. Curva de funcionamiento de un interruptor automático.

En los interruptores automáticos, independentemente del tipo de relé que equipen, pueden tener disparos diferidos en:
- Disparo diferido de corta y larga duración en la protección térmica.
- Disparo diferido de corta y larga duración en la protección magnética.

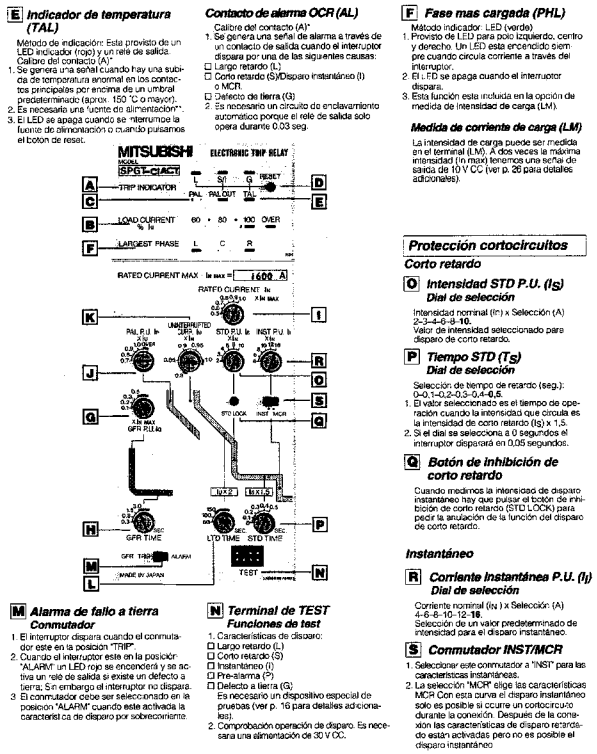


Figura 19. Ajuste de la curva de disparo de un interruptor automático equipado de relé electrónico.

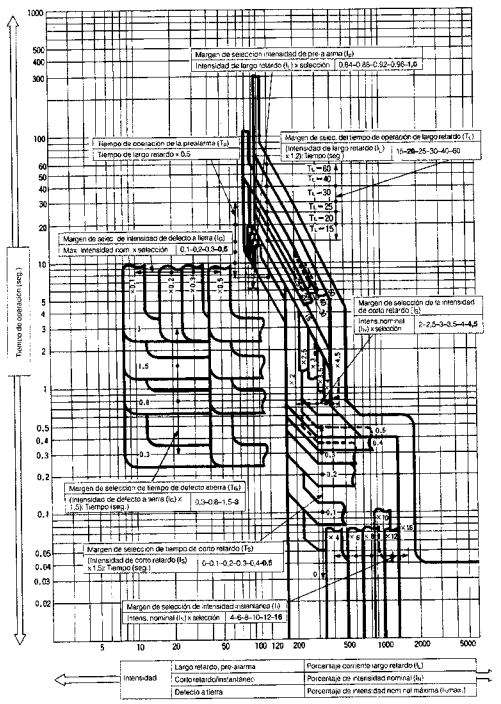


Figura 20. Curva de disparo de un interruptor automático con relé electrónico.

Los interruptores automáticos poseen características de desconexión, las cuales están adaptadas a las características de calentamiento de los conductores. La corriente de disparo magnético (o instantáneo) se define como el mínimo valor de corriente que provoca la apertura automática del interruptor sin retardo intencionado.

En la norma UNE 20.347.81 se definían las características de intervención instantánea, para cada una de las cuales viene fijado un intervalo, múltiplo del calibre (Int), entre los cuales debe situarse el valor mínimo de disparo instantáneo. Para la característica U, el límite inferior es 3,5Int y el límite superior 8Int y para la característica L el límite inferior era 2,4Int y el superior 3,5Int.

En la norma EN 60.898, los interruptores automáticos se clasifican según los valores de la corriente de disparo magnético, según: tanto en los disparos magnéticos, como también para los térmicos, hemos visto que los valores de corriente están relacionados con la corriente asignada (In) y no con el tamaño (Int) como ocurría con la norma anterior.

TIPO	No disparo	Disparo
B	3In	5In
C	5In	10In
D	10In	20In

Tabla 6. Umbrales de disparo del relé magnético en interruptores automáticos según EN 60.898.

También en este caso resulta ser más clara la definición de las características. La verificación de conformidad en lo que a características de disparo magnético se refiere, se efectúa según la tabla adjunta: Las características de actuación B y C de la nueva norma corresponden, con ligeras modificaciones, a las curvas L y U definidas en la UNE 20.347.81, por lo que su elección se rige por los mismos criterios según el tipo de utilización. La característica D, no definida en la norma anterior, es la prevista para interruptores que realizan la protección de cables que alimentan cargas con fuertes corrientes de arranque, por ello, poseen unos valores de corriente de intervención magnética sensiblemente más elevados, es decir: Características L equivalente a la característica B (misma aplicación), Característica U equivalente a la C (misma aplicación), Característica D disparos magnéticos largos (equipos de arranque con puntas fuertes).

1: Valor constante de corriente de no desconexión. Int =1,13*In; t>1h
2: Valor constante de corriente de desconexión. It =1,45*In; t<1h
3: 2.55*In: t< 1m (In 32A)
t< 2m (In >32A)
4: 2.55*In: t< 1s
5: Tipo B: 3*In: t 0.1s
6 5*In: t<0.1s
7: Tipo C: 5*In: t 0.1s
8 10*In: t<0.1s
9: Tipo D: 10*In: t 0.1s
10: 20*In: t<0.1s

Estas curvas se diferencian básicamente por los márgenes de funcionamiento del disparo magnético.

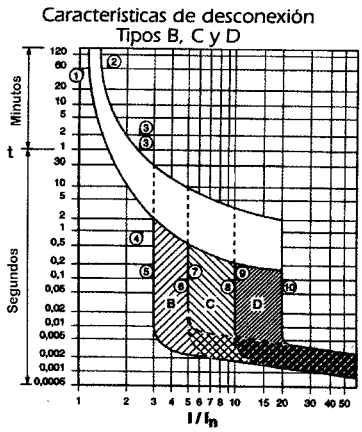


Figura 21. Curva de disparo. Fijación de puntos de acuerdo a norma UNE-EN 60.898.

Curva B:
Los relés magnéticos actúan entre 3In y 5In. Permite realizar la protección de las personas en régimen de neutro IT y TN, para longitudes de cable mayores que con la curva C.

Curva C:
Los relés magnéticos actúan entre 5In y 10In. Para evitar los disparos intempestivos de los automáticos, en el caso de la protección de receptores, que presentan una vez en servicio puntas de corriente de cierta consideración.

Curva D:
Los relés magnéticos actúan entre 10In y 20In. Especialmente adecuada para instalaciones y aparatos con fuertes puntas de arranque (transformadores BT/BT, motores, etc.).

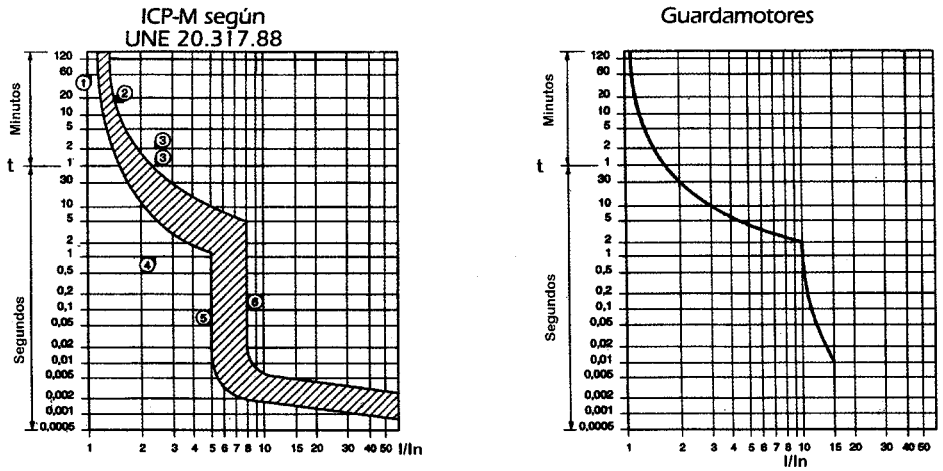


Figura 22. Curva de disparo de un interruptor de control de potencia ICP-M.

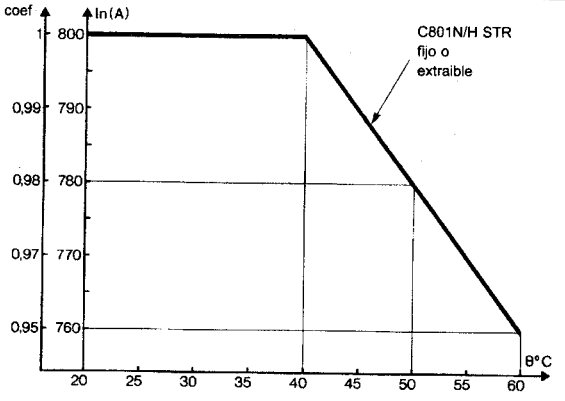
1: Valor constante de corriente de no desconexión. Int =1,1*In; t>1h
2: Valor constante de corriente de desconexión.
1.55*In: t<15m [In 1.5 10A]
1.5*In: t<15m [In 15 45A]
3: 2.25*Int=2.48*In t<1m [In 1.5 30A]
t<2m [In 35 45A]
4: 2.25*Int=2.48*In t>1s
5: 5*In: t>0.1s
6: 6*In: t<0.1s

- **Influencia sobre las curvas de desconexión de la temperatura ambiente:**

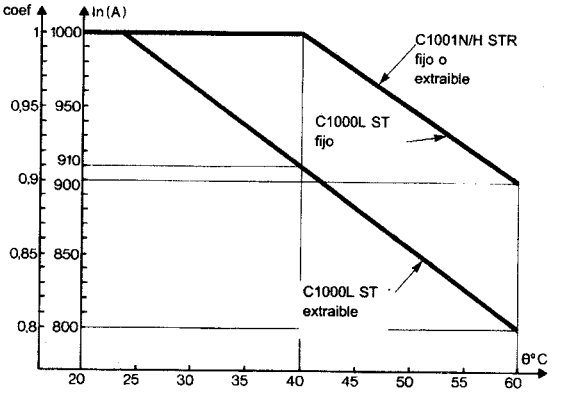
La utilización de aparatos con desconexión térmica se rige por la norma UNE 60.947.1/94, la cuál indica que para condiciones normales la temperatura del aire ambiente no sobrepasará los 40°C y la media en un periodo de 24 horas no sobrepasará los 35°C, siendo el límite inferior de -5°C.

El funcionamiento de los equipos para otras condiciones ambientales que excedan las normales, se prevé que sea más rápido que el teórico y en tal caso hay que prever una reducción de la corriente que circula por el interruptor lo cuál depende de las condiciones dadas por el fabricante para ese tipo de aparato. En los catálogos se suelen incluir las "curvas de corrección de la temperatura" y deberemos de tener en cuenta los factores de corrección.

C801N/H/L			40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	70 °C
C801N/H/L	fijo o ext.	In (A)	800	790	780	770	760	740
		reg. max. de Ir	**1**	**0,95**	**0,95**	**0,95**	**0,95**	**0,9**



C1001N/H/L			40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	70 °C
C1001N/H	fijo o ext.	In (A)	1000	975	950	925	900	850
		reg. max. de Ir	**1**	**0,95**	**0,95**	**0,9**	**0,9**	**0,8**
C1001L	fijo	In (A)	1000	975	950	925	900	850
		reg. max. de I	**1**	**0,95**	**0,95**	**0,9**	**0,9**	**0,8**
	ext.	In (A)	910	885	860	835	810	760
		reg. max. de Ir	**0,9**	**0,8**	**0,8**	**0,8**	**0,8**	**0,7**



C1251N/H			40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	70 °C
C1251H/H	fijo	In (A)	1250	1200	1150	1100	1050	950
		reg. max. de Ir	**1**	**0,95**	**0,9**	**0,8**	**0,8**	**0,7**
	ext.	In (A)	1160	1120	1080	1040	1000	920
		reg. max. de Ir	**0,9**	**0,8**	**0,8**	**0,8**	**0,8**	**0,7**

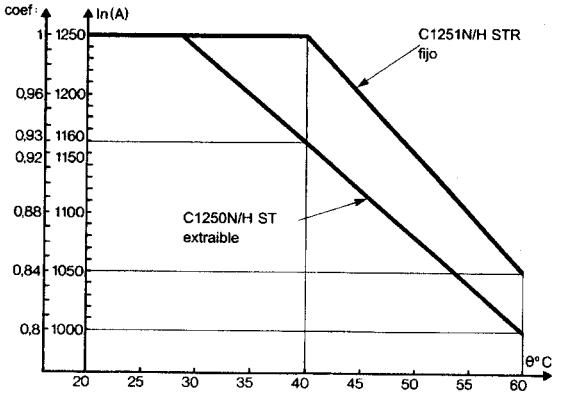


Figura 23. Decalaje de los interruptores automáticos por temperatura.

También las frecuencias elevadas, superiores a 50/60 Hz generan aumentos de temperatura adicionales en el bimetal y en el yugo magnético y elevan la resistencia magnética del circuito del disparador instantáneo. Por ejemplo, con 400 Hz, la curva característica de sobrecarga se desplaza en un 30% aproximadamente, a tiempos de actuación inferiores, mientras que para el disparador magnético, las corrientes necesarias para la desconexión se elevan hasta el 50%.

4.1.8.- Normativa interruptores automáticos.

4.1.8.1. Introducción.

Como todos los materiales eléctricos, los interruptores automáticos de baja tensión industriales se conciben, fabrican y verifican según unas reglas reunidas en unas normas denominadas normas de "productos". Cada país tiene sus propias normas: UNE en España, UTE en Francia, BS en Inglaterra, VDE en Alemania, etc..

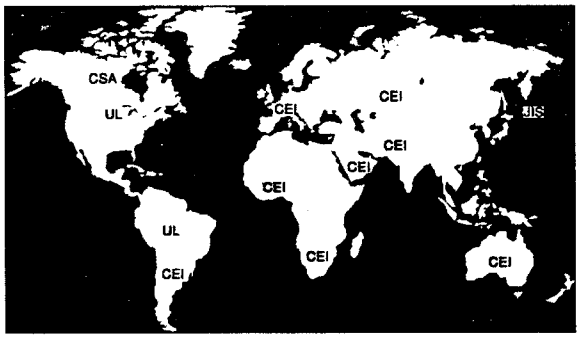


Figura 24. Mapa de influencia de normativas.

Para cualquier país, aparte de su propia explotación normativa, las publicaciones CEI (Comisión Electrotécnica internacional) son una referencia y la conformidad de los productos a sus textos a menudo se exige en las especificaciones de una operación (figura 24).

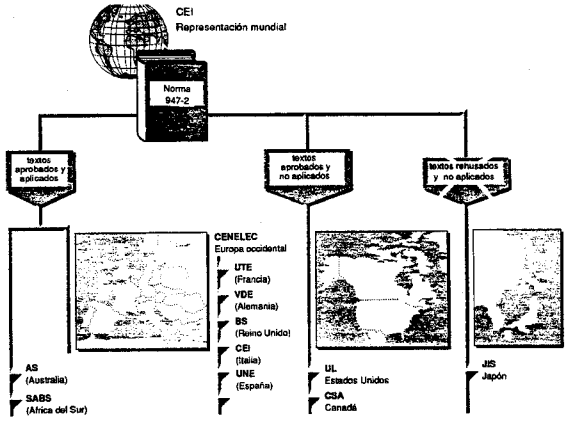


Figura 25. Representación mundial.

Actualmente, las norma relativas a los interruptores industriales de BT, tanto en la CEE como en la mayoría de países industrializados, están basados en la norma CEI 157-1 publicada en 1.973.

4.1.8.2.- CEI 947-2.

La voluntad de un reconocimiento aún más internacional de las recomendaciones CEI, unida a los progresos técnicos y tecnológicos alcanzados por los constructores a partir de 1.973, han forzado a los miembros del comité 17 B de la CEI a trabajar en la revisión de la publicación CEI 157-1.

Este subcomité, constituido con los representantes de más de 40 países ha conseguido que en 1.989 se publicara la norma CEI 947-2. Se ha obtenido, después del voto de aprobación, un amplio acuerdo mundial (Europa, Estados Unidos, Canadá, Australia, África del Sur,...) con la única excepción de sólo... Japón (figura 25).

Este trabajo representa siete documentos que constituyen las normas CEI para el conjunto de aparamenta eléctrica de baja tensión en su utilización en el campo industrial.
En el mundo de la Electrotecnia existen dos tipos de norma que los diferentes afectados deben respetar:

1. *Las normas "productos":* Estas normas existen para cada uno de los constituyentes de una instalación eléctrica: La conformidad de un producto a estas normas es, para el utilizador, una garantía de calidad y fiabilidad.
    - los cuadros;
    - las fuentes de potencia (transformador, alternador, etc.);
    - la aparamenta (interruptores automáticos, interruptores, contactores, etc.);
    - los cables;
    - los receptores (motores, alumbrado, etc.).
2. *Las normas de instalación:* Reagrupan el conjunto de reglas a respetar en la concepción, realización y explotación de una instalación eléctrica en vista a asegurar:
    - la alimentación de los receptores en buenas condiciones (tensión, frecuencia, continuidad de servicio,...);
    - la seguridad de las personas y los bienes;
    - la conservación, en el tiempo, de sus características. En España, la norma UNE 20.460 entra en esta categoría.

Normas Productos: Se trata de las reglas relativas a la fabricación y control de los materiales, por ejemplo:

- generadores de potencia;
- cuadros principales de distribución (envolvente y aparamenta);
- cuadro secundario (envolvente y aparamenta);
- cables;
- receptores.

Normas de instalación: Se trata de las reglas de puesta en funcionamiento de los productos teniendo en cuenta los parámetros principales siguientes:

- régimen de neutro;
- corriente a transportar;
- corriente de cortocircuito;
- corriente de defecto de aislamiento;

- temperatura;
- tipo y modo de colocar los cables;
- caída de tensión máxima admisible;
- riesgos especiales (incendio, choque, explosión), selectividad;
- solicitaciones de explotación.

- CEI 947-1: Normas generales (publicado en 1.989).
- CEI 947-2: Interruptores automáticos (antiguamente CEI 157-1).
- CEI 947-3: Interruptores seccionadores, interruptores seccionadores y combinados-fusibles (antiguamente CEI 408).
- CEI 947-4: Contactores y arrancadores (antiguamente CEI 158-1 y CEI 292).
- CEI 947-5.1: Aparatos y elementos de conmutación para circuitos de mando (antiguamente CEI 337).
- CEI 947-5.2: Detectores de proximidad (publicado en 1.989).
- CEI 947-6.1: Materiales de conexión de transferencia automática (publicada en 1.989).
- CEI 947-7.1: Bloques de unión para conductores de cobre (publicado en 1 .989).

Esta construcción ha permitido la homogeneización del vocabulario y las reglas generales entre las diferentes familias de productos, si bien, para determinar la totalidad de las reglas relativas a una categoría del aparato, es obligatorio la consulta de los documentos:

- Un primero, denominado reglas Generales (CEI 947-1) que resume las definiciones, prescripciones y ensayos comunes a todos los materiales industriales de baja tensión.
- Un segundo, denominado "Productos" (CEI 947-2 a 7) que describe las prescripciones y ensayos específicos de cada uno de los productos interesados.

Los textos aplicables a los interruptores automáticos industriales de baja tensión son los CEI 947-1 y CEI 947-2. Las etapas de puesta en aplicación:

- **En Europa:**

Los textos emanados en la CEI son, en principio, estudiados a nivel del Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) que agrupa a los dieciocho países en Europa Occidental. A partir del texto base, CENELEC establece:

- bien una norma europea "EN.." que se transforma seguidamente en norma internacional para todos los países miembros;
- o en caso de divergencias, un documento de armonización "HD..." que se transforma en norma nacional con la integración de los puntos específicos de cada país.

En lo referente a las publicaciones CEI 947-1 y 2 no ha aparecido, hasta ahora, ninguna divergencia. Por ello, el CENELEC deberá publicar, durante 1.991, dos normas europeas EN que se transformarán a finales del 91 o inicios del 92, en normas nacionales de los diferentes países miembros del comité.

- **En Estados Unidos y Canadá:**

Si bien la acogida ha sido favorable, la realidad es que las normas en vigor (UL en Estados Unidos y CSA en Canadá) son notablemente diferentes de la CEI 947-2 y una reacción de conservadurismo unido a una filosofía de proteccionismo hacen prever que estos dos países conservarán aún por bastante tiempo sus normas especificas.

- **En Japón:**

Es el único país que ha votado negativamente, luego, no adoptará el texto CEI.

- **En el resto del mundo:**

Cada país puede adoptar los textos CEI como norma nacional, una vez estudiadas las modificaciones que eventualmente puedan introducir. Teniendo en cuenta el acuerdo casi unánime obtenido por la norma CEI 947-2 no es arriesgado prever que la mayoría de países la adoptaron con muy pocas modificaciones.

Es imprescindible señalar que los nuevos textos no modifican los criterios fundamentales de elección de un interruptor automático que afecten a su poder de ruptura y su corriente nominal o asignada.

Al contrario, facilitan al utilizador mejores garantías en cuanto a calidad y prestaciones, introduciendo una serie de exigencias suplementarios que tienen más en cuenta las condiciones de funcionamiento real de un interruptor automático y su explotación.

Además, esta norma tiene en cuenta la capacidad de los interruptores automáticos para asegurar otras funciones, adicionales a las habituales de protección de sobreintensidad, tales como seccionamiento o protección de personas por dispositivo diferencial residual.

4.1.8.3.- Diferencias CEI 947-2 y CEI 157-1.

La norma CEI 157-1 (UNE 20.103) publicada en 1973, representa, todavía hoy, un documento óptico de referencia para asegurar a los usuarios la calidad y las máximas prestaciones de los interruptores. Sin embargo, a pesar de que ha sido completada en 1976 y en 1979 y modificada en 1983 (en España UNE 20.103-89), el progreso en el campo técnico y el avanzado a nivel tecnológico alcanzado por los fabricantes, así como el deseo de ver esta norma mayoritariamente reconocida en el campo internacional, han hecho necesaria su evolución.

- **Definición de poder de corte:**

En la CEI 157-1, UNE 20.103-1, coexisten, para un mismo interruptor automático dos niveles de poder de corte, P1 y P2, diferenciados por el ciclo de pruebas y por la exigencias después del ensayo de cortocircuito.

La nueva norma CEI 947-2, elimina esta ambigüedad a partir de su aplicación, el poder de corte que caracteriza a los interruptores automáticos será el poder de corte último asignada (Icu) expresado en kA. Esta magnitud Icu es el valor a tomar en consideración en el cálculo de una instalación de forma semejante como en las antiguas condiciones lo era P1: se mantienen la condición Icu > Icc, donde Icc representa la corriente de defecto máxima presunta que puede presentarse en una instalación, es decir, la correspondiente al cortocircuito trifásico, en bornes del interruptor, defecto no muy probable, típico de un error en el momento de la puesta en servicio.

A este poder de corte Icu corresponde para todos los interruptores, un valor de prestación destinado a tener en cuenta la exigencia siempre importante de lacontinuidad de servicio. A esta magnitud se le denomina poder de corte de servicio asignado (Ics).

Esta característica traduce la capacidad del interruptor para eliminar las corrientes de cortocircuito de valor inferior a Icc, las cuales tienen mayor probabilidad de producirse en servicio normal. La magnitud Ics se expresa en % de Icu (valores normalizados en la CEI 947: 25, 50, 75, 100%), siendo este valor dado por el fabricante.

- **Dos categorías de aparatos:**
  - Categoría A: no prevén en su funcionamiento, ningún retardo en la desconexión por cortocircuitos.
  - Categoría B: aparatos especialmente estudiados para realizar la selectividad cronométrica. Esta categoría de interruptores posee obligatoriamente una característica adicional denominada corriente asignada de corta duración admisible Icw. Para In 2.500 el valor de Icw es el mayor valor entre 12 * In ó 5 kA; para In > 2.500 el valor de Icw es mayor o igual a 30 kA. El retardo de corta duración asociado a Icw debe ser como mínimo de 0,05 s; los valores preferenciales son: 0,05 - 0,1 - 0,25 - 0,5 - 1 s.

- **Definición de nuevas intensidades:**

Icu representa la corriente de cortocircuito que un interruptor automático puede verse precisado a cortar. En efecto, el cálculo de Icc presunta se realiza habitualmente con hipótesis maximalistas encaminadas siempre hacia la seguridad, en particular:

- Cortocircuito trifásico.
- El fenómeno se realiza sin contar con la presencia del arco.
- Las resistencias de las conexiones no se tienen en cuenta.
- El cortocircuito se considera producido en bornes del interruptor automático, es decir, sin la adición de tramo alguno de cable.
- Las resistencias de las conexiones se consideran a la temperatura normal de funcionamiento de los cables (en cortocircuito, estas resistencias son mayores ya que aumentan proporcionalmente al calentamiento de los cables).

Por todo lo anterior resulta que, cuando se produce un cortocircuito (hecho en sí excepcional), el valor de la corriente es bastante inferior a la Icc calculada. Por el contrarios es importante que estas corrientes, de probabilidad más elevada, sean interrumpidas en las mejores condiciones, para asegurar, una vez eliminada la causa del defecto, el retorno del servicio inmediato con la mayor seguridad de la instalación.

Por la razón anterior, la CEI 947-2 introduce una nueva característica Ics "Poder de corte de servicio", que generalmente se expresa en % de Icu (valor elegido por el constructor entre 25, 50, 75 ó 100%) y se define como:

- El interruptor automático efectúa tres rupturas sucesivas de la corriente Ics.
- Seguidamente se ensaya el aparato, comprobando que mantiene sus características relativas a: calentamiento con In, rigidez dieléctrica, funcionamiento de los relés y mecanismo de disparo.

Esto hace que Ics sea una característica que no podemos considerar como un simple poder de ruptura (tal y como ha sido el poder de corte P2 en la CEI 157-1) sino comouna característica de un interruptor automático para asegurar un servicio normal, incluso después de haber interrumpido muchas corrientes de cortocircuito (figura 26). La corriente de corta duración admisible Icw (para los Interruptores automáticos de la categoría B) para poder realizar una acción de selectividad cronométrica, están concebidos para soportar un retardo a la desconexión ante un cortocircuito de corriente inferior a Icw. Es el caso general de interruptores automáticos de bastidor metálico y de ciertos aparatos de caja moldeada de calibres altos. Para estos últimos, la CEI 947-2 impone un ensayo adicional de verificación de su capacidad para soportar, tanto desde el punto de vista térmico como electrodinámico (sin repulsión de contactos que provoque una usura prematura), el paso de la corriente Icw durante el tiempo de retardo (figura 26).

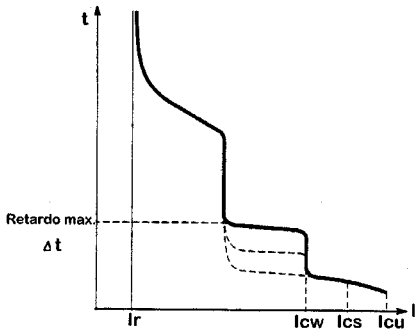


Figura 26. Intensidad adicional para los interruptores automáticos de categoría B.

- **La función de seccionamiento:**

Hasta ahora, las normas relativas a los interruptores automáticos no establecían ninguna regla que se refiera a la función de seccionamiento.

Sólo las normas de instalaciones proporcionan algunas informaciones poco precisas. La CEI 947-1 tiene en cuenta (en la 1ª parte: Reglas Generales) esta función y define claramente las reglas de construcción y los ensayos a realizar.

- **Placa de características de los aparatos:**

Las diferencias respecto al marcado anterior se derivan de los nuevos puntos introducidos en la norma CEI 947-2. Este texto impone las informaciones relativas a los aparatos que los fabricantes de los interruptores deben suministrar, así como su colocación sobre los mismos.

- Informaciones que deben figurar sobre el aparato de modo que sean visibles cuando el aparato está instalado (por ejemplo, montado en un cuadro):
  - Intensidad nominal.
  - Símbolo de capacidad de seccionamiento.
  - Símbolos indicadores de la posición del aparato: O(abierto), I (cerrado).
- Informaciones que deben figurar sobre el aparato, pudiendo no ser visibles una vez que el interruptor ha sido instalado, son las siguientes:
  - Nombre del fabricante o marca de fábrica.
  - Tipo o número de serie del aparato.
  - CEI 947-2.
  - Categoría del aparato (A ó B).
  - Tensión de utilización Ue.
  - Poder de corte último asignado (Icu).
  - Poder de corte de servicio asignado (Ics).
  - Corriente establecida de corta duración admisible (Icw) según los casos.
  - Temperatura de referencia si difiere de 30°C.

- Informaciones que deben figurar sobre el aparato o en el catálogo del fabricante:
  - Tensión de aislamiento (Ui).
  - Poder de cierre en cortocircuito (Icm).
  - Tensión límite al impulso (Uimp).

CONCLUSIONES: Los dos criterios fundamentales de selección de un interruptor son:

- La intensidad nominal (In).
- El poder de corte último (Icu) (equivalente a P1).

Secuencias ensayos	**Tipo de interruptor automático**				**Ensayos a realizar sucesivamente sobre un mismo interruptor automático**	**Ensayos suplementarios para interruptores automáticos declarados aptos a seccionamiento**
	Cat. A	**Cat. B**				
		Icw < Ics	**Icw = Ics**	**Icw = Ics = Icu**		
Secuencia 1 Características generales de funcionamiento	X	X	X	X	1. Verificación de los umbrales de desconexión 2. Propiedades dieléctricas Ensayos Uimp entre fases Uimp entre fase / masa Uimp entre entrada / salida 3. Endurancia mecánica 4. Endurancia eléctrica 5. Funcionamiento en sobrecarga a 6 In 6. Rigidez dieléctrica a 2 Ui (50 Hz - 1 min.) 7. Calentamiento con In 8. Verificación de no desviación de los relés de disparo en sobrecarga.	1. Idem 2 Propiedades dieléctricas Idem Idem Uimp + 25% entre E/S + ensayo corriente de fuga (< 0,5 mA por polo con 110% Ue) 3. Idem 4. Idem 5. Idem 6. Idem + ensayo corriente de fuga (< 6 mA por polo con 110% Ue) 7. Idem 8. Idem
Secuencia 2 Características de ruptura en servicio Ics	X	X			1. Tres rupturas sucesivas de intensidad Ics según el ciclo O - 3 min. - CO - 3 min. - CO 2. Rigidez dieléctrica a 2 Uimp. (50 Hz - 1 min.) 3. Calentamiento con In 4. Verificación de no desviación de los relés de disparo en sobrecarga	1. Idem 2. Idem + ensayo corriente de fuga (< 2 mA x polo con 110% Ue) 3. Idem 4. Idem
Secuencia 3 Poder de ruptura último Icu	X (1)	X (1)	X (1)		1. Verificación de los relés de disparo con 2 Ir 2. Dos aperturas sucesivas de corriente Icu según el ciclo O - 3 min. - CO 3. Rigidez dieléctrica a 2 Ue (50 Hz - 1 min.) 4. Verificación de no desviación de los relés de disparo en sobrecarga	1. Idem 2. Idem 3. Idem + ensayo corriente de fuga (≤ 6 mA x polo con 110% Ue) 4. Idem
Secuencia 4 Corriente asignada de corta duración admisible Icw		X			1. Verificación de los relés de disparo con 2 Ir 2. Ensayo de capacidad del aparato a la corriente asignada de corta duración admisible durante el tiempo indicado por el constructor 3. Calentamiento con In 4. Dos rupturas sucesivas con tensión máxima, de corriente Icw con ciclo O - 3 min. - CO 5. Rigidez dieléctrica a 2 Ui (50 Hz - 1 min) 6. Verificación de no desviación de los relés de disparo en sobrecarga	1. Idem 2. Idem 3. Idem 4. Idem 5. Idem 6. Idem
Secuencia de ensayos combinados			X	X	1. Verificación de los relés de disparo con 2 Ir 2. Ensayo de capacidad del aparato a la corriente asignada de corta duración admisible durante el tiempo indicado por el constructor 3. Tres rupturas sucesivas de corriente Ics con ciclo O - 3 min. - CO - 3 min. - CO 4. Rigidez dieléctrica a 2 Ui (50 Hz - 1 min) 5. Calentamiento con In 6. Verificación de no desviación de los relés de disparo en sobrecarga	1. Idem 2. Idem 3. Idem 4. Idem + ensayo corriente de fuga (≤ 2 mA x polo con 110% Ue) 5. Idem 6. Idem

Tabla 7. Ensayos reagrupados en secuencias según norma CEI 947-2.

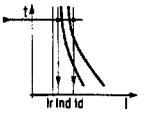
CEI 157.1	Nueva Norma CEI 947.1/2	Comentarios
Poder de ruptura ciclo P1	Poder de ruptura último Icu (secuencia 3)	Equivalente
Poder de ruptura ciclo P2		
	Poder de corte en servicio Ics (secuencia 2)	Obligatorio sobre todos los aparatos y más severa que el ciclo P2 de la 157.1 pues es un ensayo seguido de una prueba de funcionamiento sobre Un (después de ruptura).
Cada ensayo se efectúa sobre un aparato nuevo (funcionamiento, fatiga, sobrecargas, poder de ruptura).	Los ensayos se reagrupan en **secuencias**	Muchísimo más duro por el hecho de acumulación de los ensayos sobre un mismo aparato. **Más** parecido a las condiciones reales de explotación.
Verificación (los 3 polos cargados) de las dos asíntotas: Ind = 1,05 Ir Id = 1,35 Ir (≤ 63 A) o Id = 1,25 Ir (> 63 A)	Verificación (los tres polos cargados) de las dos asíntotas: Ind = 1,05 Ir Id = 1,30	con t = 1 h (≤ 53 A) o t = 2 h (> 63 A) 
Sin otra verificación de los relés de sobrecarga	Verificación de los disparos: ■ polo por polo (secuencias 3, 4 y 5) ■ todos los polos cargados (secuencia 2)	Mayor seguridad de funcionamiento de los relés
No se menciona	Definición de los ensayos de aptitud al seccionador con el símbolo asociado 	El interruptor automático seccionador es reconocido por las normas de instalación para asegurar la función de seccionamiento.
No se menciona	Ensayo a las ondas de tensión de choque. Característica Uimp	Permite la coordinación de aislamiento de las instalaciones
Coordinación sólo entre interruptor automático y fusible	Comporta una coordinación anexa	Tiene en cuenta la disposición de los interruptores automáticos en serie
No se menciona	Un anexo está destinado a tratar los interruptores automáticos equipados con protección	Es una normalización de los interruptores automáticos diferenciales industriales

Tabla 8. Principales diferencias entre las normas CEI 157-1 y CEI 947-2.

4.1.8.4.- Norma EN 60.898. Interruptores automáticos para la protección contra sobreintensidades para instalaciones domésticas y análogas.

Las normas EN (Norma Europea) o los documentos de armonización HD, que publica el CENELEC, son de obligada adopción por los países miembros del CENELEC; por ello, la referida norma EN 60.898 se publica en España como norma UNE 60.898 en noviembre de 1992.

La norma UNE 20347.81, que corresponde a la publicación CEE-19, 2ª edición, trata de los interruptores automáticos magnetotérmicos para uso doméstico y análogo, interpretándose lo de análogas como su aplicación en oficinas, laboratorios, albergues, escuelas etc., es decir, el sector comúnmente llamado "terciario".

La evolución del sector, las ventajas de la instalación de los interruptores modulares en aplicaciones industriales de pequeña potencia, y a la necesidad de un texto común, han empujado primero a la CEI, en el ámbito internacional, y después al CENELEC, en el ámbito Europeo, a la elaboración de una nueva norma de producto. De ahí la publicación hacia fin de 1987 de la norma CEI 898, que, discutida en el CENELEC, fueaceptada como norma europea EN 60.898 en marzo de 1990, con las modificaciones pertinentes para adaptarlas a las exigencias europeas.

En síntesis, el nuevo texto de la norma EN 60.898 representa el punto de encuentro entre el campo doméstico y el campo industrial, teniendo en cuenta también las diversas exigencias del complejo mercado europeo, tradicionalmente distinto en el sur (CEE-19) y en el norte (VDE, BS, etc.). Esta norma Europea EN 60.898 sustituirá para Europa a la actual CEE 19, 2ª edición, siendo la fecha limite de publicación en cada país adherido al CENELEC la de 1-7-1991 y la de total retirada de las normas nacionales actuales la de 1-7-1994.

PRINCIPALES NOVEDADES:

- **Magnitudes características:**

La norma EN 60.898 ha introducido algunas novedades importantes relativas a las magnitudes asignadas de tensión e intensidad para responder a las exigencias, de una parte, específicamente técnicas y de montaje, y de otra, de la claridad y simplificación de las definiciones que, en la antigüa norma, no siempre resultan ser de fácil interpretación.

De aquí resultan los siguientes cambios:

a) TENSIÓN ASIGNADA.

La entrada en vigor y la utilización de la tensión de red a los nuevos valores que se realiza gradualmente, siendo la fecha límite prevista por el CENELEC la del año 2003, la tensión asignada de 220/380 V, queda sustituida por el valor 230/400 V.

b) TAMAÑO.

Queda anulado el concepto de "tamaño", que, en la UNE 20.347.81, era semejante a la corriente convencional de no intervención y utilizado como una magnitud característica del interruptor. El valor de corriente que define el interruptor se llama ahora "corriente asignada" (símbolo In) y es la intensidad dada por el fabricante que el interruptor es capaz de soportar en servicio ininterrumpido a una temperatura ambiente de referencia. El campo de los valores de corriente asignada en la norma EN 60.898 se ha extendido hasta 125 A, en contra del valor máximo de 75 A, previsto en la norma UNE 20.347.81; esta ampliación de la gama de intensidades de los interruptores modulares, ensancha considerablemente su campo de aplicación, y llena el vacío actualmente existente entre 75 y 100 A. Los valores normalizados de la corriente asignada queda así: 10, 13, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 100 y 125 A.

c) TEMPERATURA DE REFERENCIA.

El fabricante define las características de funcionamiento del interruptor a una temperatura de referencia que ha sido fijada en la nueva norma en 30°C ± 2°C.

Si el fabricante indica una temperatura de referencia diferente de esta "normal", debe proporcionar los valores de corrección oportunos para referir las magnitudes características a los 30°C. Esto es necesario para poder comparar las prestaciones de interruptores distintos, y, además, para determinar la protección de los cables frente a las sobrecargas, ya que en la norma la temperatura de referencia es de 30°C.

d) PODER DE CORTE.

Como se ha comentado, está cambiando el campo de utilización de los interruptores automáticos modulares o, mejor dicho, se está ampliando su utilización en áreas industriales, en las que, presumiblemente, se presentan valores de intensidades de cortocircuito considerablemente mayores que en el sector doméstico. No obstante,la norma obliga al fabricante a que indique en la etiqueta las prestaciones del aparato para su utilización en el sector tradicional: el doméstico. Los valores normales de poder de corte asignados en kA son: 1,5 - 3 - 4,5 - 6 - 10 - 15 - 20 - 25.

- **Marcas e indicaciones:**

Cada interruptor debe llevar las siguientes indicaciones:

- Nombre del fabricante o marca de fábrica.
- Tipo, número de catálogo u otro número de identificación.
- Tensión signada con el símbolo.
- Corriente asignada sin el símbolo "A" precedido del tipo de curva de disparo B, C ó D (las curvas B y C sustituyen a las L y U actuales).
- Frecuencia asignada si el interruptor está previsto para una sóla frecuencia.
- Poder de corte asignado en amperios, dentro de un rectángulo, sin indicar el símbolo de las unidades de medida.
- Esquema de conexión, a menos que el modo de conexión sea evidente.
- Temperatura ambiente de referencia, si es diferente a 30°C.

- **Disparadores térmicos:**

Con la eliminación de la referencia al tamaño, los interruptores automáticos se definen por su propia corriente asignada In. A tales valores se refieren, según la Norma EN 60.898, los valores de:

- Int Corriente convencional de no desconexión.
- It Corriente convencional de desconexión.

La ampliación de la gama de intensidades asignadas hasta 125 A, junto con la coordinación de la relación Int/It respecto a la corriente asignada, ha supuesta la modificación de los mismos valores de Int e It y de los tiempos de intervención. Estos se definen como:

- Int = 1,13 * In
- It = 1,45 * In

Para estos valores de Int e It, los tiempos de intervención son los mismos para las tres curvas B, C y D. Recordemos que en la norma UNE 20.347.81, el tiempo de disparo de In, es igual para todas las In, y a su vez limitado a 75 A.

- **Disparadores magnéticos:**

La corriente de disparo magnético (o instantáneo) se define como el mínimo valor de corriente que provoca la apertura automática del interruptor sin retardo intencionado. En la norma UNE 20.347.81 se definían dos características de intervención instantánea, para cada una de las cuales viene fijado un intervalo, múltiplo del calibre (Int), entre los cuales debe situarse al valor mínimo de disparo instantáneo.

Para la característica L el límite inferior era 2,6 * Int y el superior 3,85 *Int y para la característica U, el límite inferior era 3,85*Int y el límite superior 8,8*Int y para la curva D de 10 a 14 veces la Int.

En la norma EN 60. 898, los interruptores automáticos se clasifican según los valores de la corriente de disparo magnético y tenemos las curvas B (de 3 a 5 In), C (de 5 a 10 In), y D (de 10 a 20 In). En cualquier caso los valores de corriente están relacionados con la corriente asignada (In) y no con el tamaño (Int) como ocurría con la norma anterior.

- **Prestaciones en cortocircuito:**

Otra novedad ya anunciada es la del aumento del valor máximo del poder de corte normalizado, de 10 a 25 kA. Las principales modificaciones se tienen en la definición del mismo poder de corte. La norma UNE 20.347.81 definía un sólo poder de corte, indicando un criterio de prueba, por otra parte bastante severo, definido por la secuencia:

O - t - CO - t - CO a plena intensidad de corriente y tensión.

siendo:
O: Apertura automática de los contactos bajo cortocircuito.
CO: Cierre de los contactos sobre cortocircuito y consiguiente apertura automática de los mismos.
t: Tiempo de enfriamiento (unos 3 minutos).

La tensión de prueba era igual a 220/380 V (+ 10%).

La norma EN 60.898, de la misma forma que la norma (CEI 157-1/UNE 20.103 -y sobre todo la nueva CEI 947-2/pr.UNE 21.947.2; sustituirá a la UNE 20.103), define los valores del poder de corte que son los siguientes:

- Poder de cortocircuito de servicio (Ics): es la máxima corriente de cortocircuito que el aparato es capaz de interrumpir bajo condiciones específicas (diferentes de las anteriores); después de la prueba el aparato debe soportar una corriente igual al 85 % Int.

- Poder de corte asignado (Icn) como el valor del poder de corte extremo asignado al interruptor por el fabricante. Un interruptor que tiene como dato el poder de corte asignado tiene su correspondiente poder de cortocircuito de servicio (Ics), según la siguiente tabla:

Icn [A]	K
≤ 6.000	1.00
>6000	0.75 (≥ 6 kA)
≤ 10000	0.70 (≥ 6 kA)
>10000	0.50 (≥ 7.5 kA)

Tabla 9. Poder de corte y de servicio.

en donde:

$$Ics = k*Icn \qquad (28)$$

Para la EN 60.898 el poder de corte, que es obligatorio indicar en la placa de características, es el valor "límite o poder de corte asignado Icn".

En síntesis para la norma EN 60.898, el poder de corte asignado, por efecto del coeficiente k que lo liga con Ics, correspondiente, en principio, al poder de corte P1 de la norma UNE 20.103 para valores elevados de cortocircuito (productos industriales) y al poder de corte según la UNE 20.347.81 para valores de cortocircuito menores hasta 6.000 A (productos domésticos).

Esta prescripción normativa parece ser la respuesta más evidente a la exigencia, ya expresada, de prever la utilización, no sólo doméstica, del interruptor automático modular, sino también, debido a su utilización cada vez más intensa, en el campo terciario e industrial.

- **Otras novedades:**

La norma EN 60.898 ha introducido otras modificaciones importantes atendiendo a diversos argumentos, entre los cuales se encuentran:

- Características (I^2*t) clase de limitación.
- Coordinación ante sobreintensidades entre aparatos de protección conectados en serie.
- Condiciones generales de prueba (n° de muestras/sección de conductor).
- Condiciones de prueba de calentamiento a In.
- Medida de la potencia activa disipada.
- Manifestaciones externas durante el cortocircuito.
- Vida eléctrica.
- Resistencia al calor y al fuego.
- Resistencia a la contaminación.

Los interruptores automáticos según CEI 947-2 se utilizan en un campo de algunos amperios hasta varios miles de amperios. La norma 947-2 no fija límites de funcionamiento y deja al constructor precisar el umbral del disparo magnético que debe quedar en un margen de ± 20%.

Ej: Los interruptores Compact de la firma Schneider de calibres superiores a 250 A hacen la regulación del disparo magnético así:

Tipo G: regulable de 1 a 5 I_{RTH}
Tipo D: regulable de 5 a 10 I_{RTH}.
Tipo MA: regulable de 6,3 a 12,5 I_{RTH}

	CEI 947-2	EN 60.898
Tensión Un (V)	< 1000	< 440
Corriente	(1)	In ≤ 125 A
Relé térmico	1,05 a 1,3 In	1,13 a 1,45 In
Relé magnético	(2)	curvas B, C, D
Poder de ruptura	Icu	Icn (3)
Poder de corte en servicio	Ics	Ics (3)
Seccionamiento	Si	En estudio
Manifestaciones externas	Respetar el perímetro de seguridad	Prueba (4) de no proyección

Tabla 10. Diferencias CEI 947-2 y CEI 898.

La norma 947-2 prevé un poder de ruptura último correspondiente a un ensayo O-CO y un poder de corte en servicio porcentual de Icu, fijado por el constructor, correspondiente a un ensayo O-CO-CO.

La norma CEI 898 prevé un poder de ruptura asignado Icn que corresponde a un ensayo O-CO y una calidad de servicio en la que el valor corresponde a un ensayo O-CO-CO con:

- Icn 6 kA Ics=Icn.
- Icn>6 kA Ics=0.75 Icn (mínimo 6 kA).
- Icn 10 kA Ics=0,7 Icn (mínimo 6 kA).
- Icn>10 kA Ics=0,5 Icn (mínimo 7,5 kA).

Ensayo destinado a verificar la ausencia de proyección de materia hacia la cara delantera. Las proyecciones eventuales son puestas en evidencia por una pantalla formada con película de polietileno. Con este ensayo se garantiza que no se producen proyecciones que puedan afectar peligrosamente al contorno del aparato.

4.2.- Fusibles.

Según las normas UNE, un cortacircuito fusible es un dispositivo de conexión que tiene como misión el abrir un circuito en el que está instalado, por fusión de uno o varios elementos destinados y diseñados para este fin, cortando la corriente cuando sobrepasa un determinado valor durante un cierto tiempo.

El cortacircuito fusible consta de:

- Una base portafusibles, que es la parte fija provista de bornes destinados a ser conectados a la red y que comprende todos los elementos que aseguran el aislamiento.
- Un cartucho fusible, que es la parte del cortacircuitos que comprende el elemento o elementos fusibles, y que es necesario sustituir por otra nueva, después del funcionamiento del cortacircuitos y antes de que éste sea puesto de nuevo en servicio.

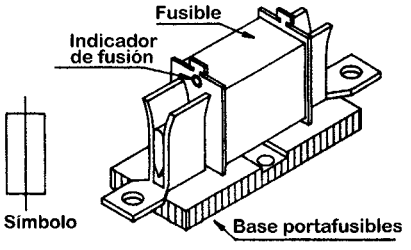


Figura 28. Fusible. Símbolo, Constitución básica de un modelo de cuchillas.

El fusible suele disponer de un dispositivo indicador que se desprende cuando el cortacircuito ha funcionado.

Las características más importantes para la base portafusibles son la tensión e intensidad nominal. Los valores de tensión nominal normalizados son: 220, 380, 500 y 660 V.

Para elegir la base apropiada, en un caso concreto, tenemos que elegir aquella que tenga una tensión nominal igual o superior a la tensión de servicio de la red a proteger, y una intensidad nominal igual o superior a la del fusible calculado para proteger dicha red. Las características más importantes para el fusible son:

- La intensidad nominal.
- La tensión nominal.
- El poder de corte nominal.
- La característica tiempo/corriente.

Los valores de tensión nominal normalizados son los mismos que para las bases portafusibles. Los valores de intensidad nominal para cartuchos fusibles normalizados son: 2, 4, 6, 10, 12, 16, 20, 25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800 y 1.000 A.

Al igual que ocurre con las bases, no todos los modelos disponen de todos los valores normalizados. El poder de corte nominal es la intensidad prevista de corte que un fusible es capaz de cortar a su tensión nominal; se expresa en kA y en fusibles de tipo industrial las normas UNE exigen que no sea inferior a 50 kA.

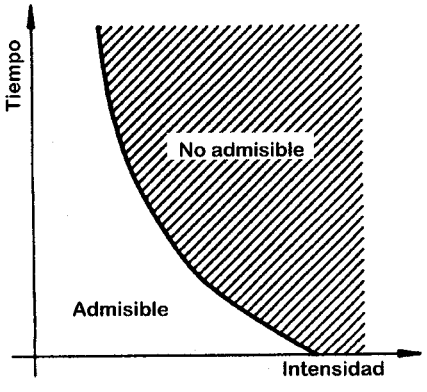


Figura 29. Característica tiempo/corriente de un fusible.

La característica tiempo/corriente de un fusible representa mediante una curva (figura 29) los tiempos de funcionamiento del fusible para cada valor de intensidad en unas condiciones determinadas de funcionamiento. Cualquier par de valores tiempo/corriente que se sitúe en la zona no admisible por el fusible provoca el funcionamiento de éste abriendo el circuito protegido.

Según la capacidad de respuesta de los fusibles, existen cuatro clases normalizadas de los mismos:

- gF: Fusión rápida. Protección contra sobrecargas y cortocircuitos (Norma DIN).
- gT: Fusión lenta. Protección contra sobrecargas sostenidas y cortocircuitos (Norma DIN).

Intensidad nominal [A]	I. no fusión [A]	I. fusión [A]
$In \leq 4$	1,5 In	2,1 In
$4 < In \leq 10$	1,5 In	1,9 In
$10 < In \leq 25$	1,4 In	1,75 In
$25 < In$	1,3 In	1,6 In

Tabla 11. Umbrales de disparo térmico de un fusible tipo gF y gT.

- gl: De uso general. Se utiliza para la protección de líneas y receptores en general.
- aM: De acompañamiento. Se utiliza para la protección de motores y obligatoriamente debe usarse asociada a un elemento de protección contra sobrecargas, como puede ser un relé térmico.

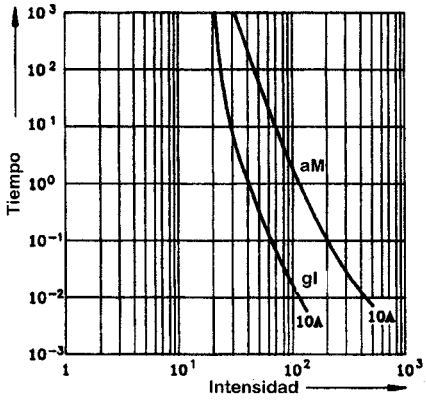


Figura 30. Curva intensidad/tiempo normalizada para fusibles: gl y aM.

Los hay con elementos indicadores de fusión y con percutor, para accionamiento de un circuito auxiliar.

La norma EN 60.2691-1 tipifica:

- Cortacircuito fusible g (anteriormente de usos generales): puede cortar todas las intensidades.
- Cortacircuito fusible a (anteriormente de acompañamiento): puede cortar solamente una parte de las corrientes.
- La segunda letra debe indicar la característica de empleo, esta letra define con precisión las características tiempo/corriente. Por ejemplo:
  - gG: cortacircuitos fusibles de uso general que corte todas las corrientes.
  - gM: designa los cartuchos fusibles para la protección de circuitos de motores y que pueden cortar todas las corrientes.
  - aM: designa los cartuchos fusibles para la protección de circuitos de motores y que no pueden cortar más que una parte de las corrientes.

4.2.1.- Modelos de cortacircuitos fusibles.

Los cortacircuitos fusibles normalizados son de tres tipos: de cuchillas, cilíndricos y D.

- **Cortacircuitos fusibles de cuchillas:**

Son fusibles industriales, entendiéndose como tales los que pueden ser sustituidos por personal cualificado y, para una misma base, pudiendo reemplazarse un fusible por otro de intensidad nominal superior.

Tienen seis tamaños normalizados: tamaño 00 (desde 6 a 100 A), tamaño 0 (desde 6 a 160 A), tamaño 1 (desde 36 a 250 A), tamaño 2 (desde 200 a 400 A) tamaño 3 (desde 315 a 630 A) y tamaño 4 (desde 500 a 1.000 A). Los valores de intensidad entre paréntesis son las intensidades nominales de las bases portafusibles correspondientes a cada tamaño.

Se fabrican con poderes de corte nominal de 100 kA. En la figura 31 se puede ver un cortacircuito fusible de este tipo.

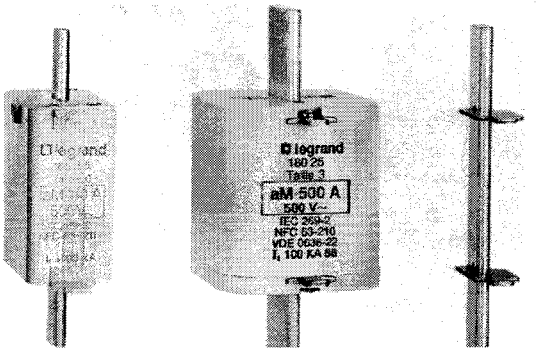


Figura 31. Fusibles de cuchillas.

Las intensidades nominales del cortacircuitos fusibles (A) son:

- 2- 4 - 6 - 8 - 10 - 12 - 16 - 20 - 25 - 35 - 40 - 50 - 63 - 80 -100 - 125 - 160 - 200 - 250 - 315 - 400 - 500 - 630 - 800 - 1000.

- **Cortacircuitos fusibles cilíndricos:**

También son fusibles industriales. Hay tres tamaños normalizados: tamaño 10 x 38 (hasta 20 A), tamaño 14 x 51 (hasta 50 A) y tamaño 22 x 58 (hasta 100 A); la primera cifra del tamaño indica el diámetro del fusible y la segunda su longitud, en milímetros.

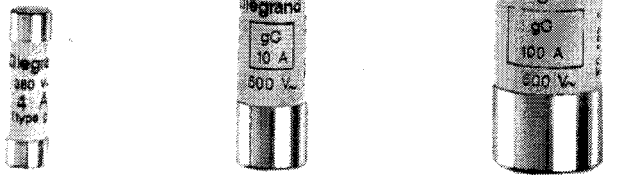


Figura 32. Fusibles cilíndricos.

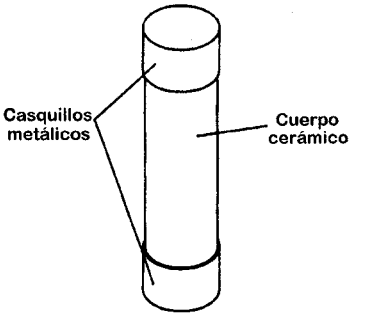


Figura 33. Fusible cilíndrico.

Las intensidades indicadas entre paréntesis son los valores más frecuentes de intensidad nominal para las bases portafusibles de cada tamaño. Por ser fusibles industriales su poder de corte nominal no debe ser inferior a 50 kA, aunque en la actualidad se fabrican con poderes de corte de 100 kA.

- **Cortacircuitos fusibles D:**

Son fusibles de uso domestico, entendiéndose como tales aquellos que pueden ser reemplazados, por personas sin calificación, y que garantizan que no se reemplaza un fusible por otro de intensidad nominal superior de forma inadvertida.

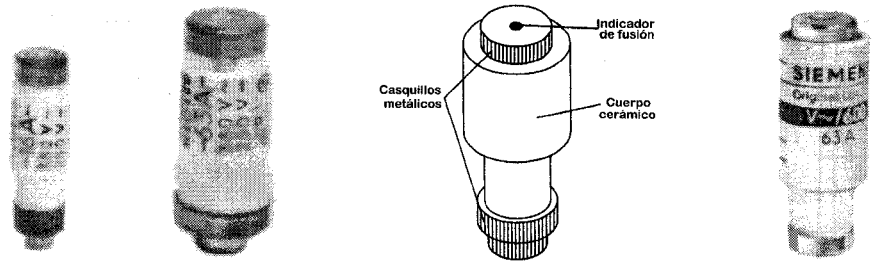
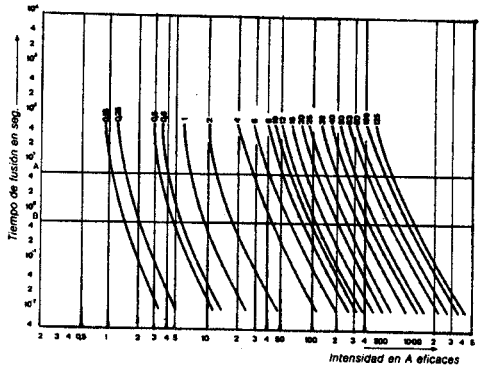


Figura 34. Fusible tipo D.

fusibles cilíndricos tipo aM

Curvas de fusión



A = tiempo máximo para la protección contra los cortocircuitos para m = 1
B = tiempo máximo para la protección contra los contactos indirectos para m = 1

$$m = \frac{\text{Sección del conductor de fase}}{\text{Sección del conductor de protección}}$$

Los valores de las curvas A y B son valores medios para nuestros productos

Consumo en watios en caliente bajo intensidad nominal

Fusibles	Calibres																
	1	2	4	6	8	10	12	16	20	25	32	40	45	50	63	80	100	125
10 x 38	0,06	0,12	0,17	0,30	0,35	0,40	0,45	0,70	1									
14 x 51			025	0,30	0,40	0,50	0,65	0,90	1	1,20	1,55	2,10	2,15	2,50				
22 x 58			0,30	0,45	0,55	0,80	0,75	0,90	1,10	1,35	1,80	1,90		3	4,10	5,20	6,50	9,42

Curvas de limitación - cos φ = 0,1

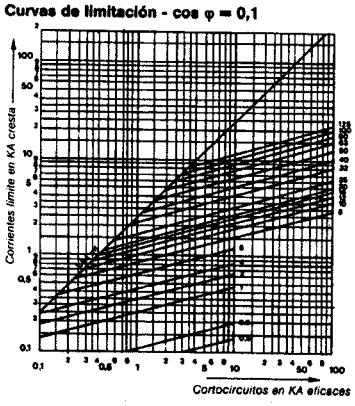
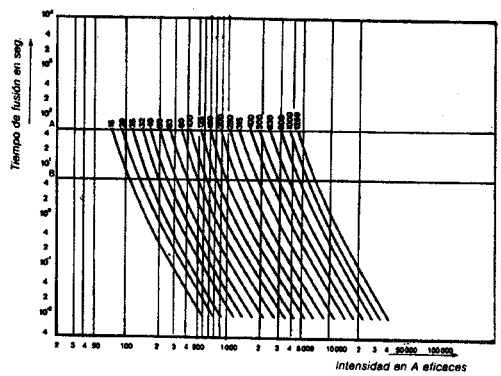


Figura 35. Curvas de tiempo/intensidad para fusibles cilíndricos de tipo aM.

fusibles de cuchillas tipo aM

Curvas de fusión



A = tiempo máximo para la protección contra los cortocircuitos para m = 1
B = tiempo máximo para la protección contra los contactos indirectos para m = 1

$$m = \frac{\text{Sección del conductor de fase}}{\text{Sección del conductor de protección}}$$

Los valores de las curvas A y B son valores medios para nuestros productos

Consumo en watios en caliente bajo intensidad nominal

Fusibles	Calibres																
	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250
Talla 00	0,9	1,1	1,4	1,8	2	3	3,5	4,9	5,1	8,2										
Talla 0 a 4					2,15	2,9	3,55	4,8	6	8,1	10	12	15	19	24	29	36	46	57	70

Curvas de limitación - cos φ = 0,1

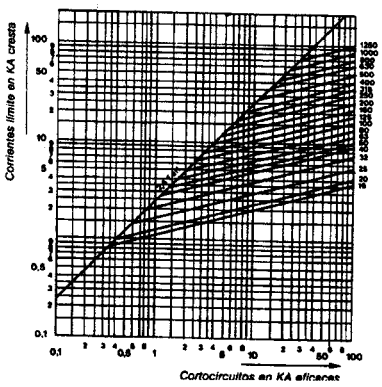


Figura 36. Curvas de tiempo/intensidad para fusibles de cuchillas de tipo aM.

Hay tres tipos normalizados: tipo D01 (desde 2 a16 A), tipo D02 (de 20 a 63 A) y tipo D03 (de 80 a 100 A). Los valores de intensidad entre paréntesis son las intensidades nominales de las bases portafusibles correspondientes a cada tipo. Por ser fusibles de uso doméstico, su poder de corte nominal debe ser, como mínimo, de 20 kA.

4.2.2.- Normas UNE sobre cortacircuitos fusibles en B.T..

- Fusibles baja tensión. Reglas generales. Norma UNE 21.103-91. Parte 1 (Corresponde con Norma Europea EN 60.269-1).

- Fusibles baja tensión. Reglas suplementarias para los fusibles destinados a ser utilizados por personas autorizadas (Fusibles para usos esencialmente industriales). UNE 21.103-91. Parte 2.

- Fusibles baja tensión. Reglas suplementarias para los fusibles destinados a ser utilizados por personas no cualificadas (fusibles para utilizar principalmente en instalaciones domésticas o análogas) UNE 21.103-91. Parte 3.

- Fusibles de baja tensión. Prescripciones suplementarias concernientes a los cartuchos fusibles utilizados para la protección de dispositivos con semiconductores. UNE 21.103-91. Parte 4.

TEMA 9. SELECTIVIDAD DE LAS PROTECCIONES DE SOBREINTENSIDAD

1.- DEFINICIÓN E INTERÉS DE LA SELECTIVIDAD.

La selectividad consiste en asegurar la coordinación entre las características de funcionamiento de los dispositivos de protección colocados en serie de tal manera que en un caso de defecto eléctrico, sólo el dispositivo colocado inmediatamente aguas arriba del defecto eléctrico actúe. Así la selectividad permite limitar las consecuencias de un defecto eléctrico a la parte de la instalación afectada por este defecto eléctrico y asegurar la continuidad de servicio.

La realización de una selectividad necesita la comparación de las características de funcionamiento de los dispositivos de protección implicados. La selectividad puede ser total o parcial. Si en la figura 1, D2 abre y D1 permanece cerrado después de una sobrecarga o cortocircuito en el punto indicado, la distribución será totalmente selectiva. Es parcial si la anterior condición no se mantiene para ciertos valores de la corriente de cortocircuito.

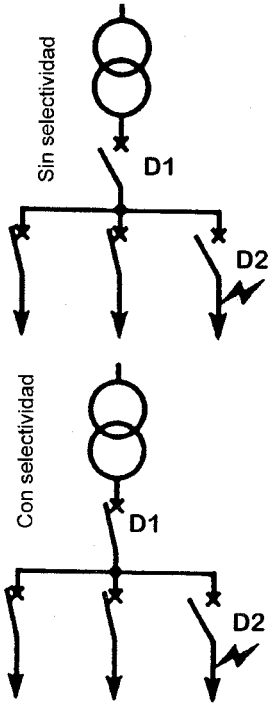


Figura 1. Selectividad en una instalación eléctrica.

2.- SELECTIVIDAD EN LA ZONA DE SOBRECARGAS.

La zona de sobrecargas se sitúa a partir del umbral de funcionamiento I_{LR} del dispositivo de "retardo largo". La curva de disparo I=f (t) es generalmente de tiempo inverso con el fin de adaptarse a la curva de inercia térmica admisible de los cables. Para cada interruptor automático D1 y D2, la curva inferior representa el tiempo máximo de no desconexión t_{ND} y t_D el tiempo máximo de desconexión.

Para un valor cualquiera de sobreintensidad la selectividad está garantida en sobrecarga, si el tiempo de no desconexión del interruptor automático aguas arriba D1 es superior al tiempo máximo de disparo del interruptor automático D2 (comprendido el tiempo de extinción del arco). Esta condición práctica se cumple si la relación I_{LR1}/I_{LR2} es:

- Mayor o igual a 2 para interruptores equipados con relés térmicos clásicos.
- Mayor o igual a 1.5, si se trata de relés electrónicos, en los que la precisión es mayor.

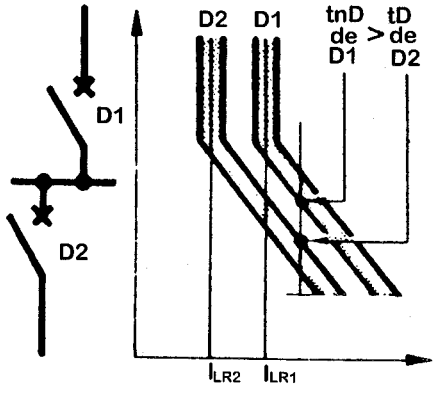


Figura 2. Selectividad en sobrecarga.

A partir de 10 veces la intensidad nominal se consideran cortocircuitos y los mecanismos de disparo son relés instantáneos o de "retardo corto».

3.- SELECTIVIDAD EN LA ZONA DE PROTECCIÓN CONTRA LOS CORTACIRCUITOS.

Realizar la selectividad entre dos interruptores automáticos equipados con relés instantáneos (magnéticos o electrónicos) es muy difícil, ya que, la corriente de cortocircuito atraviesa simultáneamente a los dos relés. Para que el interruptor situado aguas arriba no desconecte deben de darse estas dos condiciones:

- El umbral del relé instantáneo I_{i1} de D1 ha de ser superior al umbral del relé instantáneo I_{i2} de D2. En la práctica esta condición se cumple si $I_{i1} > 1{,}4\ I_{i2}$.

- Cualquier corriente superior a I_{i1}, y susceptible de accionar los dos interruptores automáticos sólo debe provocar el disparo de D2. Según la tecnología de los interruptores automáticos, esto puede producirse en dos casos:

  - Utilizando, aguas abajo, un interruptor automático limitador D2 que reduce simultáneamente la amplitud de la corriente I y su duración t, reducción que se expresa a través de la energía térmica $\int i^2 * dt$

    $\int i^2 * dt$ de apertura de D2 < $\int i^2 * dt$ de no apertura de D1; esta relación es válida para los valores de corrientes que rebasen el umbral del funcionamiento instantáneo.

  - Temporizar el interruptor aguas arriba, lo que supone que deberá ser capaz de soportar el paso de la corriente de defecto sin daños, durante el tiempo de retardo (esfuerzos electrodinámicos, térmicos).

    Tiempo de no disparo D1 > tiempo de disparo de D2

4.- MÉTODOS DE SELECTIVIDAD.

Existen dos técnicas de selectividad, fundadas en la utilización de dos parámetros característicos del funcionamiento de los aparatos de protección: el valor de las corrientes de desconexión y el tiempo (tiempo de funcionamiento, retardo).

La primera de estas técnicas es la selectividad amperimétrica y la segunda, la selectividad cronométrica.

4.1.- Selectividad amperimétrica.

El escalonamiento de las intensidades de regulación de los interruptores automáticos D1 y D2 generalmente se realiza de acuerdo a sus calibres, o sea:

- I_{i2} de D2 < I_{i1} de D1

con valores de sobreintensidad inferiores a I_{i1}, de D1 se obtiene una selectividad parcial. Esta selectividad puede ser mejorada utilizando un interruptor limitador D2. En este caso para sobreintensidades superiores al ajuste de regulación de I_{i1} de D1, éste no dispara.

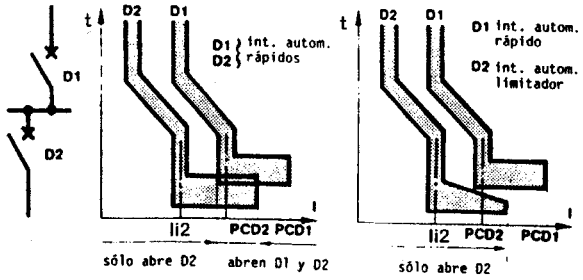


Figura 3. Selectividad amperimétrica.

4.2.- Selectividad cronométrica.

Se obtiene por un escalonamiento de los tiempos de funcionamiento de los i.a. equipados con relés de "retardo corto". Ello impone al interruptor D1 una respuesta electrodinámica compatible con la corriente (corriente de corta duración admisible) que debe de soportar durante la temporización.

Esta temporización puede ser:

- A tiempo inverso o a tiempo constante.
- A uno o varios escalones, selectivos entre ellos.
- Utilizable sólo a pleno poder de ruptura, la selectividad es entonces total.

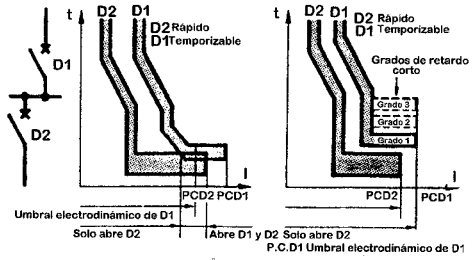


Figura 4. Selectividad cronométrica.

La selectividad puede ser total utilizando un i.a. D2 limitador. Podría clasificarse esta selectividad como mixta y que es cronométrica para las corrientes de cortocircuito de nivel bajo y amperimétrica para los valores mayores (mejorado por la limitación).

4.3.- Selectividad lógica.

Se obtiene por un sistema generador de órdenes, bien de desconexión, bien de no desconexión, en función de la situación y tipo de defecto.

Un defecto abajo es detectado en dos niveles pero solamente D2 recibe la orden de desconexión. La orden de disparo para D1 queda temporalmente retenida por un tiempo igual al tiempo de apertura de D2.

Si el interruptor automático D2 no abre seguidamente sobre una falta, el defecto será inmediatamente eliminado por la apertura de D1.

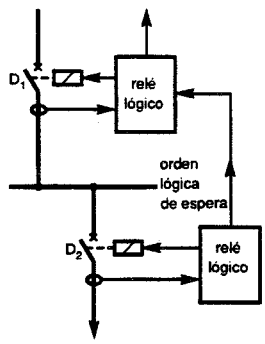


Figura 5. Selectividad lógica.

La aparición de un defecto debajo de D1 provoca la apertura de D1 sin ninguna temporización. Este sistema necesita interruptores automáticos con una resistencia electrodinámica igual al poder de ruptura. También precisa el tendido de una "red de control" entre los diferentes escalones y una fuente de alimentación auxiliar. Todo ello lo hace poco aplicable en B.T.. Su campo preferencial es el de M.T..

4.4.- Sistema SELLIM.

Este sistema por primera vez, dentro del campo de la protección, concilia las exigencias de una selectividad total y las ventajas de una fuerte limitación de las corrientes de cortocircuito, sin ninguna complicación para la elección y regulación de los interruptores automáticos.

Una distribución con garantía de continuidad de servicio a tres niveles y con capacidad hasta 150 kA de cortocircuito es actualmente realizable:

- Sin ningún cálculo previo ni regulación.
- Sin aparamenta suplementaria.
- De una forma simple y segura.
- Funcionando con la propia corriente.
- Beneficiándose además de la filiación (protección en serie de dos interruptores en cascada).

El sistema Sellim (figura 6) consiste en instalar en cabecera un interruptor automático limitador D1 ultralimitador, equipado de un relé (relé magnetotérmico), el cuál tiene como característica que no transmite orden de disparo al interruptor automático sino después de pasada la primera onda o semiperiodo de defecto. El aparato de cabecera D1 abre temporalmente para ayudar al interruptor automático D2, aguas abajo, a eliminar el cortocircuito y restablece la continuidad de servicio después de un tiempo t del orden de 10 milisegundos.

Si el defecto se produce entre D1 y D2 (sobre el juego de barras, p.e.), una segunda onda de defecto aparece cuando el interruptor automático vuelve a cerrar. Esta vez si el relé , envía orden de disparo y el interruptor automático abre definitivamente. Por lógica generalmente los interruptores automáticos D1 y D2 han sido calculados por filiación, lo que significa que puede utilizarse en D2 un interruptor automático que no tenga intrínsecamente el poder de ruptura correspondiente a la intensidad de cortocircuito calculada para el punto del circuito en el que se instala; D2 no ha de cortar realmente más corriente que la que ha limitado D1.

A título de ejemplo, un interruptor automático comercial, de 400 A, con un poder de ruptura de 150 kA a 380 V permite el empleo, aguas abajo de un interruptor automático de 125 A a 380 V con un poder de ruptura de 22 kA ya que las solicitudes (térmica, corriente de cresta, energía de arco), han sido reducidas por el limitador D1 al nivel de las características de D2.

- ***Comportamiento en cortocircuito:***

Se dan dos casos según que el cortocircuito aparezca:

- en II, aguas abajo de D2.
- en I, entre D1 y D2.

En el primer caso (figuras 6a, b y c), D2 abre y D1 abre temporalmente para limitar la corriente cortada por D2, cerrando inmediatamente y restableciendo la continuidad de servicio sobre los otros circuitos. En las figuras se siguen las secuencias de la corriente de cortocircuito, situación de los interruptores automáticos y funcionamiento del dispositivo mecánico.

Figura 6a: El cortocircuito se ha iniciado aguas abajo de D2, y el circuito magnético, constituido por las palancas A1(libre) y A2 (enclavada por C) está en posición inicial. A2 es el órgano transmisor de la orden de disparo.

Figura 6b: Se produce la apertura casi simultánea de D1 y D2 con una fuerte limitación de la corriente de defecto. La palanca A1 es atraída hacia el núcleo y lanza la masa M, pendulante, con una temporización debida al amortiguamiento del resorte R. A2 sigue engatillada, a pesar del esfuerzo de atracción.

Figura 6c: La corriente ha sido cortada, D1 como no ha recibido orden de disparo cierra sus contactos; D2 aísla la parte de la instalación afectada del cortocircuito. La corriente de cortocircuito ha desaparecido, la palanca A2, a pesar de quedar libre del gatillo C debido al retardo producido por el sistema, no transmite orden de disparo pues no es atraída por núcleo.

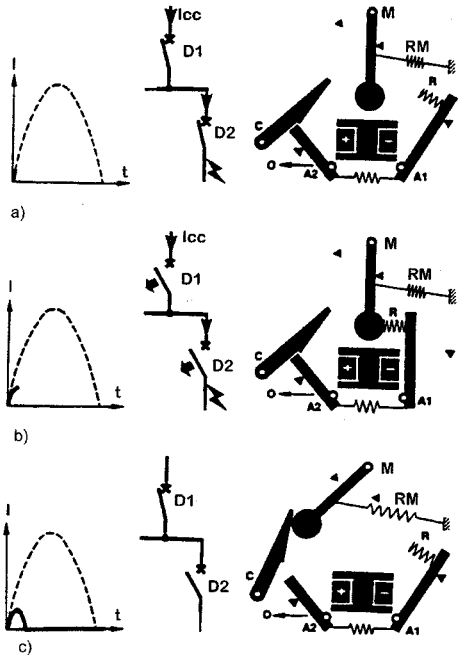


Figura 6. Sistema SELLIN.

En el segundo caso figura 7, el defecto situado entre D1 y D2, afecta sólo a D1, el debe pues eliminarlo. Siguiendo el sistema del primer caso tenemos:

Figura 7a: La corriente de defecto es ahora sólo limitada por D1 que no recibe orden de disparo. El funcionamiento del circuito magnético es idéntico al caso anterior.

Figura 7b: Los contactos de D1 se han cerrado nuevamente después de un tiempo correspondiente al de desplazamiento de la masa M, función de los esfuerzos de impulsión de A1 y de inercia M. Al aparecer una segunda onda de corriente de cortocircuito y encontrar a la palanca A2 libre del enclavamiento de C, la atrae hacia el núcleo y provoca el disparo de D1.

Figura 7c: La corriente ha sido cortada definitivamente, y el sistema mecánico, por acción de los resortes, recobra su posición inicial.

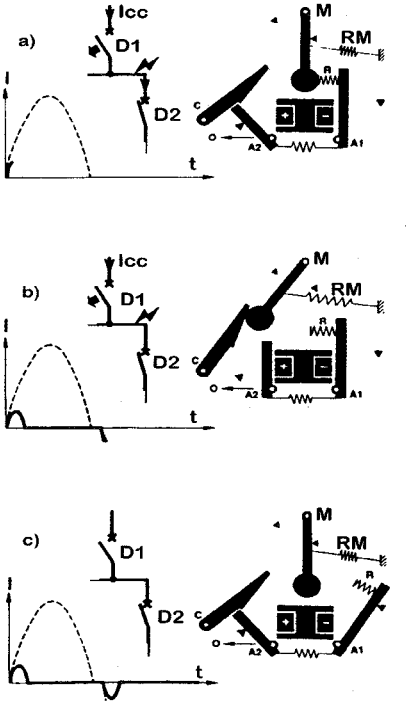


Figura 7. Sistema SELLIN.

4.5.- Selectividad energética.

La selectividad energética existe si la energía que deja pasar el interruptor automático de aguas abajo es inferior a la energía necesaria para el funcionamiento del interruptor de aguas arriba.

Esta técnica es una mejora de la selectividad amperimétrica que permite asegurar una selectividad total. La técnica de la selectividad energética es utilizable para intensidades de cortocircuito importantes, al menos iguales a 35 In correspondientes a tiempo de corte inferiores a 10 milisegundos. La comparación de las características de funcionamiento ya no se efectúa siguiendo la relación entre la intensidad de cortocircuito y el tiempo de funcionamiento I(t) sino entre el valor de la energía térmica que deja pasar el interruptor automático y la intensidad de cortocircuito I_{cc}.

El valor de la energía térmica en función de la intensidad de cortocircuito se mide en laboratorio para cada tipo de interruptor automático. La figura 8 muestra de esta forma las características I(t) e $I^2t(I)$ correspondientes para un interruptor automático limitador de gran poder de corte; arriba tiempo real de corte del interruptor automático en funcióndel valor eficaz de la corriente de cortocircuito y abajo valores de las solicitaciones térmicas que deja pasar el interruptor automático en función del valor eficaz de Icc.

Las diferentes zonas de estas características presentan las condiciones de protección y de corte siguientes:

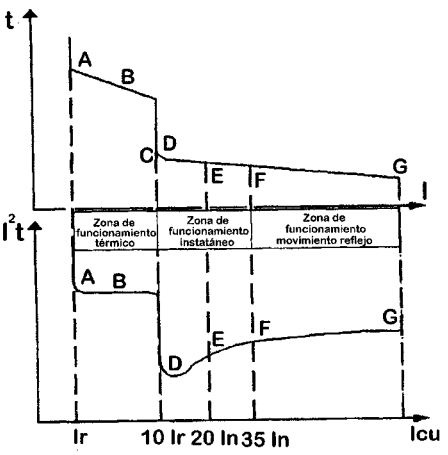


Figura 8. Representación de energía de disparo

- A: Funcionamiento térmico (sobrecargas).
- B: Funcionamiento largo retardo.
- C: Umbral de funcionamiento instantáneo (10 Ir, tiempo de corte de 50 ms aproximadamente).
- D: Disminución del tiempo de corte de 20 ms a 16 In aproximadamente.
- E: Umbral de repulsión de los contactos (20 In, tiempo de corte de 10 ms).
- F: Apertura de los contactos por movimientos automático de repulsión (1,7 veces el umbral de repulsión).
- G: Límite del poder de corte del interruptor automático (400 In, tiempo de corte inferior a 5 ms).

Estas curvas muestran que el funcionamiento del interruptor automático viene determinado siguiendo el valor de la intensidad de la manera siguiente:

- AB: Apertura pilotada por un relé térmico o electrónico (intensidades inferiores al umbral de funcionamiento instantáneo).
- CDE: Apertura pilotada por un relé instantáneo (entre el umbral de funcionamiento instantáneo, 5 a 10 veces la intensidad de regulación, y 20 veces la intensidad asignada del interruptor automático).

- FG: Apertura por movimiento automático de repulsión de los contactos; este funcionamiento sólo necesita la acción de un relé para mantener el interruptor automático en posición abierto y evitar que los contactos vuelvan a cerrarse (intensidades superiores a 35 In).

Los valores de las intensidades precedentes sólo tienen un valor indicativo y dependen de las características de los aparatos y de las condiciones de regulación de los relés:

- En la zona de funcionamiento térmicos dependen de la intensidad de regulación del relé para el funcionamiento a tiempo inverso Ir, generalmente comprendido entre 0,8 y 1 veces el calibre del relé, el cual es inferior o igual a la intensidad asignada In del interruptor automático.
- En la zona de funcionamiento instantáneo, depende el umbral de funcionamiento instantáneo del relé que puede estar comprendido entre 5 y 10 el calibre del relé.
- En la zona de funcionamiento automático dependen únicamente de la intensidad asignada In del interruptor automático.

La selectividad está organizada fundamentalmente de tres maneras, siguiendo el valor de la intensidad de defecto, en relación con las condiciones de funcionamiento (figura 9);

- En la zona de protección contra las sobrecargas (funcionamiento térmico), la selectividad es amperimétrica; la relación entre las intensidades de regulación de los relés debe ser al menos igual a 1,5.
- En la zona de protección contra los cortocircuitos débiles o medianos (entre el umbral de funcionamiento y el umbral de repulsión de los contactos), la selectividad es amperimétrica entre los umbrales de funcionamiento instantáneo de los dos relés; para intensidades de cortocircuito superiores, puede ser necesaria una selectividad cronométrica para complementar la selectividad amperimétrica. La relación entre los umbrales de funcionamiento instantáneos de los relés debe ser al menos igual a 1,6.

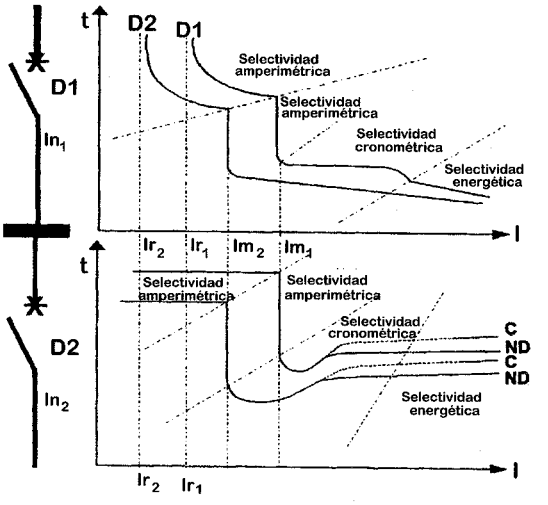
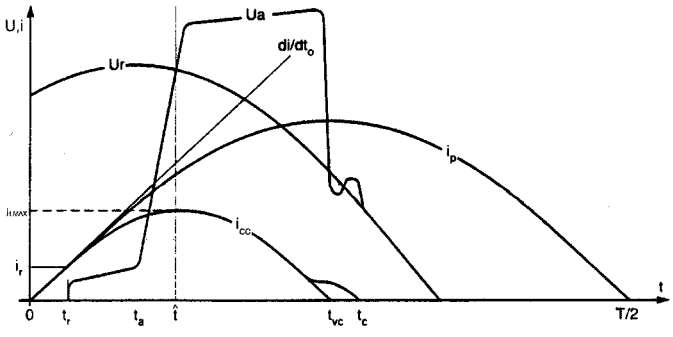


Figura 9. Zonas de selectividades.

- En la de intensidades de cortocircuito importantes (superiores aproximadamente a 35 veces la intensidad asignada del interruptor automático In), la selectividad es energética: la intensidad de cortocircuito provoca la separación de los contactos de dos interruptores automáticos, hecho que limita muy fuertemente la intensidad. La energía disipada provoca el movimiento reflejo del pistón que acciona el mecanismo de apertura del automático de aguas abajo y su apertura, pero es insuficiente para provocar la apertura del interruptor automático de aguas arriba. La relación de intensidades asignadas de los dos interruptores automáticos debe ser al menos igual a 2.5.

Así, la selectividad puede ser total para todos los valores de las intensidades de defecto con dos interruptores automáticos de categoría A, gracias a la selectividad energética que introduce una nueva concepción de la selectividad que la norma CEI 947-2 no ha tenido en cuenta.



U_a: tensión de arco
U_r : tensión de la red
i_p: corriente presunta
i_{cc}: corriente limitada
i_{LMAX}: corriente de cresta cortada
i_r : corriente de repulsión de los contactos
$\hat{t}$: instante de îc
t_a : instante de la aparición del arco
t_c: tiempo de corte
t_r : instante de repulsión de los contactos
t_{vc}: tiempo virtual de corte
ω : pulsación de la onda cortada

Figura 10. Ruptura con limitación.

Cuando las relaciones entre las intensidades de regulación o los umbrales de funcionamiento instantáneos son inferiores a los valores límites indicados, la selectividad puede asegurarse mediante una selectividad cronométrica que retarda el funcionamiento del interruptor automático de aguas arriba en un tiempo superior al tiempo de apertura del interruptor automático de aguas abajo.

4.5.1.- Ruptura con limitación.

La figura 10 muestra la evolución de las corrientes y tensiones correspondientes al fenómeno de limitación sobre un semiperíodo. La ley que aplicamos sobre la evolución de la corriente de cortocircuito (icc) es:

$$Ur - Ua = ricc + L\frac{dicc}{dt} \approx L\frac{dicc}{dt} \qquad (1)$$

- En el origen del cortocircuito, Ua es nula, no hay arco, con lo que icc e ip son iguales y tienen la misma pendiente.
- Cuando Ua se iguala a Ur, icc pasa por su valor máximo (I_{LMAX}) ya que su derivada es nula.
- Cuando Ua es superior a Ur, icc decrece y se anula en un tiempo tc.

Se comprueba que la onda de corriente cortada es equivalente a una semisenoide de período igual a dos veces el tiempo virtual de ruptura (tvc).

Con estas informaciones se consigue fácilmente determinar la energía disipada en las impedancias del circuito afectado.

La expresión reducida de esta energía, que denominamos energía de ruptura es:

$$Ec = \int_0^{tvc} i_{cc}^2\, dt \qquad (2)$$

siendo icc, una función senoidal de valor máximo Icc_{MAX}:

$$Ec = \frac{1}{2} I_{CCMAX}^{2} * t \qquad (3)$$

Es interesante expresar Ec en función de Ip, del tiempo (tvc) y de I_{LMAX} como Ec = f (Ip, tvc) ó Ec = f (I_{LMAX}, tvc):

- **tvc ≥ 10 ms:**
  Este tiempo significa que la corriente de defecto es de poca importancia pues los contactos del interruptor automático no presentan repulsión y no se considera el efecto limitador de la tensión de arco, luego:

$$icc = ip \qquad (4)$$

  con lo que:

$$I_{CCMAX} = \sqrt{2} Ip \qquad (5)$$

  con ello, la expresión (3) se transforma en:

$$Ec = I_p^2 t \qquad (6)$$

- **tvc < 10 ms:**
  El interruptor automático limita la corriente de defecto, icc e ip tienen, como indicado anteriormente, la misma pendiente en el origen, pues:

$$\frac{di}{dt} = wIp\sqrt{2} = w'icc$$
$$w' = \frac{\Pi}{t_{vc}} \qquad (7)$$

  con lo que, la igualdad anterior se transforma:

$$t_{vc} wIp\sqrt{2} = \pi I_{LMAX}$$
$$I_{LMAX} = t_{vc} 2fIp\sqrt{2}$$
$$tvc = \frac{I_{LMAX}}{2fIp\sqrt{2}} \qquad (8)$$

  igualado de la expresión (3) el valor de Icc_{MAX}^{2} con el valor obtenido en la expresión anterior:

$$I_{CCMAX}^2 = \frac{2Ec}{t_{vc}}$$
$$I_{LMAX}^2 = \left(t_{vc} 2fIp\sqrt{2}\right)^2 \qquad (9)$$

con lo que resulta:

$$\frac{2Ec}{t_{vc}} = t_{vc}^2 f^2 Ip^2 8$$

$$Ec = 4t_{vc}^3 f^2 Ip^2 \qquad (10)$$

Volviendo nuevamente a (8) y combinado con (3):

$$t_{vc} = \frac{2Ec}{I^2_{LMAX}} = \frac{I_{LMAX}}{2fIp\sqrt{2}}$$

$$Ec = \frac{I^3_{LMAX}}{4\sqrt{2}fIp} \qquad (11)$$

Las expresiones (10) y (11) permiten trazar las rectas de los tiempos de ruptura de valores de cresta de las corrientes limitadas en el diagrama doble logarítmico de energías de ruptura y corrientes de cortocircuito presuntas.

4.5.2.- Representación de energías.

Para razonar en energías y comprender la selectividad energética, un elemento importante es la elección del cuadro de representación de las curvas de funcionamiento.

Las curvas t = f (Ip) normalmente utilizadas para los estudios de selectividad no son de aplicación con los interruptores automáticos limitadores cuando las corrientes sonsuperiores a 35 In (ello corresponde a los tiempos de ruptura inferiores a 10 ms, a la frecuencia de 50 Hz).

La selectividad debe estudiarse a partir de los fenómenos transitorios y ya no a partir de los fenómenos periódicos. La comprensión de la selectividad energética necesita la caracterización y la explotación de:

- La onda de corriente que deja pasar el interruptor automático durante la ruptura, caracterizada por su integral de Joule $\int i^2 dt$ (generalmente expresada como I^2t) que corresponde a la energía de ruptura Ec.
- La sensibilidad de los relés ante la energía correspondiente al impulso de corriente.

Así, lógicamente estas características se pueden representar por las curvas $I^2t = f(Ip)$ y $t = f(Ip)$ (figura

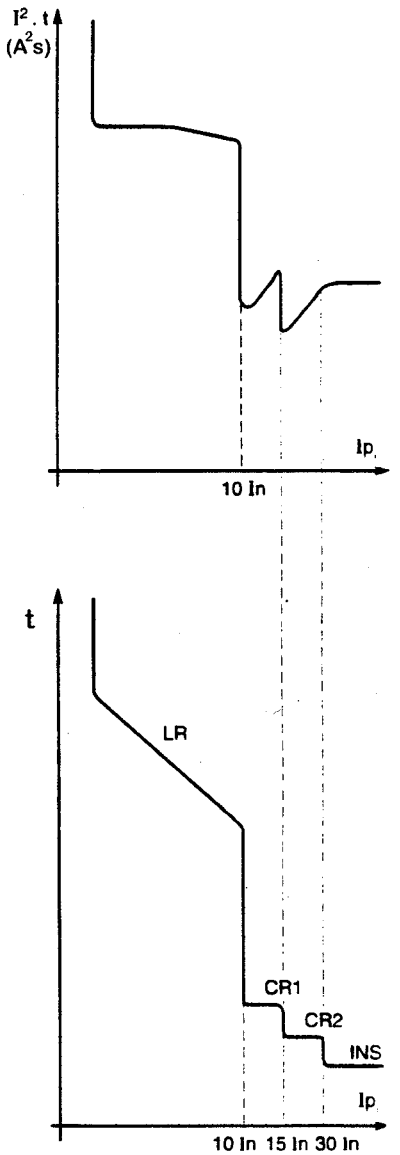


Figura 11. Representación de energía de un interruptor automático.

11). Hay que notar que la norma CEI 947-2 prevé la caracterización de los interruptores automáticos por sus tipos de curvas.

Por razones prácticas, la curva $I^2t = f(Ip)$ se representa en un sistema de coordenadas logaritmo-logaritmo.

Para el estudio de la selectividad, los límites de energía de ruptura (I^2t de los interruptores automáticos) se sitúa entre 10^4 y 10^7 A^2s para valores de corriente presunta entre 1 y 100 kA. En el diagrama cartesiano tomaremos tres décadas para los valores de Ec y dos para la corriente. Si consideramos que la semionda de corriente cortada es equivalente a una semi-senoide con una pendiente en el origen igual a la corriente presunta, la energía de ruptura Ec puede expresarse en función de Ip a partir de las expresiones siguientes:

- **para $t_{vc} \geq 10$ ms:**

$$Ec = I_P^2 t \qquad (12)$$

- **para $t_{vc} < 10$ ms:**

$$Ec = 4f^2 I_P^2 t_{vc}^3$$

o

$$Ec = \frac{I^3_{LMAX}}{4\sqrt{2} f I_P} \qquad (13)$$

Partiendo de estas ecuaciones es posible mejorar el diagrama de ejes I^2t/Ip para obtener informaciones suplementarias: tiempo virtual de ruptura (tvc) y valor de cresta de corriente limitada (I_{LMAX}).

- **Líneas de los tiempos (figura 12):**

Sobre el diagrama I^2t/Ip puede trazarse una familia de rectas correspondientes a las condiciones de ruptura o tiempo constante para una frecuencia determinada. Ejemplo: para f = 50 Hz determinamos las rectas para:

- t = 20 ms correspondiente al tiempo de ruptura a considerar más corrientemente ya que Ip es superior al umbral de disparo instantáneo e inferior al de repulsión de los contactos:

$$Ec = I_P^2 \, 2*10^{-2} \qquad (14)$$

- t = 10 ms que es el tiempo de ruptura en el umbral de la limitación:

$$Ec = I_P^2 \, 2*10^{-2} \qquad (15)$$

- t = 9 a 4 ms que corresponde al comportamiento del interruptor automático como limitador:

$$Ec = 4*50^2 I_P^2 t_{vc}^3 \qquad (16)$$

- **Líneas de corrientes de cresta máxima:**

A partir de la ecuación:

$$Ec = \frac{I^3_{LMAX}}{4\sqrt{2}fIp} \qquad (17)$$

se construye una familia de rectas que corresponde a los valores de cresta limitadas constantes (figura 12).

Es de notar que esta tabla de representación permite caracterizar los interruptores automáticos y los relés a 50 Hz, para los defectos tripolares, bipolares o unipolares.

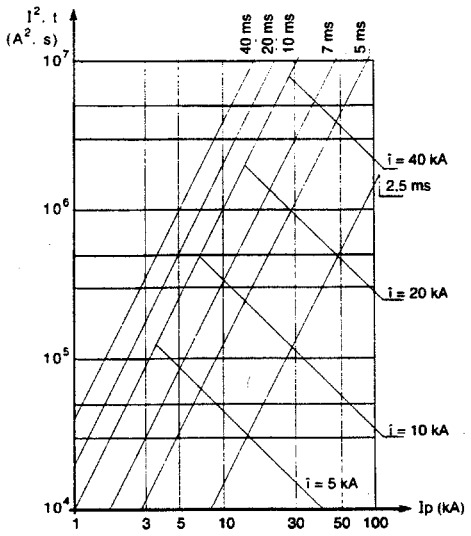
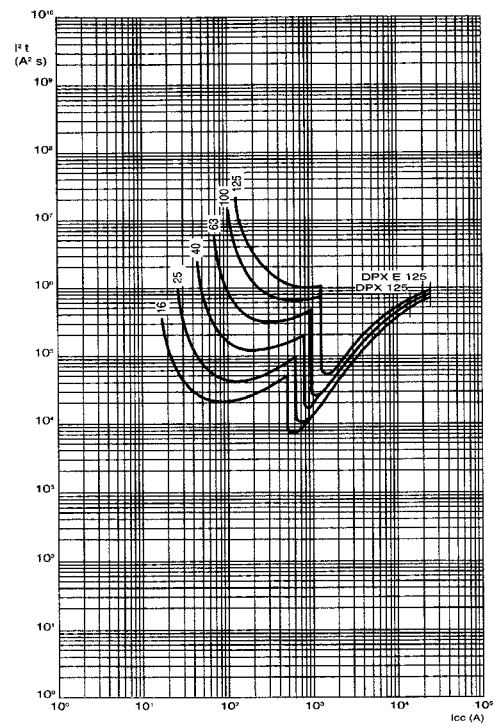


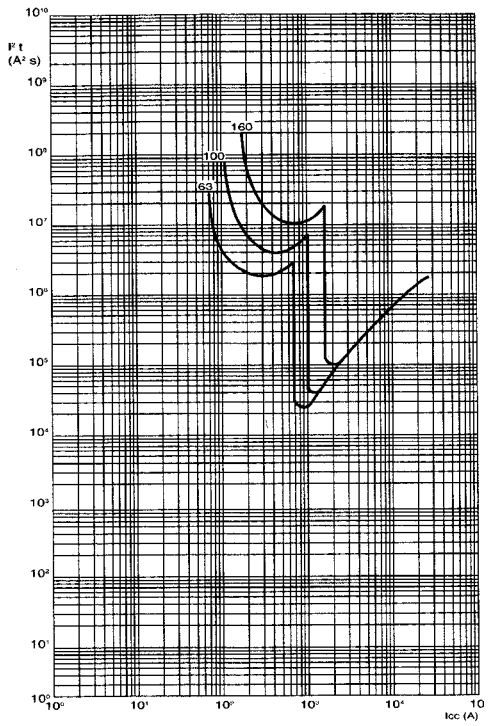
Figura 12. Gráfico de representación de las energías.

DPX 125



Icc = corriente simétrica presunta de cortocircuito (valor eficaz en A)
I²t = energía específica pasante (A²s)

DPX 160



Icc = corriente simétrica presunta de cortocircuito (valor eficaz en A)
I²t = energía específica pasante (A²s)

Figura 13. Característica de energía de ruptura de un interruptor automático de 250 A.

4.5.3.- Características de un interruptor automático.

La característica del valor de I^2t que deja pasar un interruptor automático sale de los ensayos de tipo normalizados o de simulaciones numéricas realizadas a una tensión y frecuencia determinadas. Las curvas que siguen corresponden a defectos trifásicos a 400V - 50 Hz. Curvas similares pueden construirse para otras frecuencias y otras tensiones.

Sobre la curva de la figura 14, que corresponde a un interruptor automático de 250 A, equipado con un relé electromecánico con umbral a 10 In, aparecen una serie de informaciones.

Estas informaciones caracterizan las diferentes fases del comportamiento, en ruptura, del interruptor automático limitador, según el valor de la corriente de cortocircuito presunta.

- Punto A: a partir del punto en que la corriente de defecto alcanza el umbral de funcionamiento del relé, el tiempo de ruptura es típicamente de 50 ms para un relé instantáneo.
- Punto B: cuando la corriente de defecto supera el umbral de funcionamiento del relé instantáneo, el tiempo de ruptura disminuye y se estabiliza en 20 ms a partir de 16 In.
- Punto C: cuando la corriente de defecto se sitúa al nivel del umbral de repulsión de contactos, se produce un inicio de la limitación de la corriente por la aparición de una caída de tensión de arco en el circuito. Esta limitación provoca una reducción en los tiempos de paso por cero de la corriente con lo que la eliminación del defecto pasa de 20 ms a 10 ms a medida que aumenta Ip.
- Punto D: cuando la corriente de defecto es del orden de 1,7 veces el umbral de repulsión, la energía de repulsión de los contactos es suficiente para que éstos se separen totalmente; el tiempo de ruptura es entonces típicamente 10 ms.
  Esta ruptura, de tipo reflejo, es autónoma y no precisa un relé sino es para confirmar el estado de desconexión del interruptor automático y evitar que los contactos cierren nuevamente de forma intempestiva.
- Zona E: cuando la corriente de defecto evoluciona alrededor de 2 veces el valor umbral de repulsión de los contactos, la limitación de la corriente de defecto es cada vez más eficaz, lo que se traduce en que los tiempos de ruptura son cada vez mas cortos.
- Punto F: el final de la curva representa el límite del poder de ruptura del interruptor automático.

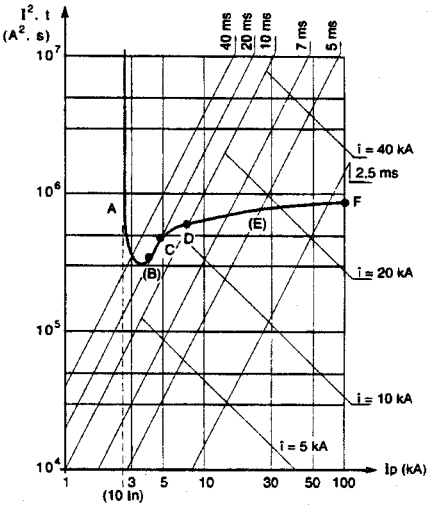


Figura 14. Curva de ruptura de un interruptor automático limitador.

La curva que se ha trazado es muy rica en informaciones:

- Energía de ruptura (I^2t) en función de la corriente presunta.
- Umbral de disparo (I umbral; punto A).
- Corriente de inicio de repulsión (Ir; punto C).
- Poder de corte (punto F).
- Tiempo de ruptura (tvc) en función de la corriente presunta.
- Corriente de cresta limitada (I_{LMAX}) en función de la corriente presunta (Ip).
- Corriente a partir de la cual tvc < 10 ms (inicio de la limitación).

4.5.4.- Características de los relés.

Los relés vienen caracterizados por el tiempo de respuesta ante una corriente determinada, (onda, semionda, etc.).

Haciendo variar la duración y el valor de cresta de la corriente, lo que corresponde con diferentes corrientes limitadas por un interruptor automático se obtiene, por ensayos sucesivos, una serie de puntos que pueden situarse sobre el gráfico descrito anteriormente con la finalidad de obtener la curva característica de un relé.

I) RELÉS MAGNÉTICOS:

Ia) Relé instantáneo.

Constituido, generalmente, de una U de material magnético que constituye el núcleo y de una armadura, generalmente móvil, asegura la protección contra los cortocircuitos. Su tiempo de intervención es inferior a 50 ms en su umbral de funcionamiento (situado entre 5 y 10 veces la corriente nominal) y decrece rápidamente por debajo de 10 ms cuando la corriente aumenta (figura 15).

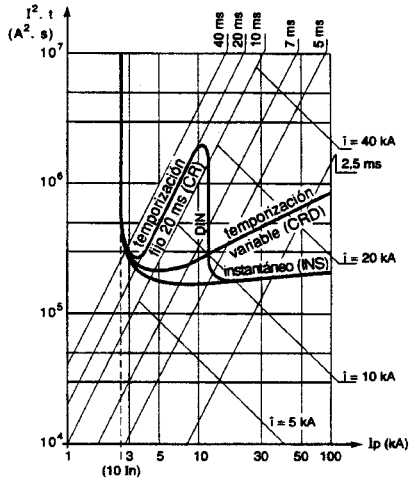


Figura 15. Curvas de diferentes relés magnéticos.

Ib) Relé de umbral alto (DIN).

Los DIN tienen por misión en el cuadro de empleo de la selectividad cronométrica, limitar las solicitaciones térmicas (figura 15) sobre la instalación y el aparato de ruptura. El relé DIN es un relé instantáneo con un umbral de varias decenas de In. Puede ser de tipo electromagnético o electrónico.

Ic) Relé a temporización constante.

Se trata de un relé instantáneo equipado con un sistema de retardo tipo relojería con la finalidad de convertir su disparo selectivo con relación al interruptor automático instalado aguas abajo. Los retardos pueden estar comprendidos entre 10 y 500 ms, generalmente son regulables por escalones.
La figura 15 describe la curva (escalón 20 ms) correspondiente a un retardo corto. Si la energía de ruptura (I^2t), por su retardo importante debe limitarse, interviene el DIN (figura 15).

Id) Relé a temporización variable en función de Ip (corto retardo dependiente CRD).

La temporización se realiza por la inercia de una masa; esta temporización es inversamente proporcional a Ip (figura 15).

Ie) Relé electrónico.

Los disparos instantáneos de los relés electrónicos son sensibles al valor eficaz (RMS) o al valor de cresta de la corriente. Su característica I^2t está situada, para valores de corriente de defecto importantes, teóricamente sobre una recta I_{LMAX} = constante. En realidad esto es cierto para tiempos de impulsión de corrientes superiores al tiempo de reacción del conjunto accionador del relé (típicamente 4 ms), por debajo de este valor la inercia de la parte mecánica del relé hace que se retorne, para valores altos de Ip, a una característica del tipo relé electromecánico instantáneo.

Entonces, es necesario caracterizar el relé por la curva característica Ec = f (Ip) efectuando ensayos idénticos a los efectuados con los relés magnéticos.

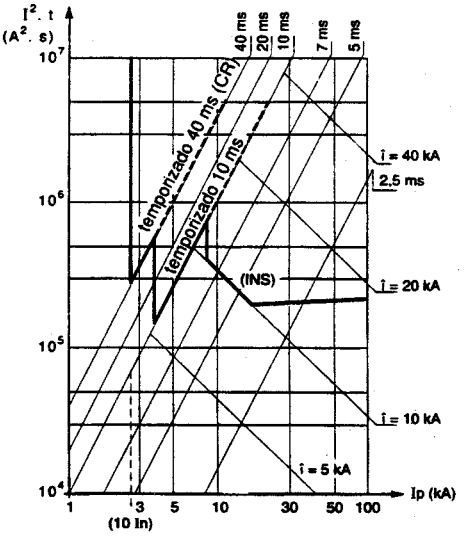


Figura 16. Asociación de curvas de relés electrónicos.

Estos relés pueden ser del tipo instantáneo o del tipo retardado. Es posible asociar varios tipos de relés electrónicos, por ejemplo:

- 10 a 15 In CR (40 ms).
- 15 a 30 In CR (10 ms).
- > a 30 In INS.

La figura 16 ilustra este ejemplo, las curvas de esta asociación son comparables a las de la figura 11 en cuanto a la energía de ruptura del interruptor automático.

II) RELÉS CON DETECCIÓN DE ARCO:

Los detectores de arco generalmente van asociados a relés electrónicos y pueden utilizarse para asegurar la protección:

- De una celda: si en el interior de la celda se produce un arco, el detector ordena la apertura del interruptor automático de entrada.

- De un interruptor automático selectivo: el detector de arco, situado en la cámara de ruptura, provoca, vía el relé electrónico, el disparo instantáneo del interruptor automático.

Con ello se realiza la autoprotección del aparato y permite su empleo, justo hasta el límite de su capacidad electrodinámica.

III) RELÉ A PRESIÓN:

En la cámara de ruptura de un interruptor automático aparece una presión, que es consecuencia de la energía desarrollada por el arco. Esta presión puede, a partir de cierto nivel de la corriente de defecto, ser un medio de detección y de disparo.

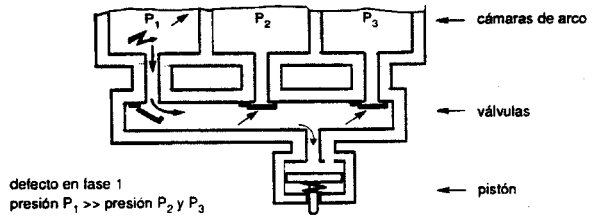


Figura 17. Principio de relé a presión.

Ello puede obtenerse canalizando la expansión de los gases contenidos en el recinto de ruptura hacia un pistón de mando de un sistema de disparo del interruptor automático (figura 17).

El relé a presión puede utilizarse:

- para asegurar la autoprotección de un interruptor automático selectivo, (como el detector de arco);
- para mejorar el comportamiento en ruptura y la seguridad de funcionamiento de un interruptor automático limitador rápido.

Si a cada interruptor automático se le asocia un relé a presión bien calibrado, la selectividad entre los interruptores automáticos de diferente calibre queda garantizada para cualquier sobreintensidad superior a 20 In.

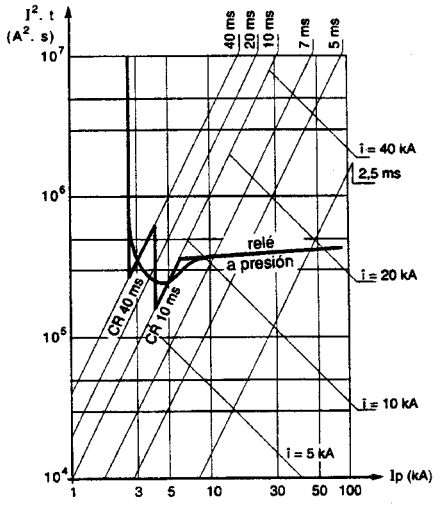


Figura 18. Asociación de relés (electromagnéticos y presión o electrónico y presión).

El relé a presión, asociado a un relé CDR, electromagnético o electrónico a doble corto retardo se muestra en la figura 18.

Cuanto mayor es la corriente de cortocircuito presunta, tanto menor es el tiempo de reacción, lo que conduce a una desconexión a energía I^2t casi constante.

4.5.5.- Ejemplo.

En la figura 19 se muestra cuando la selectividad es total o parcial para distintos interruptores automáticos dispuestos en cascada.

Nota:
ST160, ST200 y ST250 relés electrónicos colocados sobre interruptores automáticos de calibre 250 A.
ST 400 - ST 500 y ST 630: relés electrónicos colocados sobre interruptores automáticos de calibre 630 A.

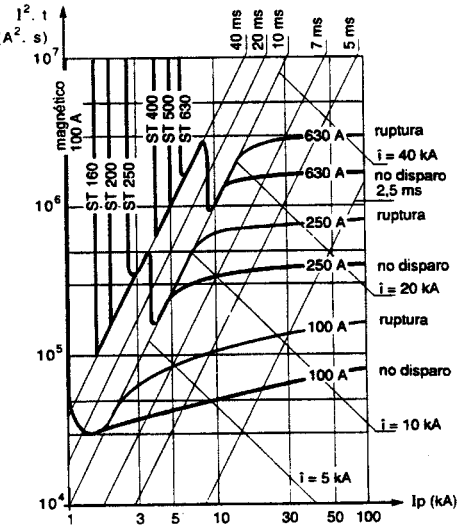


Figura 19. Selectividad energética de interruptores automáticos.

4.5.6.- Ventajas de la selectividad energética.

La selectividad energética completa las selectividades clásicas (amperimétricas y cronométricas) a las cuales aporta las ventajas siguientes:

- El corte se efectúa a energía constante, el tiempo de corte disminuye cuando la intensidad de cortocircuito aumenta, esta característica es particularmente importante para los conductores y materiales de la instalación eléctrica en razón de la limitación de las solicitaciones térmicas que pueden sufrir.
- La seguridad de funcionamiento del interruptor automático depende solamente del mando del mecanismo de apertura.
- La reducción de las ausencias de tensión provocadas por los cortocircuitos, a causa de la reducción del tiempo de corte real.
- Una selectividad total entre dos interruptores automáticos en serie cuya relación de intensidades asignadas es al menos igual a 2,5.
- Compatibilidad de protección y de selectividad con los interruptores automáticos no limitadores.
- Simplificación de estudios de selectividad.
- Mejora de disponibilidad de la energía eléctrica a causa de la disminución importante de los efectos de los cortocircuitos sobre el funcionamiento y el comportamiento de los materiales alimentados por la instalación así protegida.
- Gracias al principio del corte por movimiento automático por repulsión de los contactos, la solicitación térmica que deja pasar el interruptor automático puede reducirse en una relación superior a 100. Esta reducción se produce gracias a la selectividad energética que permite así una muy buena protección de los diferentes circuitos de la instalación.

5.- REGLAS PRÁCTICAS DE SELECTIVIDAD.

5.1.- Selectividad en redes radiales.

En la dirección del flujo de la energía pueden estar conectados en serie:

- Fusible con fusible en serie.
- Interruptor de potencia con interruptor de potencia en serie.
- Interruptor de potencia con fusible en serie.
- Fusible con interruptor de potencia en serie.
- Varias alimentaciones paralelas sobre un interruptor automático.
- Fusibles HH (alta tensión) con fusibles NH (baja tensión) en serie.

5.1.1.- Selectividad entre fusibles conectados en serie.

Las líneas de alimentación y las derivaciones salientes de las barras colectoras conducen corrientes de servicio de diferentes intensidades y tienen, por tanto, diferentes secciones, razón por la cual los fusibles de protección tienen intensidades nominales diferentes. Por otra parte, en caso de falta eléctrica detrás del fusible subordinado fluye por ambos la misma corriente.

Como regla general debe considerarse primeramente:

- Dos fusibles conectados en serie son selectivos, cuando sus curvas características de fusión, más exactamente sus bandas de dispersión, no se tocan y corren a suficiente distancia la una de la otra (figura 20).

  Esta regla no tiene validez para corrientes de cortocircuito altas. En ese caso, la selectividad solamente puede ser garantizada si la energía de ruptura (I^2t) durante el tiempo de fusión y de extinción del fusible postconectado es menor que la energía de ruptura solamente durante el tiempo de fusión del fusible preconectado.

Por costumbre, en la distribución de baja tensión, se acepta que dos fusibles del mismo tipo (acompañamiento, etc.) son selectivos si sus calibres están en una relación igual o superior a 1,6 y en alta tensión, la experiencia demuestra que la relación debe ser, como mínimo, de 2.

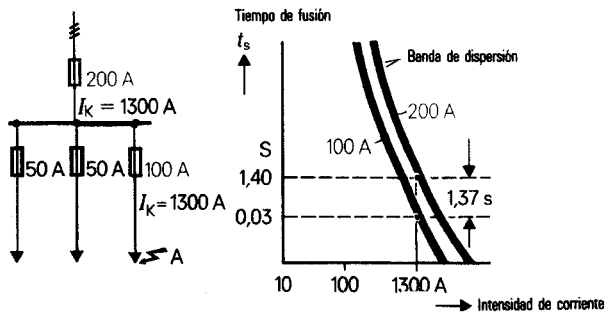


Figura 20. Selectividad entre fusibles.

De los datos técnicos de los fusibles NH-ISO pueden tomarse detalles de la selectividad entre ellos en redes radiales y en redes malladas, para tensiones de hasta 660 V.

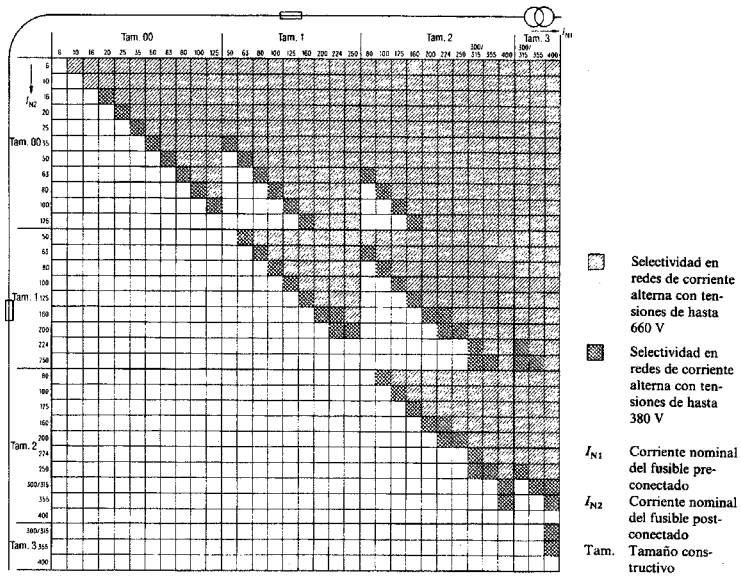
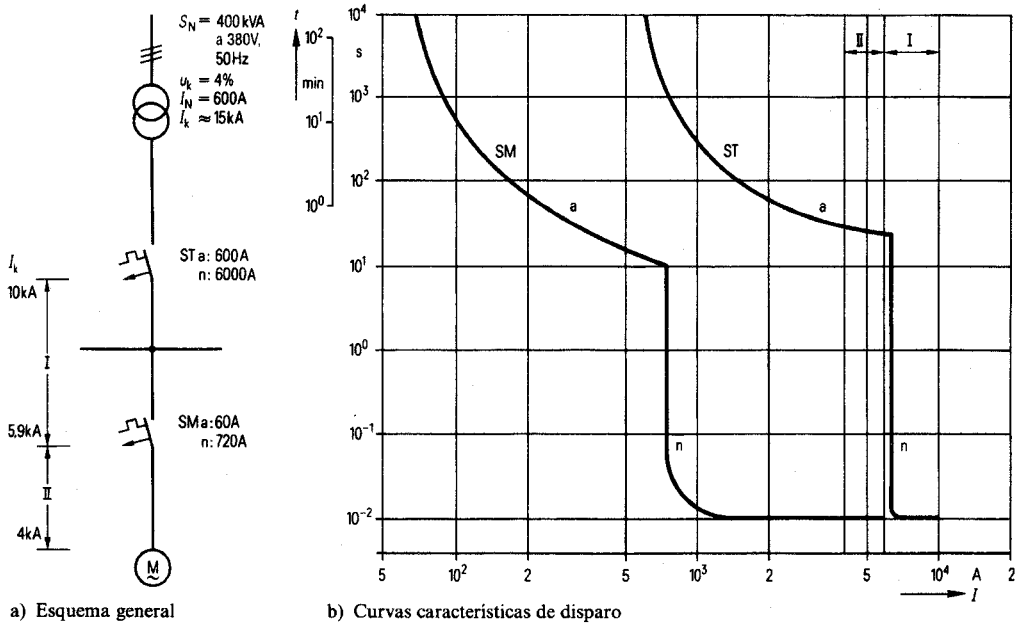


Figura 21. Selectividad entre fusibles NH clase de servicio gl.

5.1.2.- Selectividad entre interruptores automáticos conectados en serie.

- **Selectividad mediante escalonamiento de las corrientes de disparo instantáneo:**

Una selectividad mediante el escalonamiento de las corrientes de disparo instantáneo, solamente puede realizarse cuando las corrientes de cortocircuito previstas en los puntos de instalación de los interruptores de potencia difieren lo suficiente. La corriente de reacción del disparador del interruptor preconectado debe ser ajustada a un valor mayor que la máxima corriente de cortocircuito posible en el punto de instalación del interruptor postconectado (figura 22).



a) Esquema general b) Curvas características de disparo

SM Interruptor de potencia para la protección del motor
ST Interruptor de potencia para la protección del transformador
a Disparador con retardo dependiente de la corriente (disparador contra sobrecargas)
n Disparador sin retardo (disparador en caso de cortocircuito)

Figura 22. Selectividad entre interruptores automáticos en serie, para distintas corrientes de cortocircuito.

- **Selectividad mediante disparadores con retardo independiente de la corriente (disparadores con breve retardo):**

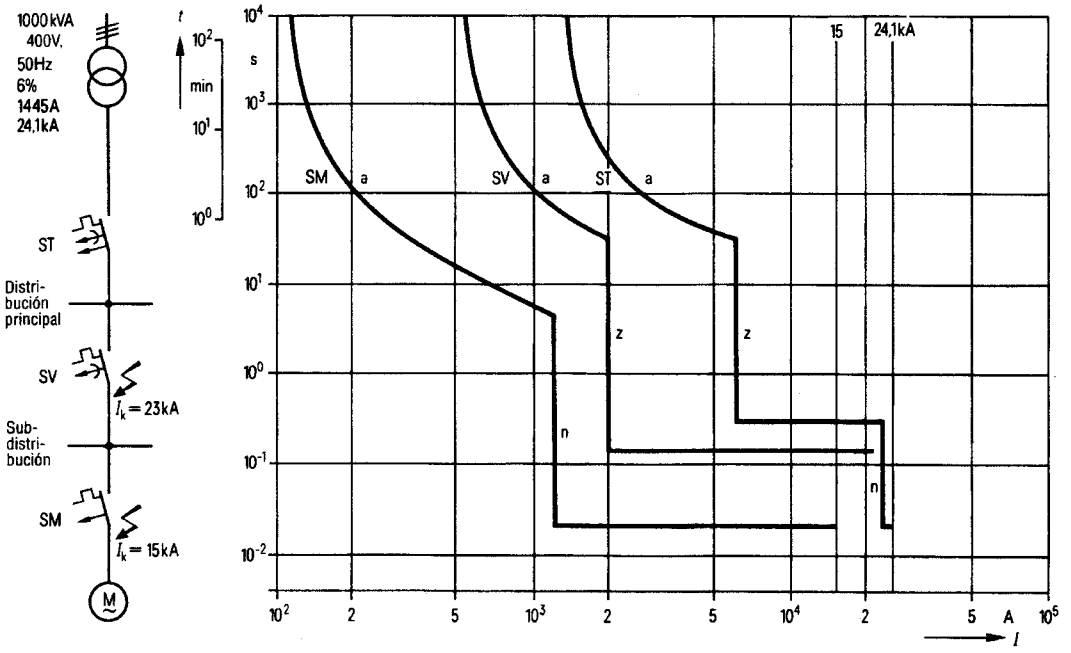
Cuando las corrientes de cortocircuito previstas en los puntos de instalación de los interruptores de potencia, debido a la baja resistencia eléctrica de los conductores quelos unen, pueden alcanzar valores semejantes, por ej., cuando las distancias entre ellos son cortas, la selectividad solamente puede lograrse con la ayuda de un disparador con retardo independiente de la corriente, el cual actúa sobre el interruptor preconectado. Con este disparador se retarda la apertura del interruptor preconectado para que el interruptor postconectado tenga suficiente tiempo para interrumpir la corriente de cortocircuito.

Un escalonamiento en el tiempo de aproximadamente 150 ms para los disparadores electromagnéticos y a partir de 70 ms para los disparadores electrónicos, considera todas las tolerancias.

La corriente de reacción del disparador del interruptor preconectado debe ajustarse como mínimo a 1,25 veces la corriente ajustada en el disparador del interruptor postconectado (esto vale solamente cuando las tolerancias de la corriente de reacción de los disparadores no sean mayores que el 10% de la corriente ajustada). El retardo ajustable hasta 500 ms permite el escalonamiento de 4 y más interruptores conectados en serie.

Los interruptores pueden proveerse adicionalmente con disparadores sin retardo para reducir los esfuerzos que sufren las instalaciones en caso de cortocircuito pleno en los bornes de los interruptores preconectados al retardarse la interrupción. La corriente de reacción de estos disparadores adicionales debe ajustarse a un valor lo suficientemente alto, de tal manera, que solamente reaccionen en caso de un cortocircuito pleno y que no afecten la selectividad lograda por el escalonamiento del tiempo de disparo.

En el ejemplo de la figura 23 está representado, además del diagrama con los tres interruptores conectados en serie, el diagrama del escalonamiento. Los interruptores limitadores de la corriente interrumpen la corriente de cortocircuito en pocos milisegundos cuando ésta alcanza el valor de reacción del disparador. Debido a esto, este tipo de interruptores no es apropiado para una selectividad mediante escalonamiento en el tiempo y solamente en casos especiales puede lograrse una selectividad entre ellos y fusibles o interruptores postconectados.



a) Diagrama general

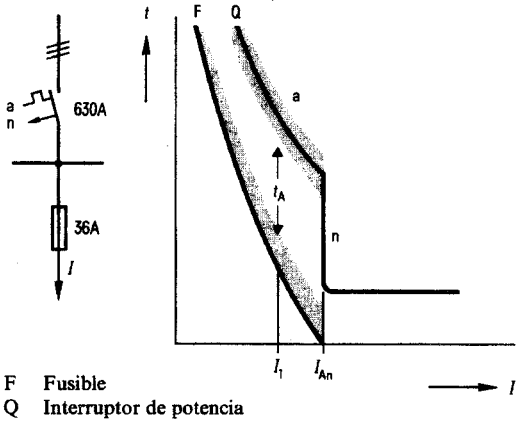
b) Diagrama de escalonamiento del tiempo de disparo

T Interruptor de potencia para la protección del transformador
V Interruptor de potencia para la protección de distribuciones
M Interruptor de potencia para la protección del motor
Disparador con retardo dependiente de la corriente (disparador contra sobrecargas)
Disparador sin retardo (disparador en caso de cortocircuito)
Disparador con retardo independiente de la corriente
(disparador para selectividad mediante escalonamiento del tiempo de disparo)

Figura 23. Selectividad entre interruptores automáticos en serie.

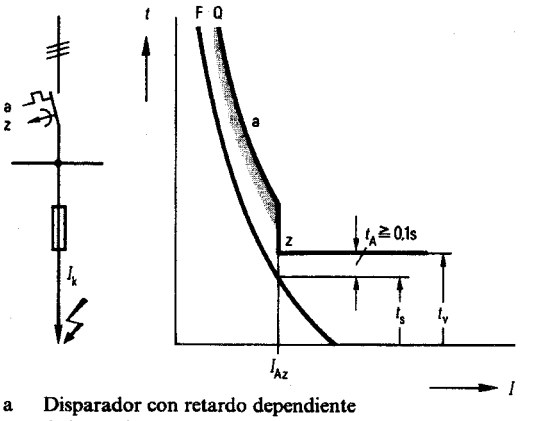
5.1.3.- Selectividad entre un interruptor automático y un fusible en serie.

En el rango de sobrecargas hasta aproximadamente la corriente de reacción del disparador electromagnético del interruptor automático, se tiene selectividad si la curva característica de fusión del fusible no toca la curva característica de disparo del disparador térmico. Esto debe cumplirse aún cuando el interruptor se encuentre precargado (figura 24) y vale para las bandas de dispersión de ambos dispositivos de protección.



F Fusible
Q Interruptor de potencia
a Disparador con retardo dependiente de la corriente
n Disparador sin retardo
t_A Distancia de seguridad
I_{An} Corriente de reacción del disparador n

Figura 24. Selectividad entre un interruptor automático y fusible en el rango de sobrecargas.



a Disparador con retardo dependiente de la corriente
z Disparador con retardo independiente de la corriente
t_A Distancia de seguridad
I_{Az} Corriente de reacción del disparador z
t_s Tiempo de fusión del fusible
t_v Tiempo de retardo del disparador z

Figura 25. Selectividad entre un interruptor automático y fusible en el rango de cortocircuitos.

Cuando la corriente de cortocircuito prevista en el punto de instalación del fusible sobrepasa la corriente de reacción del disparador instantáneo del interruptor puede lograrse selectividad únicamente si el fusible limita la corriente de cortocircuito, de tal manera, que ésta no alcance la corriente de reacción del disparador instantáneo. Esto solamente puede esperarse de fusibles cuya intensidad nominal sea considerablemente menor a la intensidad nominal permanente del interruptor (figura 25).

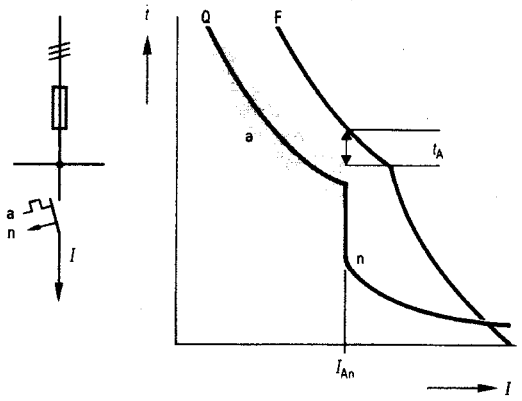
La experiencia nos enseña que, en caso de cortocircuito, con seguridad se tiene selectividad, cuando el tiempo de retardo t_V del disparador instantáneo de la corriente se encuentra, como mínimo, 100 ms sobre la curva característica de fusión del fusible.

5.1.4.- Selectividad entre un fusible y un interruptor automático en serie.

En este caso también se tiene selectividad en el rango de sobrecargas cuando la curva característica de disparo del disparador térmico de la corriente no toca a la curva característica de fusión del fusible (figura 26).

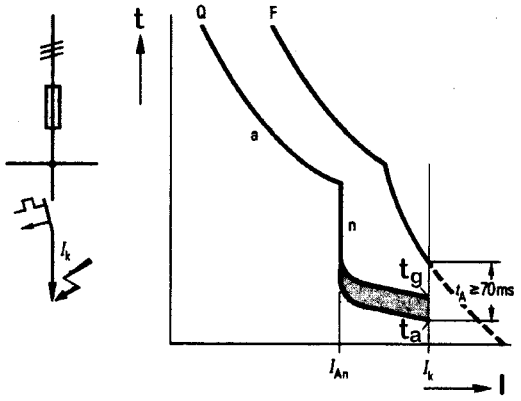
En caso de cortocircuito, debe tomarse en cuenta que la corriente continúa calentando el fusible durante el tiempo de arco del interruptor.

Para la práctica, es suficiente que la curva característica de fusión del fusible corra, como mínimo, 70 ms sobre la curva característica de disparo del disparador sin retardo del interruptor de potencia postconectado (figura 27).



Q Interruptor de potencia
F Fusible
a Disparador con retardo dependiente de la corriente
n Disparador sin retardo
t_A Distancia de seguridad
I_{An} Corriente de reacción del disparador n

Figura 26. Selectividad entre un fusible y un interruptor automático en el rango de sobrecargas.



t_a Tiempo de apertura del interruptor de potencia
t_g Tiempo total de desconexión del interruptor de potencia (tiempo de apertura + tiempo de arco)

Figura 27. Selectividad entre un fusible y un interruptor automático en el rango de cortocircuitos.

5.1.5.- Selectividad entre interruptores automáticos rápidos y fusibles.

En el campo de los cortocircuitos, la selectividad entre un interruptor automático rápido, instalado aguas arriba, y un fusible situado aguas abajo, queda asegurada si la intensidad de cresta limitada en el fusible es inferior al umbral de disparo instantáneo del interruptor automático.

Se trata de selectividad amperimétrica.

Los resultados de ensayos permiten mejorar prácticamente esta regla escribiendo, en forma de tabla, las posibilidades de selectividad, según los calibres.

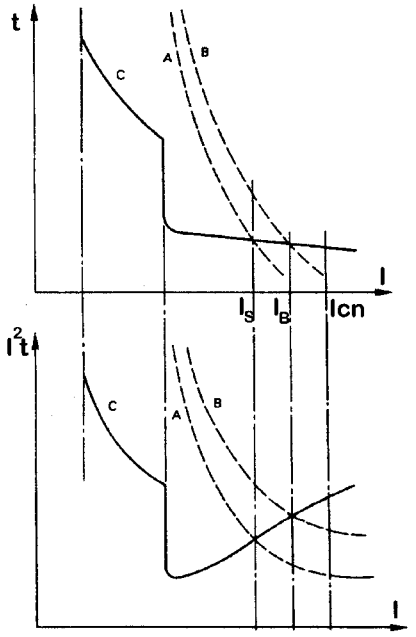


Figura 28. Selectividad entre interruptor automático rápido y fusible.

Aguas arriba	Interruptor automático regulación [A]	5000	6000	7000	10000	12000
Aguas abajo	Fusible calibre [A]	≤ 160	≤ 200	≤ 250	≤ 320	≤ 400

Tabla 1. Selectividad entre interruptores automáticos rápidos y fusibles.

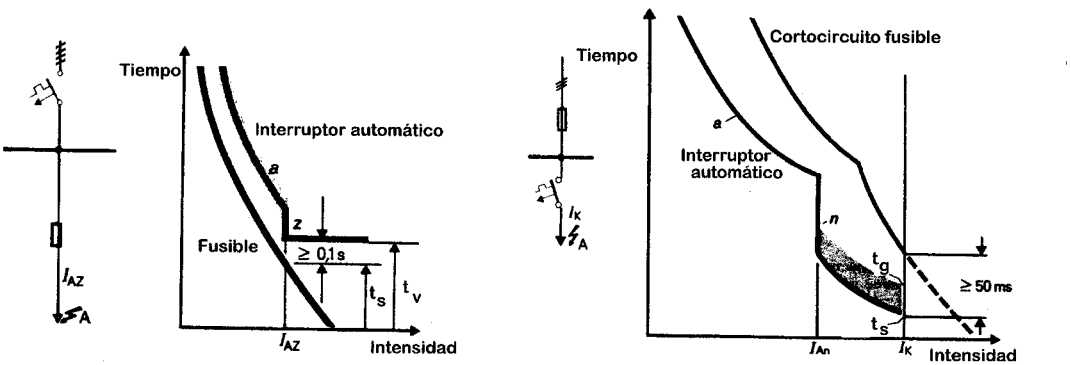


Figura 29. Selectividad entre interruptor automático rápido y fusible.

5.1.6.- Selectividad entre interruptores automáticos rápidos.

En este caso, es imposible utilizar la técnica de selectividad cronométrica.

Los tiempos de no desconexión, son efectivamente, muy similares, unos de otros, y difíciles de medir. Las curvas correspondientes son pues poco definidas y no es posible comparar las posiciones respectivas de funcionamiento de dos aparatos de este tipo conectados en serie. Solamente es posible aplicar la selectividad amperimétrica.

La corriente de cortocircuito máximo, al nivel del aparato situado aguas abajo ha de ser necesariamente inferior a la corriente correspondiente al umbral de disparo del aparato situado aguas arriba. Se puede mejorar utilizando aguas abajo un Interruptor automático limitador.

5.1.7.- Selectividad entre interruptores automáticos rápidos e interruptores automáticos selectivos.

Las posiciones respectivas de ambos aparatos deben de ser las indicadas en la figura 30. Un interruptor automático rápido tiene un tiempo de no desconexión prácticamente nulo.

El interruptor selectivo, en el que el temporizador de retardo corto está al mínimo, tiene un tiempo de no desconexión superior al tiempo total de corte de un interruptor automático

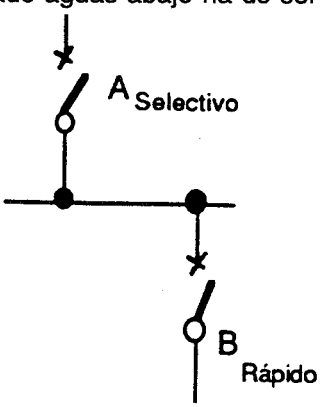


Figura 30. Selectividad de interruptor automático rápido.

rápido. Puede emplearse la técnica cronométrica siempre que la regulación de los tiempos sea la correcta. La visión de las curvas de la figura 31 muestra que no puede olvidarse el parámetro corriente y que según las regulaciones, un interruptor automático considerado rápido, puede no ser selectivo.

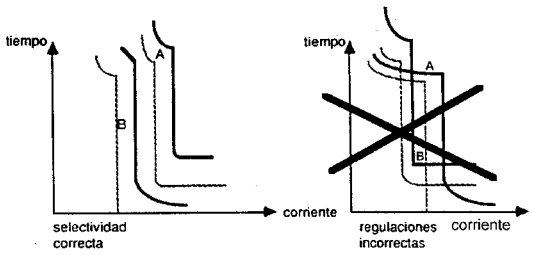


Figura 31. Regulaciones posibles.

5.1.8.- Selectividad entre interruptores automáticos selectivos.

En baja tensión, podemos elegir regulaciones de temporizaciones tales que los tiempos de no desconexión aguas arriba sean superiores a los tiempos totales de corte de los aparatos situados aguas abajo, y, además, coordinados con las corrientes.

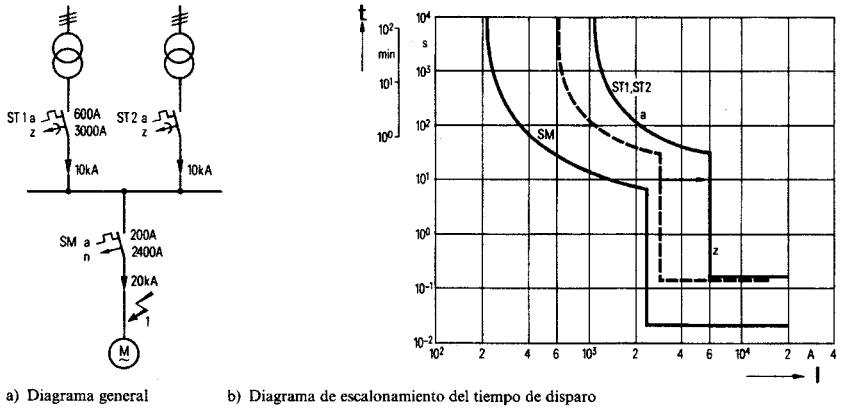
5.1.9.- Selectividad en caso de dos o más alimentaciones paralelas.

En caso de existir dos o más alimentaciones paralelas, la corriente de cortocircuito prevista no aumenta en dirección a las alimentaciones, sino se divide entre las líneas de alimentación. Esto hace que las condiciones para lograr una selectividad sean más favorables.

- **Dos alimentaciones iguales:**

Si un cortocircuito ocurre detrás del interruptor SM (figura 32a), entonces fluye a través del interruptor la corriente total de cortocircuito de 20 kA, mientras por los interruptores de alimentación ST1 y ST2 circula sólamente la mitad, es decir, 10 kA.

En el diagrama de escalonamiento (figura 32b), la curva característica de disparo de los interruptores ST1 y ST2 debe trazarse referida a la corriente que fluye por el interruptor SM. Ya que la corriente total de cortocircuito se divide en dos partes iguales en las alimentaciones, la curva característica de disparo de los interruptores ST1 y ST2 debe desplazarse hacia la derecha, en el eje de la corriente, en el factor 2.



a) Diagrama general b) Diagrama de escalonamiento del tiempo de disparo

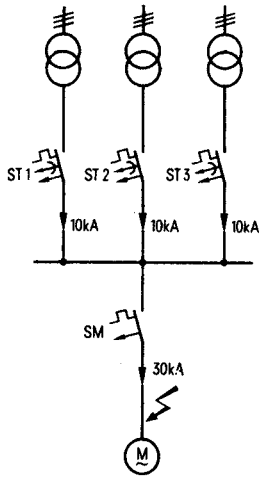
ST Interruptores de potencia para la protección de los transformadores
SM Interruptor de potencia para la protección del motor
a Disparador con retardo dependiente de la corriente
z Disparador con retardo independiente de la corriente

Figura 32. Instalación de distribución con dos transformadores de alimentación de igual potencia conectados en paralelo.

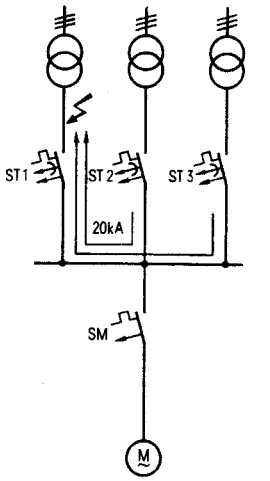
- **Tres alimentaciones iguales:**

Si la alimentación la realizan más de dos transformadores en paralelo (figura 33), además de los disparadores instantáneos la corriente de reacción deberá ajustarse a un valor mayor que la corriente de cortocircuito Icc del transformador correspondiente.

De esta manera, el interruptor será disparado cuando entre él y el transformador correspondiente ocurra un cortocircuito, mientras los otros dos transformadores permanecen conectados prestando un servicio ininterrumpido. El disparo lo provoca la suma de las corrientes de cortocircuito de los otros dos transformadores.



a) Cortocircuito en la línea de alimentación del motor: El interruptor SM se dispara sin retardo, los interruptores ST1, ST2 y ST3 permanecen cerrados



b) Cortocircuito entre un transformador y el interruptor de potencia correspondiente: El interruptor ST1 se dispara sin retardo, los interruptores ST2 y ST3 permanecen cerrados

Figura 33. Instalación de distribución con tres transformadores de alimentación de igual potencia conectados en paralelo.

- **Alimentaciones conectadas en paralelo a través de un interruptor de acople:**

La selección de los aparatos de maniobra para las derivaciones y las condiciones para la selectividad, las determina esencialmente el tipo de interruptor de potencia utilizado como interruptor de acople, es decir, si éste limita la corriente, o es un extintor al paso por cero.

Los interruptores limitadores de la corriente descargan los circuitos eléctricos que protegen de los efectos de las corrientes máximas de cresta previstas (corriente asimétrica de cortocircuito) I_{CAS} y, por tanto, permiten la utilización de aparatos de maniobra económicos.

5.1.10.- Selectividad y protección contra caída de tensión.

Cuando ocurre un cortocircuito, la tensión cae completamente en el punto donde éste se presenta. La tensión remanente depende de la resistencia eléctrica del punto de la falta eléctrica.

En caso de un cortocircuito rígido, la resistencia en el punto de la falta eléctrica es prácticamente cero y, por tanto, también la tensión adquiere este valor. Por lo general, los cortocircuitos se presentan en forma de arcos, los cuales adquieren tensiones entre 30 y

70V aproximadamente. La tensión de la red en un punto situado entre el lugar del cortocircuito y la fuente de energía decrece a un valor, el cual está determinado por la resistencia del conductor entre el punto de la perturbación y el punto en consideración, es decir, por la longitud del conductor entre ambos punto. Esta tensión muy baja permanece durante el tiempo en que fluye la corriente de cortocircuito. La figura 34 muestra las tensiones en diferentes puntos de una distribución en caso de un cortocircuito rígido.

Cuando un cortocircuito ocurre en el punto 1 (figura 34a), la tensión de la red Ue se reduce a 0,13 Ue en las barras colectoras de la distribución secundaria, y a 0,5 Ue en las barras colectoras de la distribución principal. El interruptor de potencia I, inmediato al sitio de la perturbación, desconecta. Su tiempo total de interrupción puede alcanzar valores, dependiendo de su tamaño y tipo, de hasta 0,03 s; los interruptores limitadores de la corriente interrumpen los cortocircuitos en tiempos menores que 0,01 s.

En caso de ocurrir un cortocircuito en el punto 2 (figura 34b), la desconexión la efectúa el interruptor de potencia II, el cual está provisto de disparadores con retardo independiente de la corriente para una protección selectiva. El retardo mínimo es de 0,1 s. Durante este tiempo, la tensión en las barras colectoras de la distribución principal baja a 0,13 Ue.

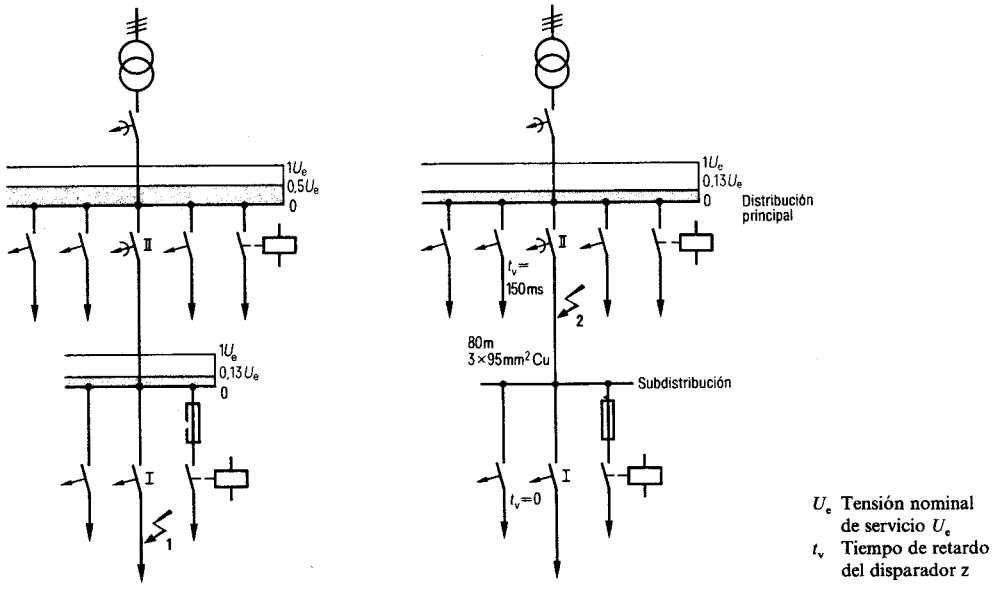


Figura 34. Tensiones en una instalación de baja tensión, con distribución principal y subdistribuciones, cuando ocurre un cortocircuito.

Si la tensión de la red baja a un valor comprendido entre, 0,7 y 0,35 veces la tensión nominal y permanece a ese valor por más de 0,02 s aproximadamente, todos los interruptores de potencia provistos de disparadores de mínima tensión desconectan. De igual manera, caen también los contactores cuando la tensión del circuito de mando baja a un valor menor que el 65% de la tensión nominal de accionamiento de los mismos y permanece a ese valor por tiempos comprendidos entre 0,005 y 0,03 s.

Una protección selectiva contra sobreintensidades, exige que tanto los disparadores de mínima tensión de los interruptores de potencia como las bobinas de los contactores estén provistos con dispositivos de retardo de desconexión. En los interruptores de potencia con limitación de la corriente, con un tiempo total de interrupción menor que 0,1s, puede desistirse de los dispositivos de retardo.

5.2.- Selectividad en redes malladas.

La selectividad en redes malladas tiene dos funciones fundamentales:

- Solamente el conductor afectado por el cortocircuito debe ser separado de la red.
- En caso de un cortocircuito en los bornes de un transformador, solamente la sección afectada debe ser separada de la red.

- **Fusibles de los puntos nodales:**

En una red mallada de baja tensión normalmente se utilizan conductores de igual sección y, por tanto, fusibles NH de la clase de servicio gL del mismo tamaño y corriente nominal. Los fusibles se instalan en los puntos nodales (empalmes) de la red (figura 35).

Si un cortocircuito ocurre en el punto A del conductor de la red mallada, fluyen las corrientes de cortocircuito I_{k1} e I_{k2} de los puntos de alimentación hacia el punto del cortocircuito. Los valores de estas corrientes de cortocircuito dependen de las resistencias de los conductores de las alimentaciones y pueden ser muy diferentes. Para una mayor comprensión, estas corrientes han sido representadas en un punto nodal de la figura 35, en el cual se unen tres conductores.

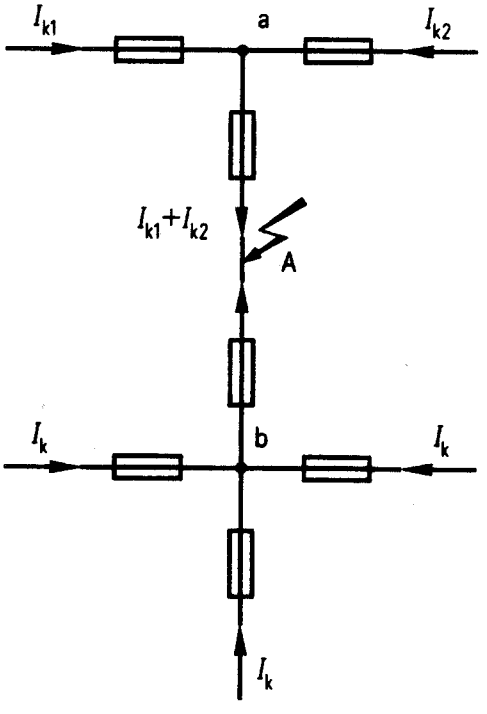


Figura 35. Cortocircuito en un cable alimentado a través de dos puntos nodales (a y b).

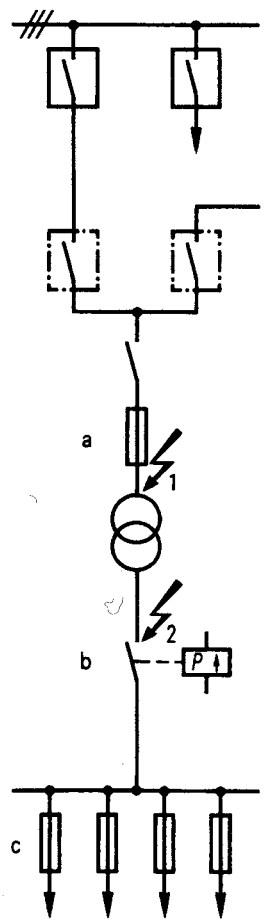
La selectividad está dada si el fusible que conduce la suma de las corrientes I_{k1} e I_{k2} se funde sin que reaccione el fusible a través del cual circula la corriente parcial más alta I_{k1}. Para los fusibles NH, para corrientes de cortocircuito elevadas, si relación de las corrientes de cortocircuito $I_{k1}/(I_{k1} + I_{k2})$ no sobrepasa 0,8.

- **Interruptores de potencia para redes malladas y fusibles en puntos nodales:**

En los puntos de alimentación de un sistema múltiple, es decir, una red mallada alimentada por varios conductores de alta tensión, por principio deben preverse entre el transformador y el punto nodal un interruptor de potencia para redes malladas (figura 36).

Si un cortocircuito ocurre en el lado de alta tensión del transformador (punto 1) o entre el transformador y el interruptor de potencia para redes malladas (punto 2), los fusibles HH de alta tensión reaccionan. En el lado de baja tensión fluye hacia el punto de cortocircuito -a través del interruptor- una potencia inversa.

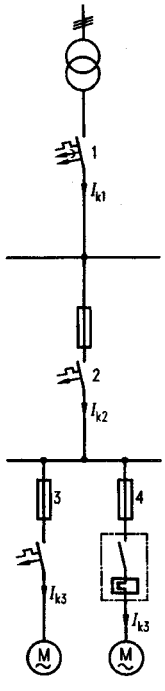
El disparador por corriente de trabajo recibe del relé para redes malladas la orden de desconectar el interruptor. De esta forma, la sección afectada es separada selectivamente de la red.



a Fusibles HH de alta tensión
b Interruptor de potencia con relé para redes enmalladas
c Fusibles de los puntos nodales

Figura 36. Diagrama general del sitio de alimentación de una red mallada.

A continuación en las tablas 2 y 3 se muestra un esquema de las posibles regulaciones en una distribución con y sin fusibles.



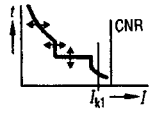
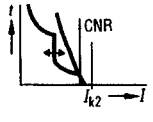
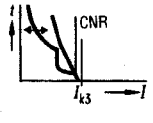
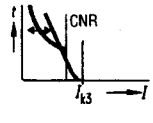
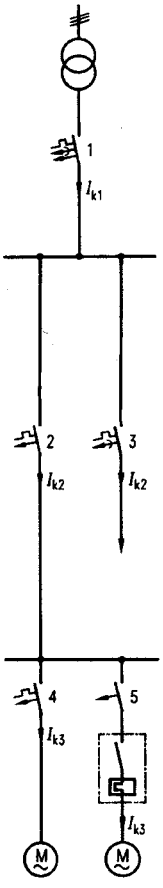
N.º	Tipo de interruptor/combinación de maniobra	Tipo	Capacidad de ruptura CNR	Disparador contra sobreintensidades a Ajustable	a Fijamente ajustado	z Ajustable	n Fijamente ajustado	n Ajustable	Fusible preconectado CNR > 100 kA	Curva característica de disparo
	Interruptor de alimentación									
1	Interruptor para selectividad	3WE	$> I_{k1}$	×	–	×	×	–	–	
	Interruptor de distribución									
2	Fusible e interruptor para protección de distribuciones	3NA 3VT	$> I_{k2}$ $< I_{k2}$	– –	– ×	– –	– –	– ×	× –	
	Interruptores para consumidores									
3	Fusible e interruptor para la protección de motores	3NA 3VE	$> I_{k3}$ $< I_{k3}$	– ×	– –	– –	– ×	– –	× –	
4	Fusible y arrancador directo	3ND 3NA 3TW	$> I_{k3}$ $> I_{k3}$ $< I_{k3}$	– – ×	– – –	– – –	– – –	– – –	× × –	

Tabla 2. Distribución con interruptores automáticos y fusibles.



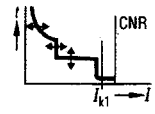
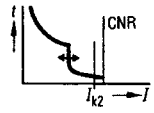
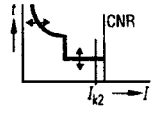
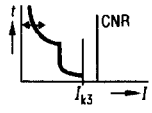
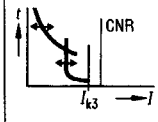
N.º	Tipo de interruptor	Tipo	Capacidad de ruptura CNR	Disparador contra sobreintensidades a Ajustable	a Fijamente ajustado	z Ajustable	n Fijamente ajustado	n Ajustable	Curva característica de disparo
Interruptor de alimentación									
1	Interruptor para selectividad con escalonamiento en el tiempo	3WE	$> I_{k1}$	×	–	×	×	–	
Interruptor de distribución									
2	Interruptor para protección de distribuciones	3VT 3VS	$> I_{k2}$ $> I_{k2}$	– –	× ×	– –	– –	× ×	
3	Interruptor para selectividad con escalonamiento en el tiempo	3WE	$> I_{k2}$	×	–	×	–	–	
Interruptores para consumidores									
4	Interruptor para la protección de motores	3VE	$> I_{k3}$	×	–	–	×	–	
5	Interruptor para la protección de arrancadores Arrancador directo	3VN 3TW	$> I_{k3}$ –	– ×	– –	– –	– –	× –	

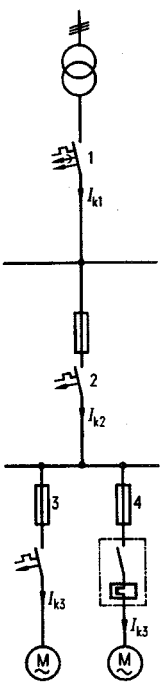
Tabla 3. Distribución con interruptores automáticos.

6.- FILIACIÓN.

Mediante la filiación se pueden realizar instalaciones en las que prime la racionalidad y la economía. La filiación es la utilización del poder de corte de limitación de los interruptores automáticos, para instalar aguas abajo, interruptores de menor poder de corte, y, por tanto, más económicos.

Los interruptores automáticos situados aguas arriba, representan un papel de barrera para las fuertes corrientes de cortocircuito. Permiten a los interruptores automáticos de PdC inferior a la intensidad de cortocircuito prevista, en su punto de instalación, ser solicitados

A continuación en las tablas 2 y 3 se muestra un esquema de las posibles regulaciones en una distribución con y sin fusibles.



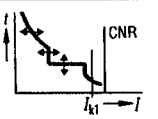
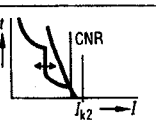
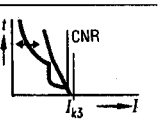
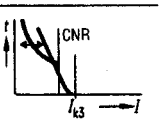
N.°	Tipo de interruptor/combinación de maniobra	Tipo	Capacidad de ruptura CNR	Disparador contra sobreintensidades a Ajustable	a Fijamente ajustado	z Ajustable	n Fijamente ajustado	n Ajustable	Fusible preconectado CNR > 100 kA	Curva característica de disparo
	Interruptor de alimentación									
1	Interruptor para selectividad	3WE	$> I_{k1}$	×	–	×	×	–	–	
	Interruptor de distribución									
2	Fusible e interruptor para protección de distribuciones	3NA 3VT	$> I_{k2}$ $< I_{k2}$	– –	– ×	– –	– –	– ×	× –	
	Interruptores para consumidores									
3	Fusible e interruptor para la protección de motores	3NA 3VE	$> I_{k3}$ $< I_{k3}$	– ×	– –	– –	– ×	– –	× –	
4	Fusible y arrancador directo	3ND 3NA 3TW	$> I_{k3}$ $> I_{k3}$ $< I_{k3}$	– – ×	– – –	– – –	– – –	– – –	× × –	

Tabla 2. Distribución con interruptores automáticos y fusibles.

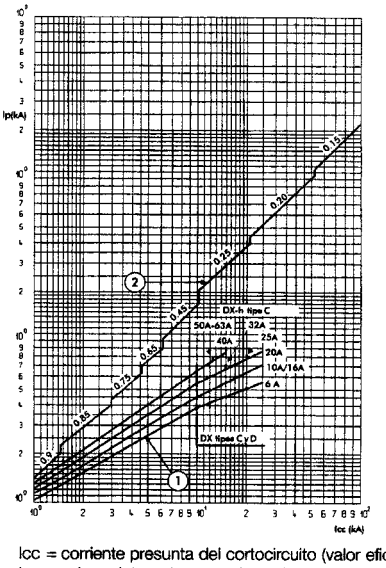
en sus condiciones normales de corte. La limitación de corriente afecta a todo el circuito controlado por el interruptor automático limitador, la filiación se extiende a todos los aparatos situados aguas abajo de este automático, o sea, no queda restringida a dos aparatos consecutivos.

La limitación puede realizarse con aparatos instalados en diferentes cuadros. Así, el término filiación se relaciona de una forma general a toda asociación de interruptores permitiendo instalar en un punto dado de una instalación un interruptor de PdC inferior a la Icc prevista. Bien entendido que el poder de corte del aparato aguas arriba debe ser superior o igual a la corriente de cortocircuito prevista en el punto de la instalación. La asociación de dos interruptores en filiación está prevista en el párrafo 434-22 de la Norma C 15-100.

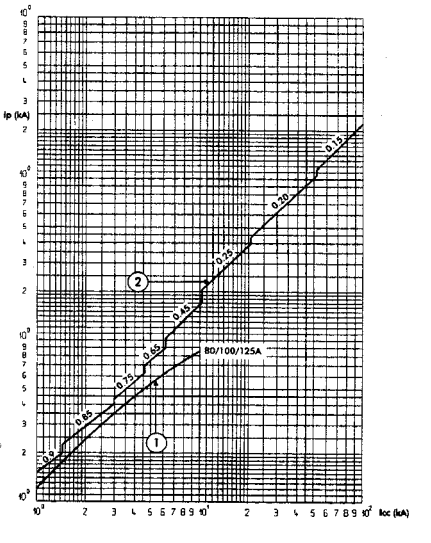
La utilización de un dispositivo de protección con poder de corte inferior a la corriente de cortocircuito prevista en el punto de su instalación está permitida con la condición de que sea protegido aguas arriba por otro dispositivo que posea como mínimo el poder de corte necesario.

En este caso, las características de los dos dispositivos deben estar coordinadas de tal manera que la energía que deja pasar el dispositivo instalado aguas arriba no sea superior a la que puede soportar sin daño el dispositivo situado aguas abajo y a las canalizaciones protegidas por estos dispositivos.

Esto sólo puede ser verificado mediante ensayos en laboratorio, y las posibles asociaciones deben ser dadas por los fabricantes.



Icc = corriente presunta del cortocircuito (valor eficaz en kA)
Ip = valor máximo de cresta (en kA)
① = valor máximo de cresta de la corriente efectiva de cortocircuito
② = valor máximo de cresta (no limitada) de la corriente presunta de cortocircuito correspondiente al factor de potencia indicado en la parte superior (0,15 a 0,9)
Nota: para los calibres de 1,2 y 3 A los valores limitados son inferiores a 1 kA



Icc = corriente presunta del cortocircuito (valor eficaz en kA)
Ip = valor máximo de cresta (en kA)
① = valor máximo de cresta de la corriente efectiva de cortocircuito
② = valor máximo de cresta (no limitada) de la corriente presunta de cortocircuito correspondiente al factor de potencia indicado en la parte superior (0,15 a 0,9)

Figura 37. Curvas de limitación de interruptores automáticos.

El poder de limitación de un interruptor automático traduce su mayor o menor capacidad de dejar pasar, en el caso de un cortocircuito, una corriente inferior a la intensidad de defecto prevista.

Esta característica se traduce por las curvas de limitación de la figura 37, las cuales vienen determinadas por cada fabricante para cada uno de sus modelos de interruptor automático. En la que representamos, se distinguen la amplitud máxima prevista de la intensidad de cortocircuito y por debajo de esta las curvas de la Icc limitada para distintos interruptores automáticos.

Ante un cortocircuito, reaccionan los disparadores electromagnéticos no retardados del interruptor automático e inician el accionamiento del mecanismo de desconexión y, por consiguiente, la apertura de los contactos. La extinción del arco tiene lugar en el aire. El tiempo total de desconexión depende en gran medida del tiempo propio del interruptor, el cual está influido por su construcción y asciende aproximadamente a 30 ms.

Los interruptores automáticos con limitación de corriente tienen disparadores electromagnéticos no retardados, que desconectan intensidades de cortocircuito de hasta aproximadamente 20 veces la intensidad nominal del interruptor. Con elevadas intensidades de cortocircuito son aprovechadas las fuerzas electrodinámicas, que actúan una limitación de la intensidad de cortocircuito.

Debido a la forma constructiva del interruptor automático de limitación de corriente, las intensidades de cortocircuito son limitadas en menor grado, en comparación con los cartuchos fusibles con limitación de corriente (rápido).

Si se eligen interruptores automáticos para la protección de aparatos de maniobra contra Icc, es preciso aclarar si con esto queda garantizada una protección suficiente contra todas las sobrecargas presentadas, incluso contra la intensidad de cortocircuito. La comparación de las curvas características de intensidad-tiempo entre interruptores automáticos de potencia, con limitación de corriente y cartuchos fusibles rápidos de las mismas intensidades, mostrará claramente los diferentes tiempos de desconexión ante las desconexiones por cortocircuito.

TEMA 10. SOLICITACIONES TÉRMICAS Y DINÁMICAS EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA EN CORTOCIRCUITO

1.- MÁXIMO ESFUERZO TÉRMICO ADMISIBLE EN CONDUCTORES AISLADOS EN CORTOCIRCUITO.

1.1.- Tiempo de desconexión de la protección de cortocircuito.

En la comprobación de la sección de una línea eléctrica, así como para la elección adecuada de las protecciones contra sobreintensidades, debemos relacionar el valor de la sobreintensidad (calentamiento ó cortocircuito) con la duración del mismo, para evitar que el conductor alcance una temperatura inadmisible y que denominamos temperatura máxima de cortocircuito. El esfuerzo térmico admisible de un conductor "I^2t" depende de las características del mismo, donde "I" es la sobreintensidad permanente y "t" es el tiempo máximo de desconexión de los aparatos de protección.

A continuación se presentan las temperaturas máximas [ºC] para cables aislados, en función de su aislamiento.

Aislamiento	Servicio permanente	Cortocircuito t < 5 s
Policloruro de vinilo (PVC)	70	160
Polietileno reticulado (XLPE)	90	250
Etileno propileno (EPR)	90	250
Goma butílica	80	220

Tabla 1. Temperatura máxima para conductores aislados.

La temperatura de régimen permanente que determina la intensidad admisible, es la temperatura de vida útil o industrialmente aceptable para un cable aislado, aquella a la que un conductor puede trabajar perfectamente en equilibrio térmico con el ambiente, sin que el aislamiento sufra deterioro ni envejecimiento.

La temperatura de cortocircuito es la máxima temperatura admisible para un cable, por encima de la cual se produce deterioro del aislamiento, pudiendo dar lugar a arcos eléctricos, causa de muchos incendios. No podemos permitir que un cable supere dicha temperatura.

Para llegar a obtener "t", dada la intensidad de cortocircuito, el tipo de conductor ó cable eléctrico y para una sección (mm^2) dada tendremos que plantear un balance de energía.

Un cortocircuito se puede definir como un defecto rígido con una duración inferior a 5 s. En estas condiciones, el conductor eléctrico no tiene tiempo de establecer un nuevo equilibrio térmico entre el calor generado por pérdidas y el disipado al exterior. Así pues, en estas condiciones, el conductor debemos considerarlo adiabático y todo el calor generado por pérdidas es empleado en aumentar la temperatura del conductor, por tanto:

$$Qp = RI_{cc}^2 t \qquad (1)$$

es la energía calorífica generada por pérdidas en el conductor.

$$Qa = Ce\ S\ L\ (Tcc - Trp) \qquad (2)$$

Es el calor absorbido por el conductor. Igualando las expresiones (1) y (2) y sustituyendo R por su valor (R=L/KS):

$$\frac{L}{KS} I_{cc}^2 t = Ce\ S\ L\ (Tcc - Trp) \qquad (3)$$

de donde obtenemos:

$$I_{cc}^2 t = Ce\ S^2\ K\ (Tcc - Trp) \qquad (4)$$

Ecuación fundamental en el estudio de un cortocircuito en un conductor, donde:

Icc:	Intensidad permanente de cortocircuito (A).
t:	Tiempo máximo de desconexión del elemento de corte (s).
K:	Conductividad K=56 Cu; K=35 Al.
S:	Sección del conductor en mm².
Ce:	Calor específico por unidad de volumen del cable eléctrico.
Tcc	Temperatura máxima de cortocircuito (°C) para un cable eléctrico.
Trp	Temperatura máxima de régimen permanente (°C) para un cable.
ΔT=Tcc-Trp:	Sobretemperatura.
Cc:	Kce T es una constante que depende del material conductor (Cu ó Al) y del material aislante, quedando la expresión (5):

$$I_{CC}^2 t = Cc\ S^2 \qquad (5)$$

A continuación presentamos una tabla con los valores de Cc para Cu y Al y en los aislamientos más usuales.

CONDUCTOR	PVC	ETILENO-PROPILENO (EPR)	POLIETILENO RETICULADO (XLPE)
Cu	13225	20449	20449
Al	5476	8836	8836

Tabla 2. Coeficiente Cc para conductores aislados.

No obstante, la fórmula (5) es más universal expresándola en función de la sobretemperatura:

$$I_{cc}^2 t = C\Delta T\ S^2 \qquad (6)$$

"C":será ahora una constante en función del material conductor (Cu ó Al). Teniendo en cuenta la temperatura máxima de cortocircuito y de régimen permanente, se tiene una sobretemperatura de:

- ΔT = 90 °C para el PVC
- ΔT = 160 °C para el XLPE y EPR

Así pues, para cables de Cu aislados, se obtiene una media de C=135 y para Al C=57.

Con todo lo anterior, el tiempo máximo de desconexión en un cortocircuito, para un elemento de corte o protección de un conductor de sección "S" (mm^2) será:

$$t_{DESC} = \frac{C\Delta T\, S^2}{I_{CC}^2} \qquad (7)$$

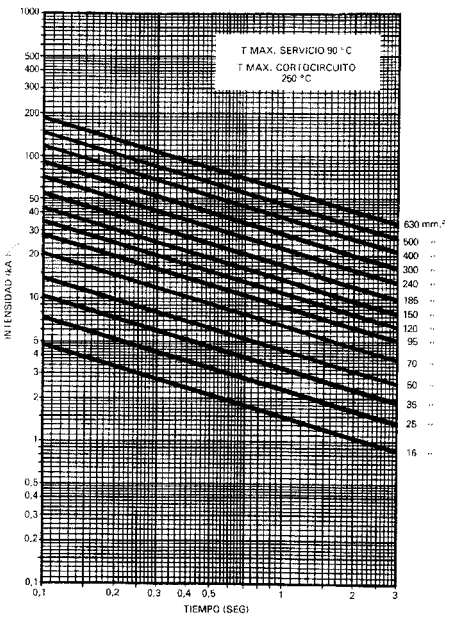


Figura 1. Intensidad de cortocircuito admisible en conductores de aluminio. Aislamiento XLPE.

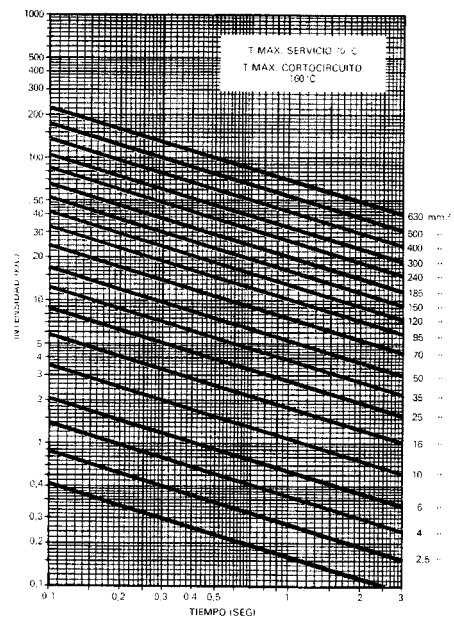


Figura 2. Intensidad de cortocircuito admisible en conductores de cobre. Aislamiento PVC.

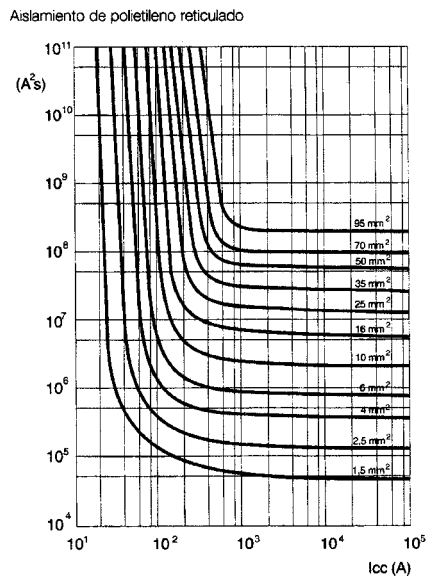


Figura 3. Calentamiento admisible de los conductores de cobre. Aislamiento XLPE.

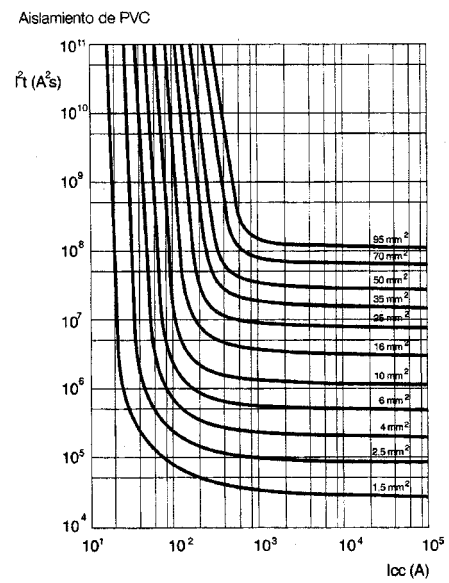


Figura 4. Calentamiento admisible de los conductores de cobre. Aislamiento PVC.

1.2.- Longitud máxima protegida a cortocircuito.

- **Interruptores automáticos:**

El disparador electromagnético de un interruptor automático (figura 5) actúa del modo siguiente para las distintas curvas:

CURVA	INTENSIDAD	TIEMPO DISPARO ELECTROMAGNÉTICO (S)
B	< 3 In	NO DISPARO
C	< 5 In	
D y MA	< 10 In	
B	≥ 5 In	DISPARO t < 0,1 s
C	≥ 10 In	
D y MA	≥ 20 In	

Tabla 3. Umbrales de disparo magnético en interruptores automáticos según EN 60.898.

De aquí se deduce una cuestión importantísima, es el hecho que dada una línea o conductor con una sección determinada a calentamiento y a caída de tensión, y dado un interruptor automático con una In elegida adecuadamente a sobrecargas, dicha **línea** puede quedar perfectamente **protegida a cortocircuito** si se verifican dos condiciones:

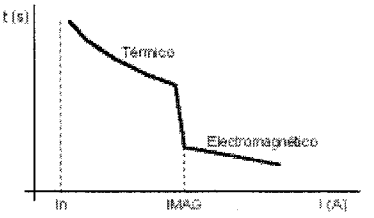


Figura 5. Curva de disparo de un i.a.

1º) *La intensidad mínima de cortocircuito (cortocircuito fase-neutro al final del conductor) (IccF) debe ser mayor o igual que la* I_{MAG} para alguna de las curvas señaladas, y para un interruptor de intensidad nominal In.

B ⇒ IccF (A) ≥ 5 In
C ⇒ IccF (A) ≥10 In
D y MA ⇒ IccF (A) ≥ 20 In

En este caso, tendremos la seguridad de que dicho interruptor (In) abrirá (para la curva que verifique la anterior expresión) en un tiempo inferior a 0,1 s = 100 ms. En la figura 6 se aprecia como en las condiciones representadas, el interruptor de intensidad nominal In desconectará la parte defectuosa en td < 0,1 s.

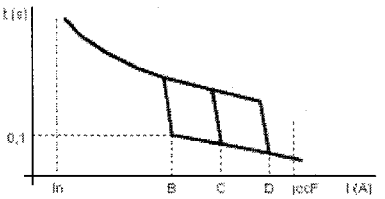


Figura 6. Curvas de disparo de un interruptor automático.

2º) De la condición anterior se deduce que, en las circunstancias señaladas, el defecto durará menos de 0.1 s. *El tiempo máximo que el conductor soporta una intensidad mínima de cortocircuito (*$t_{MAXImin}$*) debe ser mayor que 0.1 s para asegurar la protección de cortocircuito.*

Es evidente que han de darse las dos condiciones, pues si alguna no se verifica, pueden surgir graves consecuencias:

- Si no se verifica la 2ª condición ($t_{MAXImin}$ 0,1 s), significa que no podemos asegurar con certeza que el conductor soporte la IccF, con lo cual se puede producir un calentamiento

excesivo en un su aislamiento (puede llegar a superar la Tcc_{MAX}) y como consecuencia producirse arcos eléctricos y posibles incendios.

- Si no se verifica la 1ª condición $IccF > I_{MAG}$), las consecuencias pueden ser las mismas, pues si en el interruptor (In), para cualquier curva posible, la I_{MAG} no se ve superada por la IccF (figura 7), no se produce disparo del relé electromagnético, no pudiendo asegurar la desconexión del defecto para t < 0,1 s. Por lo tanto, la IccF entra en la zona de actuación del relé térmico y el tiempo de disparo se alarga, con frecuencia más de lo necesario para el conductor ($t_{MAXImin}$), siendo ésta la causa principal de incendios.

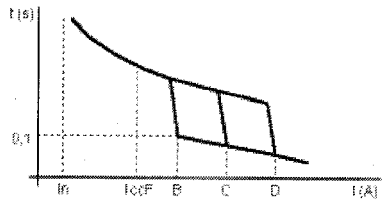


Figura 7. Curvas de disparo de un interruptor automático.

- **Fusibles:**

Un cortocircuito es un defecto rígido (impedancia de defecto nula), entre partes a distinto potencial eléctrico y una duración menor o igual a 5 s. De este concepto se extraen dos condiciones:

1ª) *La intensidad de cortocircuito admisible por un conductor durante 5 s [Iccc5], ha de ser superior a la intensidad de fusión del fusible utilizado en 5 s [I_{F5}], esto es, Iccc5 > I_{F5}* (figura 8).

Para poder determinar esta 1ª desigualdad o condición, se tienen todos los conceptos necesarios. La Iccc5 se puede extraer de la ecuación del esfuerzo térmico máximo admisible para un tiempo igual a 5 s, esto es:

$$I^2ccc5 * 5 = Cc \cdot S^2$$

$$Iccc5 = \sqrt{\frac{Cc \cdot S^2}{5}} \qquad (8)$$

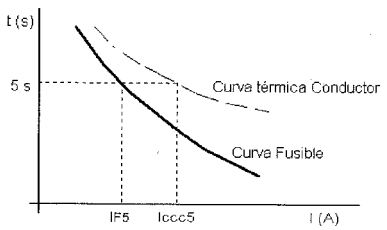


Figura 8. 1ª condición de protección del conductor con fusible.

La I_{F5}, se puede obtener de la norma UNE 21-103-80, parte II.

Esta condición representa físicamente que, durante el cortocircuito, el fusible fundirá antes que el conductor alcance su temperatura máxima de cortocircuito.

Supongamos que se tiene un conductor unipolar de Cu 10 mm², aislamiento PVC, con un valor de la intensidad de cortocircuito admisible en 5 s.

$$Iccc5 = \sqrt{\frac{13225 \cdot 10^2}{5}} = 514.3A \qquad (9)$$

Analizando la norma UNE 21-103-80 parte II, veremos que el fusible máximo que protege este conductor a cortocircuito es el de 80 A (I_{F5} = 460 A), en cambio, no se podrá colocar un 100 A (I_{F5} = 600 A), pues no se cumpliría la condición 1ª.

Ahora bien, si se quiere protección sólo a cortocircuito, la elección será correcta hasta In (fusible = 80 A) no obstante, si se pretende también la protección a sobrecargas, se debe

examinar con detalle este tipo de protección térmica. Cabe señalar, que si el conductor de 10 mm² Cu, PVC, es de 750 V, con sistema de canalización bajo tubo empotrado y la línea monofásica (2 unipolares), su intensidad máxima admisible será de 40 A. Si el receptor a alimentar demanda 21 A y el coeficiente de fusión de fusibles con respecto a la In se toma en 1,6, se tendrá:

$$\begin{aligned} &Ical \leq In \\ &C_{FF} * In \leq I_{ADM\ conductor} \end{aligned} \qquad (10)$$

de donde:

$$In \leq \frac{I_{ADM}}{C_{FF}} = \frac{40}{1.6} = 25A \qquad (11)$$

En este caso, sólo sería válido para protección térmica y de cortocircuito el fusible de 25 A (I_{F5} = 140 A).

2ª) *La 2ª condición fundamental impondrá que la intensidad mínima de cortocircuito (cortocircuito fase-neutro al final del conductor) (IccF) ha de ser mayor que la intensidad de fusión del fusible en 5s (I_{F5}),* esto es:

$$IccF > I_{F5} \qquad (12)$$

Físicamente significa que estamos dentro de los límites de tiempo establecidos para un cortocircuito y serán válidas las ecuaciones de conservación de la energía en régimen adiabático.

De esta 2ª condición se extraen dos conclusiones importantes:

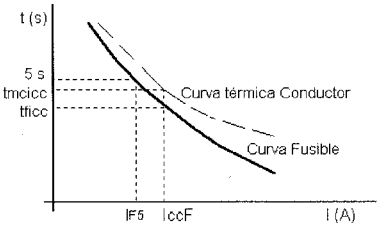


Figura 9. 2ª condición de protección del conductor con fusible.

- Si se cumplen las dos condiciones anteriores, podemos asegurar que el tiempo máximo que el conductor soporta la IccF ($t_{MAXImin}$) es mayor que el tiempo de fusión del fusible para la señalada IccF (tficc), en otras palabras, para la intensidad de cortocircuito que se establece a causa de un defecto al final del conductor, el fusible funde (desconecta - tficc) antes que el conductor alcance su máxima temperatura de cortocircuito, esto es, $t_{MAXImin}$ > tficc (figura 9).

- Si se cumplen las dos condiciones impuestas anteriormente, se extrae la longitud máxima protegida a cortocircuito, debiendo razonar del siguiente modo:

  - En primer lugar, se debe cumplir la condición 1ª (Icccc5 > I_{F5}), pues caso contrario no tendrá sentido hablar de longitud máxima protegida a cortocircuito. Referente a la segunda condición, se invierte el razonamiento, en vez de emplear el concepto de tiempo, empleamos el concepto de intensidad para obtener la máxima longitud protegida, interpretando que para cumplirse dicha premisa IccF ≥ I_{F5}.

- Fijada la sección, sabemos que cuanto mayor es la longitud de un conductor, mayor es su resistencia y, por tanto, mayor su impedancia y menor será la IccF. Por lo tanto, el límite de la IccF para cumplir la 2ª condición IccF ≥ I_{F5} es evidente, IccF = I_{F5}.

$$IccF = \frac{U_F}{2 * Zcc} = IF5 \qquad (12)$$

Despejando el valor de la longitud máxima: pues ésta se encuentra asociada al valor de Zcc, quedará:

$$Lmax = \frac{U_F}{2 * I_{F5} \sqrt{\left(\frac{1.5}{kSn}\right)^2 + \left(\frac{Xu}{n * 1000}\right)^2}} \qquad (13)$$

donde:

L_{max}:	Longitud máxima de conductor protegido a cortocircuito.
U_F:	Tensión de fase.
K:	Conductividad - Cu: 56, Al: 35.
S:	Sección del conductor.
Xu:	Reactancia por unidad de longitud (mΩ/m).
n:	nº de conductores por fase.
1,5:	Coeficiente de resistencia.

2.- MÁXIMO ESFUERZO TÉRMICO ADMISIBLE EN EMBARRADOS.

2.1.- En cortocircuito.

En este apartado se trata de calcular la temperatura que puede alcanzar el embarrado como consecuencia de fenómenos de cortocircuito. Como hipótesis de cálculo tomaremos:

- Se admite que el tiempo que tarda en despejarse la falta es lo suficientemente breve como para que no haya cesión de calor al ambiente.
- Supondremos constante el calor específico del material.

En principio, el cálculo viene determinado por:

- La corriente permanente de cortocircuito.
- El tiempo que se tarda en despejar la falta.

Puesto que no consideramos la cresta inicial de la corriente de cortocircuito, obtendríamos valores de calentamiento menores que los reales. Será necesario introducir un intervalo de tiempo adicional como factor de corrección del cálculo. De esta forma, el incremento de temperatura del material vendrá dado por:

$$\Delta T = \frac{k I_{cc}^2 (t + \Delta t)}{S^2} \qquad (15)$$

donde:

k: constante del material: Cu 0.0058; Al 0,0135;

S: sección del material (mm^2);

t: duración del cortocircuito (s);
Icc: valor eficaz de la corriente permanente de cortocircuito (A).

El intervalo de tiempo adicional como consecuencia del transitorio vendrá dado por:

$$\Delta t = T\left[\frac{I_{CAS}}{Icc}\right]^2 \qquad (16)$$

donde:
T: Factor de tiempo de las máquinas.
- T = 0.15 a 0.3 para cortocircuitos tripolares.
- T = 0.25 a 0.6 para cortocircuitos bipolares.

I_{CAS}: Intensidad de cresta asimétrica de cortocircuito.

El margen disponible para el calentamiento por cortocircuito depende de las temperaturas máximas admisibles de cortocircuto y de régimen permanente en la barra.

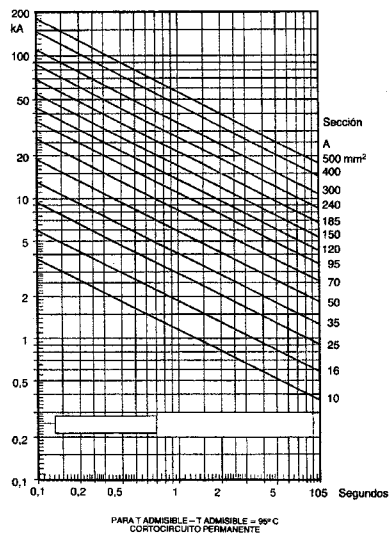


Figura 10. Intensidad máxima de cortocircuito en conductores de Cu para un ΔT = 95°C.

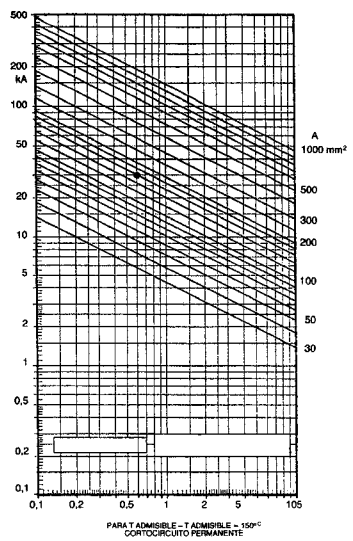


Figura 11. Intensidad máxima de cortocircuito en conductores de Cu para un ΔT = 150°C.

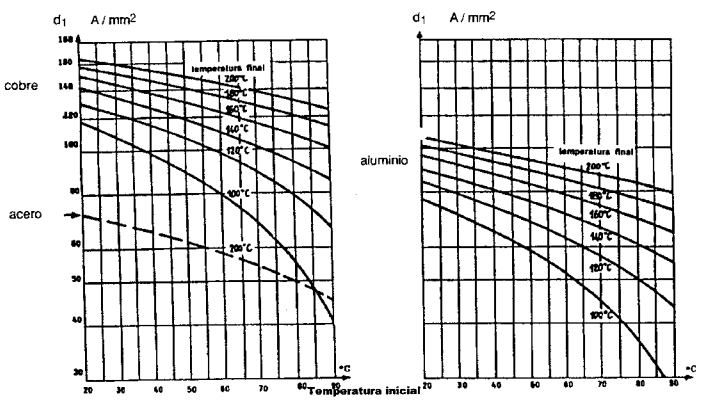


Figura 12. Calentamiento de embarrados. Sobreintensidades de corta duración (1 segundo).

2.2.- En régimen permanente.

Un balance de energía semejante al de conductores aislados permite obtener la intensidad máxima admisible permanente en función de la temperatura de régimen permanente. En este balance es necesario considerar una serie de coeficientes que permitan reproducir cualquier situación que se aparte de una condición estándar establecida. La temperatura límite de una barra depende del uso a que se la destine, de la forma de sujeción, del aparato al que se acopla ya que por ejemplo el cobre es capaz de soportar temperaturas más altas, que el resto de elementos que la entorna, así:

- 120 ºC : para las sujeciones por bridas o tornillos;
- 85-90 ºC: debido a posible degradación de aislante en contacto con la barra;
- 75-80ºC: para el tramo de conexión con el aparato.

Ancho x Espesor	Sección	Peso 1)	Corriente permanente en A																				Valores estáticos para una barra							
			Corriente alterna hasta 60 Hz								Corriente contínua y corriente alterna 16⅔ Hz												x x			y y				
			pintado				desnudo				pintado				desnudo															
			Número de barras				Número de barras				Número de barras				Número de barras															
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4					F			F				
			I	II	III	IIII	I	II	III	IIII	I	II	III	IIII	I	II	III	IIII	J_x	W_x	i_x		J_y	W_y	i_y					
mm	mm²	kg/m																	cm⁴	cm³	cm		cm⁴	cm³	cm					
12 x 2	23,5	0,209	123	202	228		106	182	216		123	202	233		108	182	220		0,0288	0,0480	0,346		0,000800	0,00800	0,0577					
15 x 2	29,5	0,262	148	240	261		126	212	247		148	240	267		128	212	252		0,0563	0,0750	0,433		0,00100	0,0100	0,0577					
15 x 3	44,5	0,396	187	316	381		162	282	381		187	316	367		162	282	365		0,0844	0,113			0,00338	0,0225	0,0866					
20 x 2	39,5	0,351	189	302	313		162	264	298		189	302	321		162	266	303		0,133	0,133			0,00133	0,0133	0,0577					
20 x 3	59,5	0,529	237	394	454		204	348	431		237	394	463		204	348	437		0,200	0,200			0,00450	0,0300	0,0866					
20 x 5	99,1	0,882	319	560	728		274	500	690		320	562	729		274	502	687		0,333	0,333	0,577		0,0208	0,0833	0,144					
20 x 10	199	1,77	497	924	1320		427	825	1180		499	932	1300		428	832	1210		0,667	0,667			0,167	0,333	0,280					
25 x 3	74,5	0,663	287	470	525		245	412	498		287	470	536		245	414	506		0,391	0,313			0,00563	0,0375	0,0866					
25 x 5	124	1,11	384	662	839		327	586	795		384	664	841		327	580	794		0,651	0,521	0,722		0,0260	0,104	0,144					
30 x 3	89,5	0,796	337	544	593		285	476	564		337	546	608		286	478	575		0,675	0,450			0,00675	0,0450	0,0866					
30 x 5	149	1,33	447	760	944		379	672	896		448	766	950		380	676	897		1,13	0,750	0,866		0,0313	0,125	0,144					
30 x 10	299	2,66	676	1200	1670		573	1060	1480		683	1230	1530		579	1080	1520		2,25	1,50			0,250	0,500	0,289					
40 x 3	119	1,06	435	692	725		366	600	690		436	696	748		367	604	708		1,60	0,800			0,00960	0,0600	0,0866					
40 x 5	199	1,77	573	952	1140		482	836	1090		576	956	1160		484	848	1100		2,67	1,33	1,15		0,0417	0,167	0,144					
40 x 10	399	3,55	850	1470	2000	2580	715	1290	1770	2280	865	1530	2000		728	1350	1890		5,33	2,67			0,333	0,667	0,289					
50 x 5	249	2,22	697	1140	1330	2010	583	994	1260	1920	703	1170	1370		588	1020	1300		5,21	2,08			0,0521	0,208	0,144					
50 x 10	499	4,44	1020	1720	2320	2950	852	1510	2040	2600	1050	1830	2360		975	1610	2220		10,4	4,17	1,44		0,417	0,833	0,289					
60 x 5	299	2,66	826	1330	1510	2310	688	1150	1440	2210	836	1370	1560	2060	690	1190	1500	1970	9,00	3,00			0,0625	0,250	0,144					
60 x 10	599	5,33	1180	1960	2610	3290	985	1720	2300	2900	1230	2130	2720	3580	1020	1670	2570	3390	18,00	6,00	1,73		0,500	1,00	0,289					
80 x 5	399	3,55	1070	1680	1830	2830	885	1450	1750	2720	1090	1770	1990	2570	902	1530	1890	2460	21,3	5,33			0,0833	0,333	0,144					
80 x 10	799	7,11	1500	2410	3170	3930	1240	2110	2790	3450	1590	2730	3420	4490	1310	2380	3240	4280	42,7	10,7	2,31		0,667	1,33	0,289					
100 x 5	499	4,44	1300	2010	2150	3300	1080	1730	2050	3190	1340	2160	2380	3080	1110	1810	2270	2960	41,7	8,33			0,104	0,417	0,144					
100 x 10	999	8,89	1810	2850	3720	4530	1490	2480	3260	3960	1940	3310	4100	5310	1600	2890	3900	5150	83,3	16,7	2,89		0,833	1,67	0,289					

Tabla 4. Intensidad máxima admisible para barra de cobre en condiciones estándar.

Los valores de intensidad máxima de la tabla 4 son válidos para temperatura del aire de 35 ºC y de 65 ºC en la pletina. Las pletinas deben estar horizontales y de canto. En caso de paquetes de pletinas, deben estar separadas entre sí al menos el equivalente a su espesor.

Si conocemos la conductividad de la pletina y las temperaturas máximas del aire y admisible para la pletina, podremos efectuar un cálculo más preciso. Diferentes condiciones de instalación o condiciones ambientales hacen necesario una corrección de la intensidad admisible. En todos los casos son necesarios unos coeficientes K_1, K_2, K_3, K_4 que utilizaremos de la siguiente manera:

$$I_{ADM} = \frac{\text{Intensidad real de la instalación}}{K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4} \qquad (17)$$

Es decir, dividiendo la intensidad real que tenemos prevista que debe circular por las pletinas, por el producto de todos los coeficientes, nos da la intensidad de tablas, donde elegiremos la pletina que pueda soportar igual o más intensidad que la así calculada.

- **Coeficiente de conductividad K_1:**

En función de la conductividad de la pletina medida en [m/Ωmm²] obtenemos por lectura directa el coeficiente.

siendo:

I_{CAS}: Valor de cresta asimétrica de la intensidad de cortocircuito [A].

D: Separación de fases [cm].

Si los conductores llevan corriente en la misma dirección, se atraen, por el contrario si los conductores llevan corriente en dirección contraria se repelen.

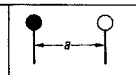
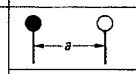
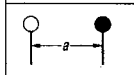
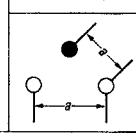
Cortocircuito bipolar		$F_{s2} = 0{,}2\,\frac{I_s^2}{a}$ N/cm
Cortocircuito tripolar		$F_{s3} = 0{,}808 \cdot F_{s2}$ N/cm
		$F_{s3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot F_{s2} = 0{,}87 \cdot F_{s2}$ N/cm
		

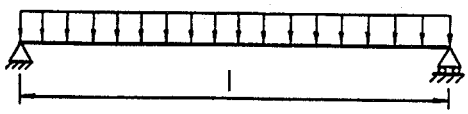
Figura 17. Fórmulas para el cálculo de fuerza entre conductores.

Consideramos que la fuerza sobre los conductores va a estar uniformemente distribuida y asimilamos los conductores a vigas sobre las que actúa una solicitación, a fin de calcular el correspondiente momento flector y la correspondiente tensión mecánica del conductor. Podemos considerar dos hipótesis para el cálculo:

- **Viga simplemente apoyada sobre los aisladores:**

En este caso el momento flector viene dado por:

$$M = \frac{FL}{8} \qquad (19)$$



siendo:

F: fuerza por unidad de longitud;

L: longitud del vano.

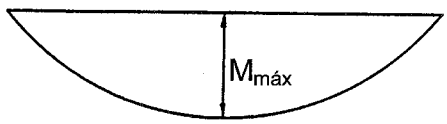


Figura 18. Viga simplemente apoyada.

Si el conductor tiene un módulo resistente W = Ix/b, siendo Ix el momento de inercia respecto del eje xx y b la mitad de la anchura del conductor.

El módulo resistente de la sección transversal de una barra de sección circular y transversal viene dado por la fórmula:

$$W = \frac{D^3}{32}\ [cm^3]$$

$$W = \frac{bh^2}{32}\ [cm^3] \qquad (20)$$

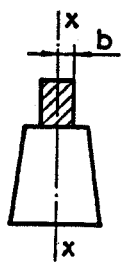


Figura 19. Momento resistente Ixx.

Con un momento flector máximo M en el centro de la viga tendremos que:

$$\sigma_{barra} = \frac{M}{w} = \sigma_{maxima_barra} \qquad (21)$$

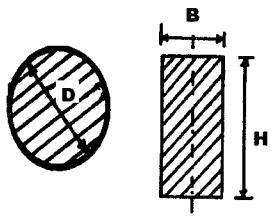


Figura 20. Sección circular y transversal.

y deberá cumplirse σmax ≤ σadmisible en el conductor. Los valores admisibles de σ en el conductor son:

- Cobre: 1200 kg/cm².
- Aluminio: 1000 kg/cm².

Sabemos que la intensidad cresta asimétrica de cortocircuito viene relacionada con la intensidad eficaz permanente por:

$$I_{CAS} = K * \sqrt{2} * Icc \approx 2.55 * Icc \quad (22)$$

despejado tenemos el valor de:

$$\sigma = \frac{I_{CC}^2 L^2}{61.728DW} \quad (23)$$

siendo:

Icc: intensidad permanente de cortocircuito (eficaz);
L: separación longitudinal entre aisladores de apoyo [cm];
D: separación entre fases [cm];
W: módulo resistente de los conductores [cm^3];
σ: valor de la carga de rotura de tracción del material de los conductores [daN/cm^2]
Para el cobre: carga de rotura= 3600 kg/cm^2 [1 kg/cm^2=0.981daN/cm^2].

Según la fórmula dada en la Instrucción Técnica Complementaria MIE RAT 05 que establece para canalizaciones con conductores desnudos sobre aisladores de apoyo que en caso de cortocircuito debe verificarse la siguiente condición:

$$\frac{I_{CC}^2 L^2}{61.728DW} \leq \sigma \quad (24)$$

no tendríamos coeficiente de seguridad, puesto que el valor admisible dado de la carga de rotura coincide con el teórico. Por tanto, la hipótesis de conductores simplemente apoyados sobre los aisladores no es admisible, ya que necesitamos un coeficiente de seguridad.

- **Viga empotrada:**

Este caso equivale a sujetar el conductor al aislador con un portapletinas, lo que no da una rigidez total, pero si un cierto empotramiento. Para este caso, en los extremos de la viga tenemos el valor máximo de:

$$M = \frac{FL}{12} \quad (25)$$

despejado tenemos el valor de:

$$\sigma = \frac{I_{CC}^2 L^2}{92.59DW} \quad (26)$$

lo que resulta un coeficiente de seguridad de 1.5.

En cualquier caso y según la instrucción MIE RAT 05 del reglamento de alta tensión el diámetro mínimo de los conductores de cobre será de 0.8 cm (varilla). Para materiales ó perfiles diferentes, los conductores no tendrán una resistencia eléctrica superior ni una rigidez mecánica inferior a la correspondiente a la varilla de cobre de 0.8 cm de diámetro.

- **Fenómenos vibratorios:** Las prescripciones reglamentarias vigentes no consideran la posibilidad que se produzcan fenómenos vibratorios de resonancia en el embarrado. Las normas VDE contemplan la posibilidad de que aparezcan esfuerzos complementarios sobre los conductores, si la frecuencia de oscilación mecánica de los mismos está en un margen del ±10% de la frecuencia de la red o el doble. A tal fin, se define una frecuencia de resonancia para el material tal como sigue:

$$f = 112\sqrt{\frac{EJ}{gL^4}} \quad [Hz] \qquad (27)$$

donde:

E: módulo de elasticidad del material [kg/cm²];
E_{cu} =1.25*10⁶
E_{al} =7.20*10⁶

J: módulo de inercia de la sección de la barra [cm⁴];

g: peso del conductor [kg/cm];

L: separación entre apoyos.

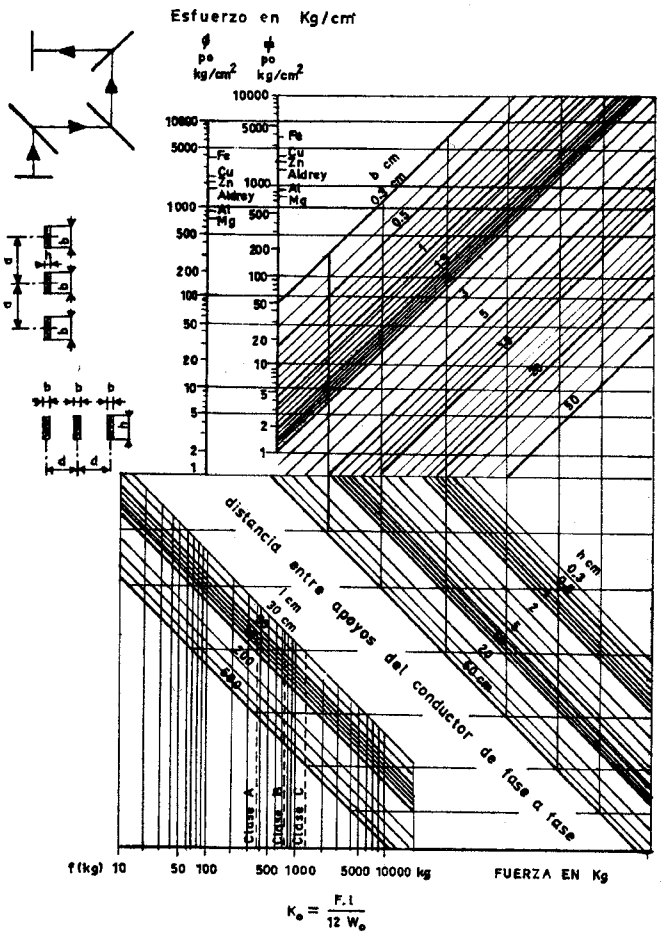


Figura 21. Nomograma para el estudio de los esfuerzos debidos a la corriente de cortocircuito dinámica.

3.2.- Esfuerzos mecánicos en aisladores.

Si L es la longitud del vano y F la fuerza por unidad de longitud, se adopta como valor de la fuerza sobre los aisladores (Q):

$$Q = FL \text{ (caso desfavorable)} \qquad (28)$$

El aislador debe ser capaz de soportar un esfuerzo de rotura:

$$R \geq \lambda Q \qquad (29)$$

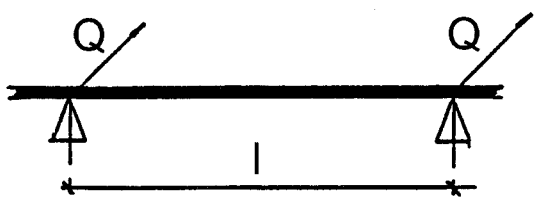


Figura 22. Cálculo de aisladores.

siendo:

λ: coeficiente de seguridad que suele tomar valores comprendidos entre 2'5 y 3.

Este esfuerzo de rotura se da en el centro del conductor y para dimensionar el aislador se debe conocer el esfuerzo de rotura en cabeza R1 (figura 22). El valor de R1 será:

$$R_1 = \frac{R * h}{h_1} \qquad (30)$$

Según Normas DIN 48.100-48101 y 48.102 los aisladores normalizados se clasifican en tres grupos según su esfuerzo en punta:

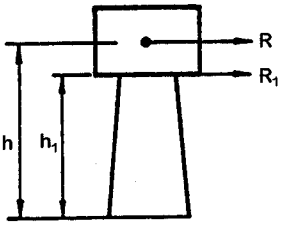


Figura23. Esfuerzo de rotura en cabeza de aislador.

TIPO	Esfuerzo máximo en punta [kg]
A	375
B	750
C	1250

Tabla 7. Aisladores normalizados según DIN.

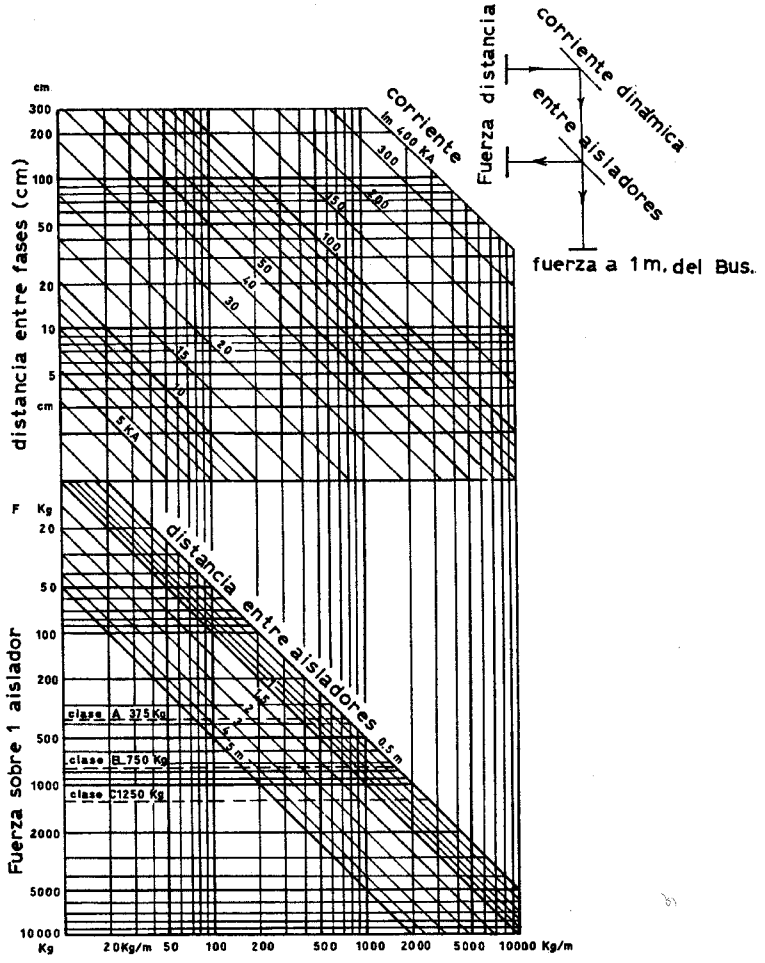


Figura 24. Nomograma para el estudio de los esfuerzos dinámicos de la corriente de cortocircuito.

TEMA 11. CÁLCULO DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN EN B.T. MEDIANTE MOMENTOS ELÉCTRICOS

1.- INTRODUCCIÓN.

El cálculo de la sección de los conductores de una línea de transporte destinada a llevar la energía eléctrica obtenida en las centrales generadoras hasta el lugar donde ha de ser utilizada, o de una red entre los diferentes receptores, es muy importante desde el doble punto de vista económico y técnico. De la sección de los conductores depende, por una parte, su coste, que es siempre un apartado de mucha importancia en toda instalación eléctrica, y por otra, su resistencia eléctrica, de la cual depende la energía perdida en ellos por efecto Joule y la caída o pérdida de tensión que tanto influye sobre la buena marcha de los receptores. Además, la sección de los conductores ha de ser adecuada a la intensidad de la corriente prevista para los mismos y suficientes para impedir una elevación de temperatura peligrosa.

Cualquiera que sea la naturaleza del conductor (cobre, aluminio, bronce, etc.) sus condiciones de enfriamiento depende del modo de estar instalado (desnudo, cubierto, aéreo, subterráneo, etc.) y, por tanto, también de ello depende la cantidad de calor desarrollada por efecto Joule para la cual alcance el conductor la temperatura máxima admisible, o lo que es lo mismo, la sección mínima que puede tolerarse para un valor dado de la corriente. Pero, si bien no debemos darle una sección inferior, si podemos emplearla mayor ya sea con el fin de disminuir la pérdida de energía hasta el valor conveniente para que la economía resultante de la explotación e instalación sea máxima, o bien atendiendo a que la caída de tensión no pase de un cierto limite, compatible con el buen funcionamiento de los receptores.

Se determinará primero la sección mínima que satisface la condición de seguridad, y expondremos después la manera de calcular la sección definitiva, atendiendo al máximo fijado para la caída de tensión.

El criterio de calentamiento hace referencia a la máxima corriente que puede circular por un conductor eléctrico, según su naturaleza, aislamiento, condiciones de instalación, etc., de forma que no se produzca una elevación de temperatura peligrosa para el mismo. Esta intensidad máxima se denomina Intensidad máxima admisible o simplemente intensidad admisible (I_{ADM}).

En el REBT (Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión) se dan los valores de la intensidad admisible, en un conductor, en función de su naturaleza, sección, canalización, etc. en servicio permanente y a una temperatura ambiente de 40ºC para conductores al aire y de 25ºC para conductores enterrados. Esta intensidad se denominará intensidad de tablas (Itb). Cuando cambian las condiciones de temperatura, de las especificadas anteriormente, habrá que afectar, como veremos, a la Itb de un factor de corrección, que denominaremos Fct (factor de corrección por temperatura), de la misma forma cuando cambian las condiciones de canalización de las especificadas por el reglamento, también se les afecta de un factor de corrección por instalación Fci, siendo el factor de corrección total (F_{CT}):

$$F_{CT} = Fct * Fci \qquad (1)$$

Los factores de corrección por temperatura y por instalación también vienen especificados por REBT. Las distintas instrucciones del REBT, de las que podemos obtener las intensidades de tabla, son:

- MIE BT 004: Conductor al aire, desnudos y aislados, de tensión nominal de aislamiento 1000 V.
- MIE BT 007: Cables aislados enterrados, de tensión nominal de aislamiento 1000 V.
- MIE BT 017: Cables aislados, al aire o directamente empotrados y bajo tubo ó conducto, con tensión nominal de aislamiento (nivel de aislamiento) 750 V.

Teniendo en cuenta lo anterior, la intensidad admisible para un conductor, será:

$$I_{ADM} = Itb \times F_{CT} \qquad (2)$$

Por otro lado, el criterio de caída de tensión hace referencia, según especifica el REBT MIE BT 017, apartado 2.1.2, a que la sección de los conductores a utilizar se determinará de forma que la caída de tensión entre el origen de la instalación y cualquier punto de utilización sea menor del 3 % de la tensión nominal en el origen de la instalación, para alumbrado y del 5 % para los demás usos. Esta caída de tensión se calcula considerando alimentados todos los aparatos de utilización susceptibles de funcionar simultáneamente.

En cuanto a las viviendas, cabe considerar una caída de tensión total desde el origen de la instalación del 3 %. Esto es debido a que el origen de la instalación para el abonado es la Caja General de Protección. Desde este origen hasta un punto de consumo final, se distinguen: Línea Repartidora, Derivación Individual y Circuitos interiores.

La Línea Repartidora, según MIE BT 013, como máxima caída de tensión, se tiene:

- Contadores instalados de forma individual o concentrados por plantas: 1 %.
- Contadores instalados totalmente concentrados: 0,5 %.

En cuanto a las Derivaciones Individuales, según MIE BT 014, la máxima caída de tensión, será:

- Contadores instalados de forma individual o concentrados por plantas: 0,5 %.
- Contadores instalados totalmente concentrados: 1 %.

Total (Repartidora + Derivación) en cualquier situación posible: 1,5 %.

En cuanto a los Circuitos interiores, según la MIE BT 023, "Instalaciones interiores de viviendas - Prescripciones Generales", la sección de los conductores vendrá impuesta por la caída de tensión máxima del 1,5 %.

Con todo lo expuesto, el proceso a seguir para el cálculo de secciones de líneas eléctricas, se muestra a continuación.

- **Cálculo de la intensidad de la línea (Ical):**

Dicha intensidad de cálculo depende del tipo de suministro y sobre todo de la potencia de cálculo de la línea (Pc). Esta potencia de cálculo depende del tipo de línea (LíneaMotor, Alumbrado, Otros usos, etc.), del coeficiente de simultaneidad (Agrupaciones de líneas, Líneas a Subcuadros, Instalaciones de Enlace, etc.).

- **Cálculo de la sección por criterio de calentamiento:**

Conocida la intensidad de cálculo (Ical) se entra en las tablas de las instrucciones MIE BT 004, MIE BT 007 ó MIE BT 017 y se elige la sección mínima de forma que:

$$Ical < I_{ADM} = Itb \times F_{CT} \qquad (3)$$

- **Cálculo de la sección por criterio de caída de tensión:**

Con el valor de la sección obtenido y según el tipo de línea, se comprueba que la caída de tensión es inferior a los valores especificados por el reglamento y señalados anteriormente.

Estos dos pasos anteriores pueden invertirse a la hora de hacer el cálculo. Por último, cabe señalar que ***la sección aún puede sufrir variaciones (a mayor), debido a la protección de los conductores contra sobreintensidades*** (sobrecargas, y cortocircuitos).

Todo lo señalado se refiere a los conductores de fase. Para el cálculo del neutro (en caso de que hubiera), se tendrá en cuenta el grado de desequilibrio del sistema. Para el caso en que las cargas sean monofásicas, y alimentamos nuestra instalación de forma trifásica, la sección del neutro será igual a la de las fases, ya que podría estar cargada solamente una de ellas.

Por último, el conductor de protección (tierra), se calculará según la MIE BT 017 tabla V del REBT:

Secciones de los conductores de fase [mm2]	Sección mínima de los conductores de protección [mm2]
S 16	S (*)
16 < S 35	16
S > 35	S/2

Tabla 1. Sección del conductor de protección.

(*) Con un mínimo de:

- 2,5 mm². Si los conductores de protección forman parte de la canalización de alimentación y tienen una protección mecánica.
- 4 mm². Si los conductores de protección no forman parte de la canalización de alimentación y no tienen protección mecánica.

También y como comentario a esta tabla se tiene que, cuando la sección de los conductores de fase, sea superior a 35 mm², se puede admitir para los conductores de protección unas secciones menores que las que resultan de la aplicación de la tabla 1, pero por lo menos iguales a 16 mm² y siempre que se justifique que el funcionamiento del dispositivo de corte automático es tal que el paso de la corriente de defecto por el conductor de protección, no provoca en este un calentamiento capaz de perjudicar su conservación o su continuidad. En caso de defecto rígido, el dispositivo de corte actuará antes de que los conductores de protección experimenten un incremento de temperatura de:

- 100 ºC si son conductores aislados.
- 150 ºC si los conductores son desnudos.

2.- CAPACIDAD DE CARGA DE UN CABLE EN SERVICIO PERMANENTE.

El Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión determina para los cables aislados (con distintos tipos de aislamientos) instalados al aire Instrucción MIE BT 004, de cobre (Tabla V) ó de aluminio (Tabla VI), y para los cables enterrados Instrucción MIE BT 007, de cobre (Tabla I) ó de aluminio (Tabla II) los valores de intensidad máxima admisible en servicio permanente.

TABLA I — INTENSIDAD MAXIMA ADMISIBLE EN AMPERIOS PARA CABLES CON CONDUCTORES DE COBRE, EN INSTALACION ENTERRADA (servicio permanente)

Sección nominal mm²	3 Terno de cables unipolares (1)					1 cable tripolar o tetrapolar					2 cables unipolares				1 cable bipolar			
	TIPO DE AISLAMIENTO																	
	V	E	D	R	P	V	E	D	R	P	V	E	D	R	V	E	D	R
6	63	68	70	72	75	66	61	64	66	54	90	98	103	105	75	80	84	86
10	85	91	94	96	98	75	82	85	88	72	120	130	135	140	98	105	112	115
16	110	115	120	125	125	97	105	110	115	95	160	170	180	185	125	140	148	150
25	140	150	155	160	160	125	135	140	150	125	205	225	230	240	165	175	185	190
35	170	180	185	190	190	150	165	175	180	150	245	270	280	290	195	215	225	230
50	200	215	225	230	235	180	195	205	215	190	285	310	325	335	230	250	260	270
70	245	260	270	280	285	220	240	250	260	230	355	385	400	415	280	305	315	325
95	290	315	325	335	340	265	290	305	310	270	435	465	480	500	340	365	375	385
120	335	360	375	380	375	305	335	350	355	305	485	530	545	565	385	415	430	440
150	370	400	415	425	430	340	370	390	400	350	545	595	610	630	430	465	480	495
185	420	450	470	480	480	385	420	440	450	395	610	665	690	715	480	520	540	555
240	485	520	540	550	540	445	485	505	520	445	710	775	800	830	555	605	625	635
300	550	590	610	620	600	505	550	565	590	500	800	870	900	935	630	680	705	720
400	615	670	690	705	660	570	615	645	665	555	910	995	1025	1060	710	775	800	815
500	685	745	775	790	720	—	—	—	—	—	1015	1095	1135	1175	—	—	—	—
630	770	840	870	885	770	—	—	—	—	—	1165	1270	1315	1350	—	—	—	—
800	—	—	—	—	820	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1000	—	—	—	—	870	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tipos de aislamiento:

V = Policloruro de vinilo
E = Goma butílica (butil)
D = Etileno - propileno
R = Polietileno reticulado
P = Papel impregnado

(1) Incluye, además, el conductor neutro, si existe

Tabla 2. Intensidad máxima admisible para cables con conductores de cobre, en instalación cerrada.

Los valores de referencia considerados para la confección de las tablas I, II, V y VI, son:

- Instalación al aire:
  - Temperatura del aire 40 ºC.
  - Renovación eficaz del aire.
- Instalación enterrada:
  - Temperatura del terreno 25ºC.
  - Resistividad del terreno 100 (ºC*cm/W).

Algunos de estos valores son fácilmente determinables, otros, en cambio, debido a las características de la instalación, temperatura ambiente, presencia de otros cables, etc. dificultan la buena evacuación del calor generado y hacen necesario la introducción de unos factores de corrección que complican extraordinariamente el cálculo de la carga de un cable dado. La norma UNE 21.123 proporciona estos valores en la "Guía para la elección de cables de transporte de energía, aislados con dieléctrico secos extruidos, para tensiones nominales (0,6/1) kV, para redes de distribución, acometidas, instalaciones de alumbrado e industriales, al aire o enterradas". La normativa que debe cumplir algunos conductores comerciales de B.T. aparece en la figura 1.

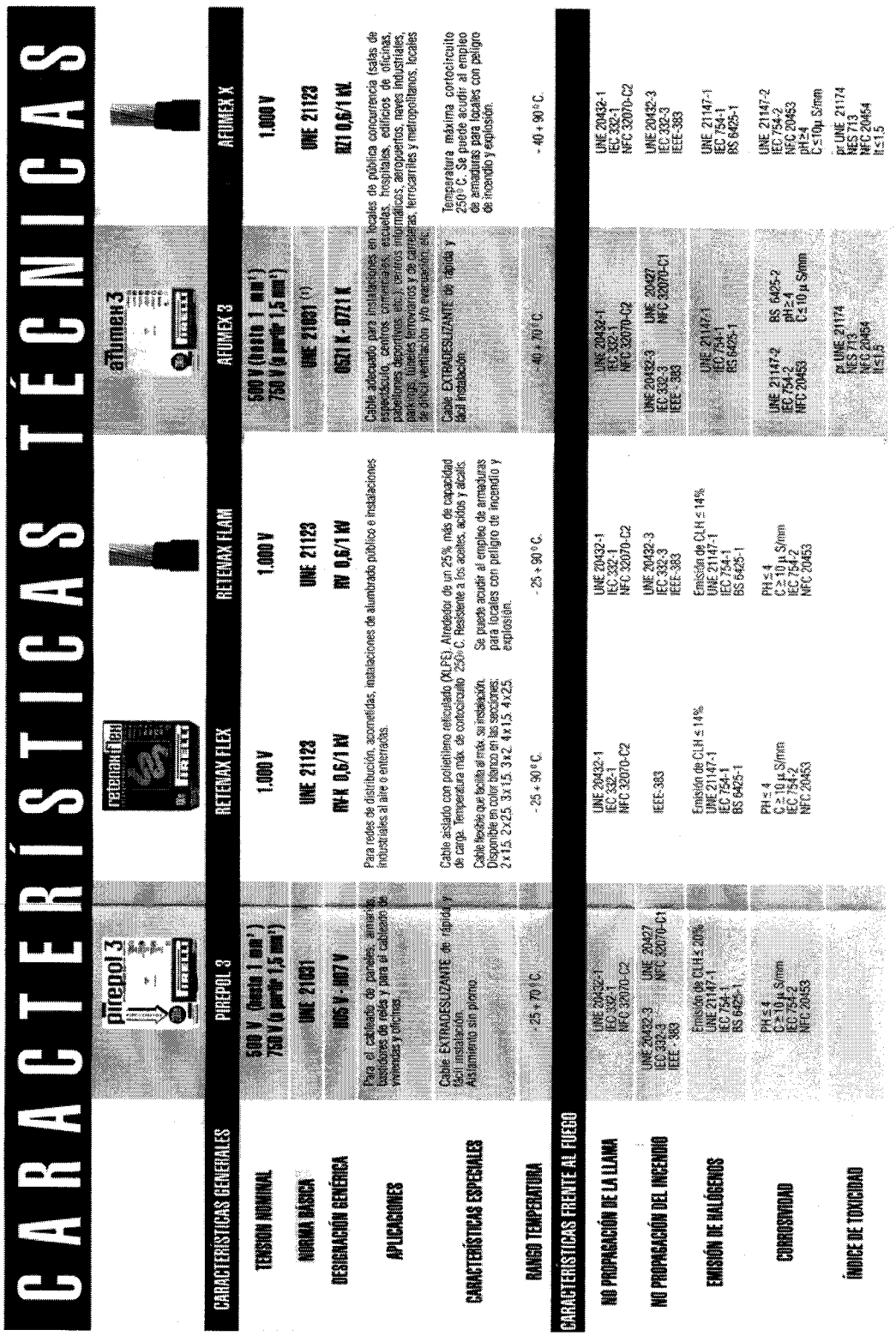


Figura 1. Características técnicas de conductores de B.T.

2.1.- Factores de corrección.

En el caso de que las condiciones de la instalación no sean las de referencia antes citadas, deberán aplicarse los factores de corrección que a continuación se indican a los valores de la intensidad máxima admisible en servicio permanente obtenidos en las tablas anteriores:

- **Para instalaciones al aire libre:**

a) Para temperatura ambiente diferente a los 40 ºC.

Temp (ºC)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Fact	1,26	1,22	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90	0,84	0,77

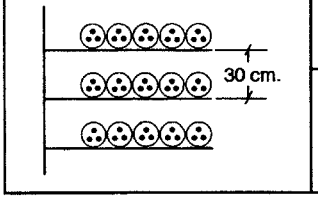
Tabla 3. Factor de correción por temperatura.

b) Para cables trifásicos ó ternos de cables instalados al aire en canales ó galerías.

En ciertas condiciones de instalación el calor disipado por los cables no puede difundirse libremente y provoca un aumento de la temperatura ambiente. La magnitud depende de muchos factores y debe ser determinada en cada caso. En una valoración aproximada debe tenerse presente que el aumento de temperatura es del orden de los 15 ºC. La intensidad admisible deberá reducirse haciendo uso de los factores de corrección de la tabla 3.

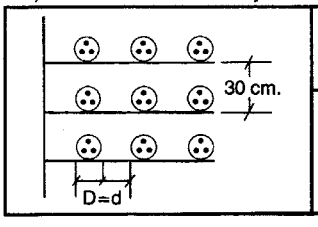
c) Cables trifásicos ó ternos de cables unipolares instalados al aire y agrupados.

c-1) Tendidos en bandejas continuas, en contacto entre sí.



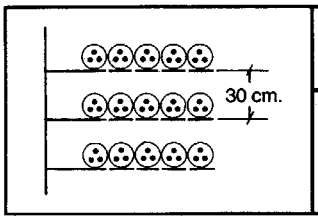
N.º de bandejas	N.º de cables por bandeja			
	2	3	6	9
1	0,84	0,80	0,75	0,73
2	0,80	0,76	0,71	0,69
3	0,78	0,74	0,70	0,68
6	0,76	0,72	0,68	0,66

c-2) Tendidos en bandejas continuas, separados un diámetro.



N.º de bandejas	N.º de cables por bandeja				
	1	2	3	6	9
1	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84
2	0,90	0,85	0,83	0,81	0,80
3	0,88	0,83	0,81	0,79	0,78
6	0,86	0,81	0,79	0,77	0,76

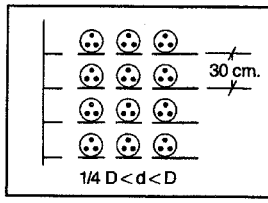
c-3) Tendidos en bandejas perforadas, en contacto entre sí.



N.º de bandejas	N.º de cables por bandeja			
	2	3	6	9
1	0,84	0,80	0,75	0,73
2	0,80	0,76	0,71	0,69
3	0,78	0,74	0,70	0,68
6	0,76	0,72	0,68	0,66

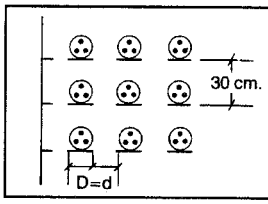
Tabla 4. Factor de corrección por agrupación de cables.

c-4) Tendidos en bandejas perforadas, separados menos de 1 Ø.



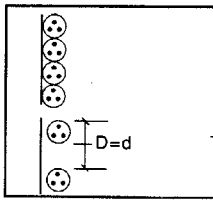
N.º de bandejas	N° de cables por bandeja			
	1	2	3	más de 3
1	1,00	0,93	0,87	0,83
2	0,89	0,83	0,79	0,75
3	0,80	0,76	0,72	0,69
más de 3	0,75	0,70	0,66	0,64

c-5) Tendidos en bandejas perforadas, separados un diámetro.



N.º de bandejas	N° de cables por bandeja				
	1	2	3	6	9
1	1,00	0,98	0,96	0,93	0,92
2	1,00	0,95	0,93	0,90	0,89
3	1,00	0,94	0,92	0,89	0,88
6	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86

c-6) Dispuestos sobre una pared.



	N° de cables o ternos				
	1	2	3	6	9
En contacto entre sí y tocando la pared	0,85	0,78	0,73	0,68	0,66
Separados entre sí y de la pared 1 Ø	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86

Tabla 5. Factor de corrección por agrupación de cables.

d) Cables expuestos directamente al sol.

El coeficiente que deberá aplicarse en un cable expuesto al sol, es muy variable. Se recomienda 0,90.

e) Cables instalados dentro de un tubo.

En este caso, tanto si el cable se instala al aire (por ejemplo, sobre paredes o muros), empotrado ó en huecos de la construcción, el Reglamento (MIE BT 004. Apart. 4.3.) recomienda la aplicación de un factor de corrección de 0,80. Este valor no será válido en el caso de que el tubo esté rodeado de materiales de característica de aislamiento térmico elevadas tales como lana de vidrio, poliestireno u otros aislamientos térmicos o acústicos.

- Para instalaciones enterradas:

a) Cables en terrenos con temperatura distinta a 25° C.

T. (° C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Fact.	1,11	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78

b) Resistividad térmica del terreno distinta a 100 ° C - cm/W

Resist. térmica del terreno en ° C - cm/W		80	100	120	150	200	250
Coef. de correcc.	unipolares	1,09	1,00	0,93	0,85	0,75	0,68
	tripolares	1,07	1,00	0,94	0,87	0,78	0,71

Tabla 6. Factor de corrección en instalaciones enterradas.

Resist. térmica del terreno en ° C - cm/W	Estado del suelo	Condiciones atmosféricas
70	Muy húmedo	Muy lluvioso
100	Húmedo	Lluvia frecuente
200	Seco	Lluvia escasa
300	Muy seco	Muy poca lluvia

c) Cables trifásicos, ó ternas unip., agrupados bajo tierra

N.º de cables en zanja	2	3	4	5	6	8	10	12
Separados 7 cm	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53	0,50
En contacto	0,80	0,70	0,64	0,60	0,56	0,53	0,50	0,47

d) Cables enterrados en una zanja a distintas profundidades.

Profundidad del tendido, cm	70	100	120	150	200
Factor de corrección	1,00	0,97	0,95	0,93	0,91

e) Cables enterrados en una zanja en el interior de tubos, conductos o similares.

Tabla 7. Factor de corrección en instalaciones enterradas.

e) Cables enterrados en una zanja en el interior de tubos, conductos o similares.

e-1) Tubos, ó conductos, de poca longitud.

Se entiende por corta longitud, las instalaciones tubulares que no superen longitudes de 15 m (cruzamiento de caminos, carreteras, etc.). En este caso no es necesario aplicar un coeficiente corrector de intensidad. La relación entre el diámetro del tubo y el del cable tripolar, o diámetro aparente de la terna, introducido en aquel será igual o superior a 2.

e-2) Tubos, ó conductos, de gran longitud.

El coeficiente de corrección dependerá del tipo de agrupación empleado y variará para cada cable según esté colocado en un tubo central ó en la periferia. Orientativamente, se recomienda aplicar un coeficiente corrector de 0,8. En conductos multitubulares se recomienda aplicar un factor de corrección de 0,7.

f) Cuando se conectan cables en paralelo debido a la elevada intensidad a transportar.

Cuando es necesario conectar más de dos cables en paralelo, por no existir secciones suficientes de conductor para transportar una intensidad dada, esto es, cables conectados en ambos extremos a barras comunes, se deberá aplicar un coeficiente corrector adicional, como mínimo, de 0,9 para compensar el posible desequilibrio de las intensidades entre los cables conectados a la misma fase.

3.- CÁLCULO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN POR EL MÉTODO DE MOMENTOS ELÉCTRICOS

3.1.- Caída de tensión, sección y pérdida de energía en una línea de corriente continua.

Sea el circuito de la figura 2, constituido por un generador A de corriente continua, una línea de longitud L formada por dos conductores y un receptor B cuyas características vienen definidas por su potencia nominal P_n y su tensión nominal U_n.

El suministro de energía al receptor B no implica que la tensión que ha de recibir sea el valor U_n, bien por el contrario hay que señalar que un receptor cumple su función dentro de una tolerancia o fluctuación de tensión que llegue a sus bornas.

Citemos como ejemplo una lámpara fluorescente de 58 W y 220 V. Este elemento receptor puede perfectamente funcionar con 215 V o 225 V y queda evidente que su flujo lumínico queda afectado por esta variación de tensión de alimentación. En general puede decirse que esta tolerancia respecto al receptor oscila en un ±10 % realizando su función, caso del motor eléctrico. Es pues evidente que el receptor puede trabajar en condiciones distintas y no por ello sufrir una degradación inmediata, (quedar inutilizado).

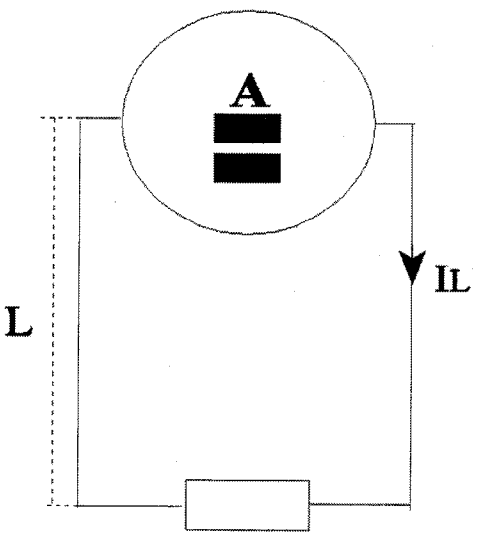


Figura 2. Línea de D.C.

El parámetro que define el receptor independientemente de la tensión de alimentación es su impedancia (Z). En nuestro caso de corriente continua, su resistencia (R).

Así pues, podemos decir:

Resistencia del receptor:

$$R_r = \frac{U_n^2}{P_n} \qquad (4)$$

Por todo ello el receptor al no recibir su tensión nominal en bornes, en general, no consumirá la potencia P_n, siendo ésta:

U: Tensión que recibe el receptor U_n.
I_L: Intensidad de línea = Intensidad del receptor.
P: Potencia consumida a otra tensión (U).

El transportar la energía mediante los dos conductores, por los cuales va a circular la intensidad I_L presupone, al no ser un conductor perfecto ($R_L = 0$) una determinada pérdida de energía. La energía es una potencia aplicada durante un determinado tiempo, luego la potencia cedida por el generador A no llegaría íntegramente al receptor B. Para que exista una potencia eléctrica, los valores que definen tensión e intensidad no pueden ser nulos.

La ley de Kirchhoff en un circuito nos establece la "conservación" de la intensidad, (recuérdese que en un nudo las intensidades que entran han de tener el mismo valorque las que salen), así pues, esta pérdida de energía ha de manifestarse por una tensión distinta y menor en el receptor que en el generador.

La caída de tensión en una línea hemos de interpretarla en consecuencia como la diferencia entre la tensión que se le entrega y la que ella cede en su extremo. Siendo U la tensión

perdida en la línea, para el caso que nos ocupa ΔU/2 corresponde a un conductor y puede ser representada según la figura 3. En ésta hemos tomado las tensiones, tanto del generador como del receptor, en el eje de ordenadas y en el eje de abcisas la distancia que separa estos dos elementos del circuito.

Por último, hemos de hacer constar que esta caída de tensión ha de ser siempre medible mediante un voltímetro, como más adelante, en caso de corriente alterna trataremos. La caída de tensión de longitud L tendrá como expresión:

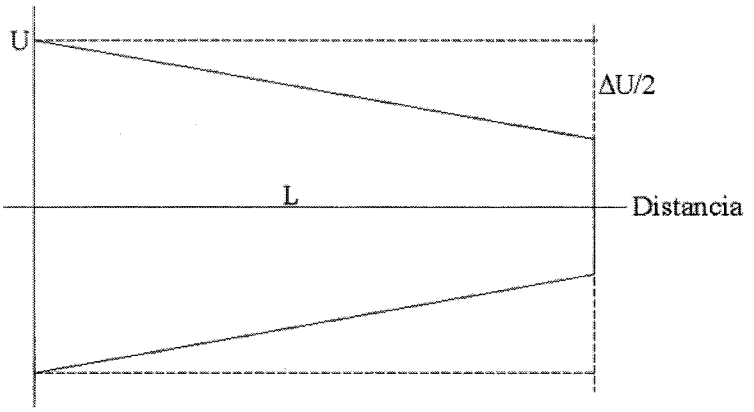


Figura 3. Caída de tensión en una línea D.C.

$$\frac{\Delta U}{2} = \frac{1}{k} \cdot \frac{L}{S} \cdot I_L \qquad (5)$$

$$[U_G - \Delta U] = I_L \cdot R_R \qquad (6)$$

$$R_r = \frac{U_n^2}{P_n} \qquad (7)$$

Siendo:

- K: 56 para el cobre y 36 para el aluminio.
- L: Longitud de un conductor que coincide con la distancia (en metros).
- S: Sección del conductor (en mm^2).
- I_L: Intensidad de línea.
- U_G: Tensión del generador.

Sustituyendo y despejando S obtendremos:

$$S = \frac{1}{K}\frac{2L}{\Delta U}\frac{[U_G - \Delta U]}{R_r} = \frac{[U_G - \Delta U]P_n \cdot 2L}{U_n^2 \cdot \Delta U \cdot K} = \frac{U_G \cdot P_n \cdot 2L}{U_n^2 \cdot \Delta U \cdot K} - \frac{\Delta U \cdot P_n \cdot 2L}{U_n^2 \cdot \Delta U \cdot K} \qquad (8)$$

Como se puede apreciar, la sección viene definida por la superposición de dos efectos al observar la estructura de la expresión.

La aplicación reiterada de esta expresión en una distribución de red bien abierta o mallada es difícil y laboriosa como se pondrá de manifiesto cuando estudiemos estas tipologías. Por todo ello, vamos a imponer unas condiciones que nos introduzcan errores mínimos aceptables y que valoraremos en un ejemplo sencillo.

En beneficio de los consumidores vamos a establecer que la tensión que reciben es constante y su valor, el nominal de los aparatos que se conectan. Es aceptable esta hipótesis ya que en el reglamento de verificaciones eléctricas y regularidad en el suministro de energía del 15-XI-54 y posteriores modificaciones del 7-IV-79, la fluctuación permitida respecto a la tensión nominal establecida no puede ser superior a ±7 %. Así pues tendremos que:

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{\Delta U}{2} = \dfrac{1}{K}\dfrac{L}{S} I_L \\ I_L = \dfrac{U_n}{R_r} \\ R_r = \dfrac{U_n^2}{P_n} \end{array}\right\} \quad S = \frac{2 \cdot L \cdot I_L}{K \cdot \Delta U} = \frac{2 \cdot L \cdot P_n}{K \cdot \Delta U \cdot U_n} \qquad (9)$$

- **Ejemplo:**

Supongamos un receptor de 1000 W, tensión nominal 220 V. Caída de tensión del 5 %. Distancia 100 m.

Para el caso 1º.- estableceremos que el generador genera 220 V.

Para el caso 2º.- estableceremos que el receptor recibe 220 V.

1er Caso: $\Delta U = 220 \bullet 0.05 = 11$ V.

$$R = \frac{220^2}{1000}$$

$$S = \frac{1}{56}\frac{2 \cdot 100 \cdot (220 - 11) \cdot 1000}{220^2 \cdot 11} = 1.402 \text{ mm}^2$$

2° Caso:

$$S = \frac{2 \cdot 100 \cdot 1000}{56 \cdot 220 \cdot 11} = 1.475 \text{ mm}^2$$

El generador tendrá que generar a 220 + 11 = 231 V, lo cual no tiene inconveniente alguno.

El error, como puede apreciarse, es de 0.073 mm^2. Si hemos de tener en cuenta que el conductor normalizado en sección más próximo es de 1.5 mm^2, el inferior de 1 mm^2 y el superior de 2.5 mm^2, el error que cometemos no puede inducirnos a escoger un conductor inapropiado.

Esta fórmula deducida en segundo lugar presenta una estructura en donde sólo existen operaciones de multiplicar y dividir, y en consecuencia no plantea métodos de superposición.

Pasemos al concepto de pérdida de energía. La energía perdida en el transporte viene representada por el efecto Joule de los conductores y tiene por expresión $R_L \cdot I^2$. Si llamamos P_1 la energía entregada y P_n la energía que cede la línea, la diferencia será:

$$P_1 - P_n = R_L \cdot I_L^2 = \frac{2 \cdot L}{SK} I_L^2 \qquad (10)$$

El porcentaje de pérdidas en el transporte se refiere siempre respecto al receptor de la misma. En este caso respecto a P_n, así tendremos:

$$\eta = \frac{P_1 - P_n}{P_n} \cdot 100 = \frac{2 \cdot L}{S^* K} \frac{I_L^2}{P_n} \cdot 100 = \frac{2 \cdot L \cdot I_L}{S^* K \cdot U_n} \cdot 100 \qquad (11)$$

Conocido	Caída de tensión	Sección	Pérdida de energía (%)
I_L	$\Delta U = \frac{2 \cdot L \cdot I_L}{K \cdot S}$	$S = \frac{2 \cdot L \cdot I_L}{K \cdot \Delta U}$	$\eta = \frac{2 \cdot L \cdot I_L}{K \cdot S \cdot U_n} \cdot 100$
P_n	$\Delta U = \frac{2 \cdot L \cdot P_n}{K \cdot S \cdot U_n}$	$S = \frac{2 \cdot L \cdot P_n}{K \cdot \Delta U \cdot U_n}$	$\eta = \frac{2 \cdot L \cdot I_L^2}{K \cdot S \cdot P_n} \cdot 100$ $\eta = \frac{2 \cdot L \cdot P_n}{K \cdot S \cdot U_n^2} \cdot 100$

Tabla 8. Resumen de fórmulas para corriente continua.

3.2.- Caída de tensión, sección y pérdida de energía en una línea de corriente alterna.

El suministro de energía, tanto en circuitos monofásicos como trifásicos equilibrado, no ofrece diferencia alguna si tenemos presente que éste último puede ser reducido al primero teniendo en cuenta que la energía transportada es la tercera parte y con una tensión de $\sqrt{3}$ veces menor.

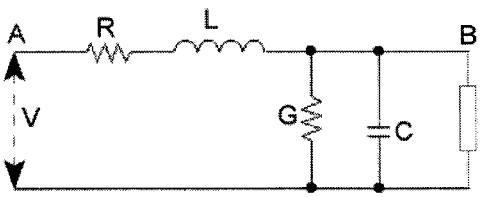


Figura 4. Línea de corriente alterna monofásica.

Se explicará únicamente el caso del circuito monofásico, al poder ser el circuito trifásico equilibrado reducido a uno monofásico por la consideración anterior.

Sea el circuito de la figura 4, en el que hemos representado los parámetros de línea concentrados para simplificar y exponer brevemente su significado.

R: Resistencia óhmica del conductor.
X: Inductancia del conductor.
G: Perditancia, es decir, aislamiento no perfecto entre conductores.
C: Efecto capacitivo entre conductores.

En el cálculo de redes de media tensión y baja tensión, no son tenidos en cuenta estos cuatro parámetros, los dos primeros llamados longitudinales y los otros dos transversales; sino únicamente los parámetros longitudinales.

Los parámetros transversales, perditancia y efecto capacitivo son de valores despreciables frente a la resistencia e inductancia del conductor. Así, de esta forma, se obtiene la fórmula de aplicación para líneas de media tensión, conocida también bajo el nombre de fórmula de Blondel, que nos permite calcular la caída de tensión:

$$\Delta U = R \cdot I_L \cdot Cos\varphi + X \cdot I_L \cdot Sen\varphi \qquad (12)$$

Esta fórmula, por lo tanto aproximada, expresa para la determinación de la caída de tensión la superposición de dos efectos.

Para superar esta dificultad de superponer dos efectos, vamos a considerar que la caída de tensión debida a la inductancia no existe, si bien, sobre los resultados obtenidos deberemos efectuar las correcciones pertinentes en su momento.
Ecuaciones Generales:

$$\left.\begin{aligned} \bar{V}_1 &= \bar{V}_2 \cdot Ch\sqrt{\bar{Z}\cdot\bar{Y}} + \bar{I}_2\sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}}\,Sh\sqrt{\bar{Z}\cdot\bar{Y}} \\ \bar{I}_1 &= \frac{\bar{V}_2}{\sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}}}Sh\sqrt{\bar{Z}\cdot\bar{Y}} + I_2 \cdot Ch\sqrt{\bar{Z}\cdot\bar{Y}} \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} \bar{Z} &= R + j\omega L \\ \bar{Y} &= G + j\omega C \end{aligned} \qquad (13)$$

donde:

Impedancia característica: $\sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}}$ (14)

Ángulo característico: $\sqrt{\bar{Z}\bar{Y}}$ (15)

Para líneas de corta longitud [< 80 km] y despreciable el valor de la perditancia (G) y de la capacidad (C), obtendremos al desarrollar el seno y coseno hiperbólico:

$$Sh\,x = x + \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{120} + \ldots \qquad Ch\,x = 1 + \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} + \ldots \qquad (16)$$

tomando dos términos del desarrollo obtenemos:

$$\left.\begin{aligned}\bar{V}_1 &= \bar{V}_2\cdot\left[1+\frac{1}{2}\bar{Z}\cdot\bar{Y}\right]+\bar{I}_2\sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}}\left[\sqrt{\bar{Z}\cdot\bar{Y}}+\frac{1}{6}\bar{Z}\cdot\bar{Y}\sqrt{\bar{Z}\cdot\bar{Y}}\right]\\ \bar{I}_1 &= \frac{\bar{V}_2}{\sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}}}\left[\sqrt{\bar{Z}\cdot\bar{Y}}+\frac{1}{6}\bar{Z}\cdot\bar{Y}\sqrt{\bar{Z}\cdot\bar{Y}}\right]+I_2\cdot\left[1+\frac{1}{2}\bar{Z}\cdot\bar{Y}\right]\end{aligned}\right\} \quad (17)$$

Simplicando:

$$\left.\begin{aligned}\bar{V}_1 &= \bar{V}_2\left[1+\frac{1}{2}\bar{Z}\cdot\bar{Y}\right]+\bar{I}_2\bar{Z}\left[1+\frac{1}{6}\bar{Z}\cdot\bar{Y}\right]\\ \bar{I}_1 &= \bar{V}_2\bar{Y}\left[1+\frac{1}{6}\bar{Z}\cdot\bar{Y}\right]+\bar{I}_2\left[1+\frac{1}{2}\bar{Z}\cdot\bar{Y}\right]\end{aligned}\right\} \quad (18)$$

Despreciando G y C, el valor de Y = 0.

$$\left.\begin{aligned}\bar{V}_1 &= \bar{V}_2+\bar{Z}\cdot\bar{I}_2\\ \bar{I}_1 &= \bar{I}_2\end{aligned}\right\} \quad (19)$$ Gráficamente tendremos la figura 5:

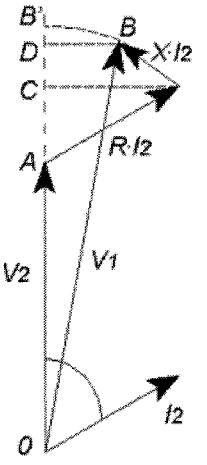


Figura 5. Caída de tensión en una línea monofásica.

Caída de tensión:

$$|V_1 - V_2| = AB' \approx AD \quad (20)$$

$$\Delta U = |AD|;\ |AD| = R\,I_2\cos\varphi + X\,I_2\,\mathrm{Sen}\,\varphi \quad (21)$$

donde:

R_i: Resistencia kilométrica.
X_i: Reactancia kilométrica.

Fórmula de Blondel: $\Delta U = L\bullet I_2\,(R_i\cos\varphi + X_i\,\mathrm{Sen}\varphi)$ (22)
En monofásica: $\Delta U = 2L\bullet I_2\,(R_i\cos\varphi + X_i\,\mathrm{Sen}\varphi)$ (23)
En trifásica: $\Delta U = 3\,L\bullet I_2\,(R_i\cos\varphi + X_i\,\mathrm{Sen}\varphi)$ (24)

CA Monofásica	Caída de tensión	Sección	Rendimiento
Conocido I_L	$\Delta U=\frac{2\cdot L\cdot I_L}{K\cdot S}\cos\varphi$	$S=\frac{2\cdot L\cdot I_L}{K\cdot\Delta U}\cos\varphi$	$\eta=\frac{2\cdot L\cdot I_L\cdot 100}{K\cdot S\cdot U_N\cos\varphi}$
Conocido P_N	$\Delta U=\frac{2\cdot L\cdot P_N}{K\cdot S\cdot U_N}$	$S=\frac{2\cdot L\cdot P_N}{K\cdot\Delta U\cdot U_N}$	$\eta=\frac{2\cdot L\cdot I^2_L\cdot 100}{K\cdot S\cdot P_N}$ $\eta=\frac{2\cdot L\cdot P_N\cdot 100}{K\cdot S\cdot U^2_N\cos\varphi}$
CA Trifásica			
Conocido I_L	$\Delta U=\frac{\sqrt{3}\cdot L\cdot I_L}{K\cdot S}\cos\varphi$	$S=\frac{\sqrt{3}\cdot L\cdot I_L}{K\cdot\Delta U}\cos\varphi$	$\eta=\frac{\sqrt{3}\cdot L\cdot I_L\cdot 100}{K\cdot S\cdot U_N\cos\varphi}$
Conocido P_N	$\Delta U=\frac{L\cdot P_N}{K\cdot S\cdot U_N}$	$S=\frac{L\cdot P_N}{K\cdot\Delta U\cdot U_N}$	$\eta=\frac{3\cdot L\cdot I^2_L\cdot 100}{K\cdot S\cdot P_N}$ $\eta=\frac{L\cdot P_N\cdot 100}{K\cdot S\cdot U^2_N\cos\varphi}$

Tabla 9. Tabla resumen de fórmulas en corriente alterna.

3.3.- Cálculo de la sección del conductor en una línea con varias cargas.

Consideremos un centro de alimentación S y el esquema bifilar de la línea, que para fijar ideas en su trayecto, existen cuatro cargas definidas por la intensidad que consumen a la tensión nominal. Para mayor facilidad consideremos que la fuente es de corriente continua. Vamos a estudiar la sección del conductor necesaria para una determinada caída de tensión tal como ΔU. Para un solo conductor ésta queda establecida por ΔU/2.

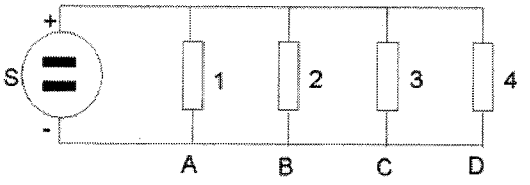


Figura 6. Línea D.C. con varias cargas conectadas.

El esquema para un conductor será:

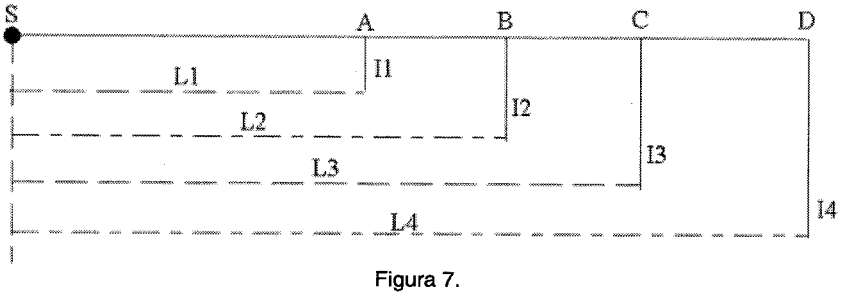


Figura 7.

Llamemos a la resistencia de los tramos (un sólo conductor):

SA = R_1
AB = R_2
BC = R_3
CD = R_4

Sean las distancias las indicadas en la figura 7. Las diferencias de tensiones medidas entre S y A, entre A y B, entre B y C, y entre C y D tendrán como expresión:

$$\begin{aligned} V_S - V_A &= 2R_1(I_1+I_2+I_3+I_4) \\ V_A - V_B &= 2R_2(I_2+I_3+I_4) \\ V_B - V_C &= 2R_3(I_3+I_4) \\ V_C - V_D &= 2R_4(I_4) \end{aligned} \qquad (25)$$

Sumando estas expresiones y ordenando adecuadamente obtendremos:

$$V_S - V_D = [I_4(R_1+R_2+R_3+R_4) + I_3(R_1+R_2+R_3) + I_2(R_1+R_2) + I_1 R_1] \qquad (26)$$

Supongamos que la sección sea uniforme en toda su longitud, si bien pueden establecerse otras consideraciones, las resistencias de los tramos pueden ser expresados como sigue:

$$R_1 = \frac{1}{K}\frac{L_1}{S}$$
$$R_2 = \frac{1}{K}\frac{L_2 - L_1}{S}$$
$$R_3 = \frac{1}{K}\frac{L_3 - L_2}{S} \qquad (27)$$
$$R_4 = \frac{1}{K}\frac{L_4 - L_3}{S}$$

Sustituyendo tendremos que:

$$V_S - V_D = \Delta U = \frac{2}{KS}[I_4 \cdot L_4 + I_3 \cdot L_3 + I_2 \cdot L_2 + I_1 \cdot L_1] \qquad (28)$$

Llamamos λ, longitud virtual, a la expresión siguiente:

$$\lambda = \frac{I_4 L_4 + I_3 L_3 + I_2 L_2 + I_1 L_1}{I_4 + I_3 + I_2 + I_1} \qquad (29)$$

, o bien, de forma general:

$$\lambda = \frac{\sum_{n=1}^{n=n} I_n L_n}{\sum_{n=1}^{n=n} I_n} \qquad (30)$$

De forma que obtenemos:

$$V_S - V_D = \Delta U = \frac{2\lambda \sum I_n}{K S} \qquad (31)$$

$$S = \frac{2\lambda \sum I_n}{K \cdot \Delta U} \qquad (32)$$

La longitud virtual así definida viene a establecernos la distancia que existe desde la fuente de alimentación al centro de gravedad de las cargas, suma de todas ellas, para que el efecto de caída de tensión fuese del mismo valor.

El numerador de la expresión (30) tiene semejanza con tomar momentos respecto a un punto de diversas fuerzas actuando sobre una viga en mecánica, por lo que a la citada expresión se le denomina "Momento eléctrico" respecto a una fuente.

Por otro lado cabe destacar que a efectos de pérdidas en la línea con cargas así distribuidas no puede utilizarse el valor de la "longitud virtual", tal como se demuestra a continuación, ya que la intensidad de los tramos de la línea interviene en las pérdidas cuadráticamente.

Sean los circuitos de las figuras 8 y 9:

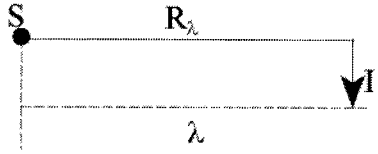


Figura 8.

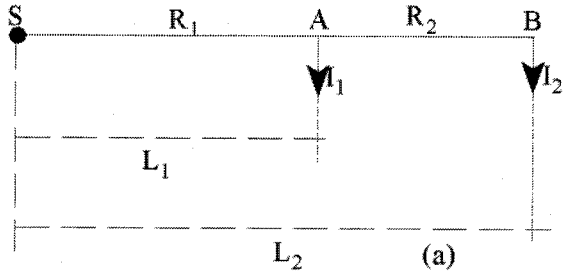


Figura 9.

Pérdidas en (a): $2\,R_1(I_1+I_2)^2 + 2\,R_2(I_2)^2$ (34)

$$\lambda = \frac{L_1 I_1 + L_2 I_2}{I_1 + I_2} \quad (33)$$

Pérdidas en (b): $2\,R_\lambda(I_1+I_2)^2$ (35)

Siendo: $$R_1 = \frac{L_1}{KS};\quad R_2 = \frac{L_2 - L_1}{KS};\quad R_\lambda = \frac{\lambda}{KS} \quad (36)$$

Sustituyendo y simplificando obtendremos que: $2 \cdot L_1 \cdot I_1 \cdot I_2 \neq I_1 \cdot I_2 (L_1 + L_2)$ (37)

3.4.- Cálculo de la sección del conductor en una topología en árbol.

Consideremos un centro de alimentación S del cual parte una línea o tronco principal y luego se ramifica en distintas líneas sin que exista la formación de una malla.

La figura 10 representa la topología del circuito, cuyas líneas pueden ser de dos o tres conductores, corriente continua o corriente alterna, etc..

Al definir la longitud virtual dijimos que era la distancia a que se debían colocar todas las cargas concentradas respecto al centro de alimentación para producir la misma caída de tensión, y fijada ésta la determinación de la sección del conductor.

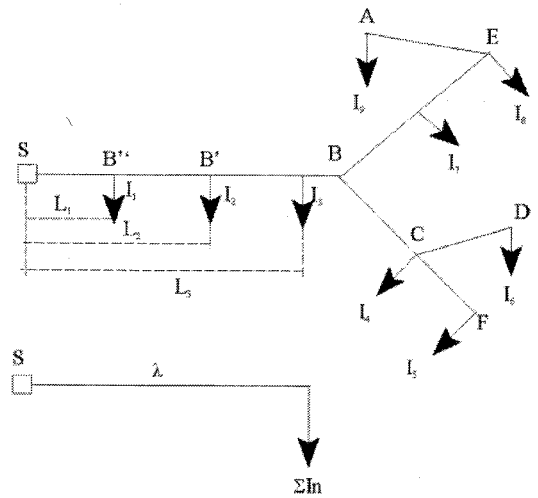


Figura 10.

Este valor λ definido por:

$$\frac{\sum Ln \cdot In}{\sum In}$$

es una longitud ponderada respecto a I_n, es decir, $\lambda > L_1$ y será $\lambda < L_n$.

Por lo tanto si queda definido un tramo del tronco principal por esta sección sucederán dos hechos:

- Su longitud en general será menor que λ.
- No pasará por dicho tramo, en general la misma intensidad en todo su recorrido.

Para la figura 10 ello quiere decir:

- Que si estimamos que en el tramo SB' vamos a establecer la sección calculada a partir de la longitud virtual λ, no por dicho tramo pasa ΣI_n, en parte si y en parte no, ya que por B' y B" pasa $\Sigma I_n - I_1$. Ello repercutirá en que la caída de tensión en el tramo SB' con la sección calculada será menor que si circulara en todo su recorrido ΣI_n, como establece la longitud virtual.
- Si tomásemos como sección para todo el árbol la calculada a partir de λ, la caída real en un extremo será menor que la establecida, según se demuestra a continuación para la configuración en árbol más sencilla.

Establecemos el circuito para corriente continua de la figura 11.

$$S = \frac{2\lambda \sum I_n}{K \cdot \Delta U} \qquad (38)$$

$$\lambda = \frac{L_1 I_1 + L_2 I_2 + L_3 I_3}{I_1 + I_2 + I_3} \qquad (39)$$

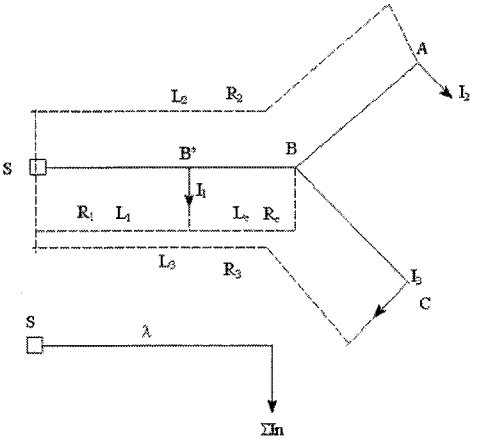


Figura 11.

Podemos establecer las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} V_S - V_{B'} &= R_1 [I_1 + I_2 + I_3] \\ V_{B'} - V_B &= R_C [I_2 + I_3] \\ V_B - V_A &= R_2 [I_2] \\ V_B - V_C &= R_3 [I_3] \end{aligned} \qquad (40)$$

De donde:

$$\begin{aligned} V_S - V_A &= R_1 I_1 + I_2 [R_1 + R_2 + R_C] + I_3 [R_1 + R_C] \quad (a) \\ V_S - V_C &= R_1 I_1 + I_2 [R_1 + R_C] + I_3 [R_1 + R_C + R_3] \quad (b) \end{aligned} \qquad (41)$$

Siendo:

$$R_1 = \frac{2 \cdot L_1}{KS}; \quad R_C = \frac{2 \cdot (L_C - L_1)}{KS}; \quad R_2 = \frac{2 \cdot (L_2 - L_C)}{KS}; \quad R_3 = \frac{2 \cdot (L_3 - L_C)}{KS} \qquad (42)$$

Sustituyendo en (41a) y (41b) obtendremos que:

$$V_S - V_A = \frac{2}{KS}[I_1L_1 + I_2L_2 + I_3L_C] \text{ (a)}$$
$$V_S - V_C = \frac{2}{KS}[I_1L_1 + I_2L_C + I_3L_3] \text{ (b)} \qquad (43)$$

Por otra parte:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \sum I_n}{K \cdot S} \qquad (44)$$

sustituyendo λ:

$$\Delta U = \frac{2}{KS}[I_1L_1 + I_2L_2 + I_3L_3] \qquad (45)$$

Comparando (45) con (41a) y (41b) obtendremos:

(45) con (41a); $L_1I_1 + L_2I_2 + L_3I_3 > L_1I_1 + L_2I_2 + L_CI_3$ **Evidente, ya que $L_3 > L_C$**

(45) con (41b); $L_1I_1 + L_2I_2 + L_3I_3 > L_1I_1 + L_CI_2 + L_3I_3$ **Evidente, ya que $L_2 > L_C$**

Luego la sección es mayor de la necesaria para esa caída establecida o bien con esa sección determinada por intensidad la caída es menor en los extremos del árbol de la establecida. Pero cabe destacar que en un cálculo práctico no es frecuente que suceda la coincidencia de la sección del conductor calculada con la normalización de fabricación del mismo, y en general se tome el inmediato superior, en consecuencia, la caída real en el tramo que se estudia será aún menor.

Para el cálculo del siguiente tramo hemos pues de establecer cual es la caída permitida a partir de dicho extremo, por ejemplo a partir de B'. A continuación estableceremos la nueva longitud virtual a partir de dicho punto y con la caída permisible, estableceremos una nueva sección y así sucesivamente.

En resumen, supongamos que se trata de una red en árbol en corriente continua:

- Establecer que tramos vamos a considerar que su sección sea homogénea.
- Calcular las longitudes virtuales para cada tramo considerado, por ejemplo para SB, para BE, para BC si estos han sido los elegidos.
- Determinar la sección para SB según la expresión $S = \frac{2\lambda \sum I_n}{K \cdot \Delta U}$
- Determinar cual es la sección normalizada, en general la inmediatamente superior.
- Determinar con la sección normalizada la caída de tensión real existente en dicho tramo.
- Determinar la sección por ejemplo para el tramo BE o BC siguiendo la metodología anterior.

- **Ejemplo:**

Caída de tensión admisible 10 V.

Tramos homogéneos elegidos: SB, BE, BC, CM, CN.

Cálculo de longitudes virtuales.

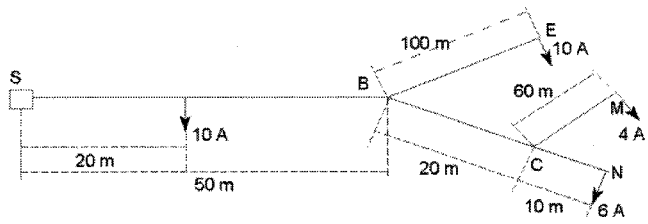


Figura 12.

Tramo SB; $\lambda_{SB} = \frac{20\cdot10+150\cdot1+130\cdot4+80\cdot6}{10+10+4+6} = 90$ m.

Tramo BE; Existe una sola carga de 10 A, λ_{BE} = 100 m.

Tramo BC; $\lambda_{BC} = \frac{80\cdot4+30\cdot6}{6+4} = 50$ m.

Tramo CM; Existe una sola carga de 4 A, λ_{CM} = 60 m.

Tramo CN; Existe una sola carga de 6 A, λ_{CN} = 10 m.

- Sección de SB:

$S_{SB} = \frac{2\cdot90\cdot30}{56\cdot10} = 9.64$ mm. Sección normalizada 10 mm²

Caída de tensión real en el tramo SB:

$$\Delta U_{SB} = \frac{2}{56\cdot10}[20\cdot30+(50-20)\cdot(30-10)] = 4.285 \text{ V.}$$

Caída de tensión permisible a partir del nudo B.

U=10-4.285 = 5.715 V.

- Sección de BE:

$S_{BE} = \frac{2\cdot100\cdot10}{56\cdot5.715} = 6.249$ mm. Sección normalizada 10 mm²

- Sección de BC:

$S_{BC} = \frac{2\cdot50\cdot10}{56\cdot5.715} = 3.214$ mm. Sección normalizada 4 mm²

Caída de tensión real en el tramo BC:

$$\Delta U_{BC} = \frac{2}{56\cdot4}[20\cdot10] = 1.785 \text{ V.}$$

Caída de tensión permisible a partir del punto C:

$$\Delta U = 5.715 - 1.785 = 3.93 \text{ V.}$$

- Sección CM:

$$S_{CM} = \frac{2 \cdot 60 \cdot 4}{56 \cdot 3.93} = 2.18 \text{ mm.}$$ Sección normalizada 2.5 mm².

- Sección CN:

$$S_{CN} = \frac{2 \cdot 6 \cdot 10}{56 \cdot 3.93} = 0.54 \text{ mm.}$$ Sección normalizada 1 mm²

Una vez terminado el cálculo debe comprobarse si las densidades de corriente son admisibles. Supuesto que se trata de cable Sintenax para tensión de servicio 1000 V, las tablas del fabricante indican para conductor unipolar al aire:

Sección mínima de fabricación 1.5 mm², y su intensidad máxima de 16 A.

- 2.5 mm² Intensidad máxima de 22 A.
- 4 mm² Intensidad máxima de 30 A.
- 10 mm² Intensidad máxima de 53 A.

Con estos datos se observa que el tramo CN debe ser modificado en sección a 1.5 mm², debido al tipo de conductor escogido.

3.5.- Cálculo de la sección del conductor de una topología en anillo.

Supongamos una nave de fabricación en la cual por un punto de ésta se suministra toda la energía eléctrica necesaria para alimentar una serie de máquinas adosadas en sus paramentos interiores, de forma tal que para asegurar estas alimentaciones a máquinas se establece una línea que nace y muere en el punto de alimentación.La topología establecida así es un anillo o malla elemental que se alimenta por un punto (figura 13).

Este circuito a efecto de cálculo de sección puede ser representado por una línea que se alimenta por sus dos extremos, como de hecho es; y existirá un punto de acuerdo con las intensidades que circulen por cada tramo donde se produzca la caída máxima de tensión, siendo la sección homogénea o no, a todo lo largo del circuito.

Anotemos que ambas fuentes S y S' están en la misma tensión de suministro.

Si la sección es homogénea en toda la longitud de la línea, tratemos de calcular cuales son las intensidades suministradas por las fuentes S y S' cuya suma será igual a toda la demandada, y establecido este reparto,

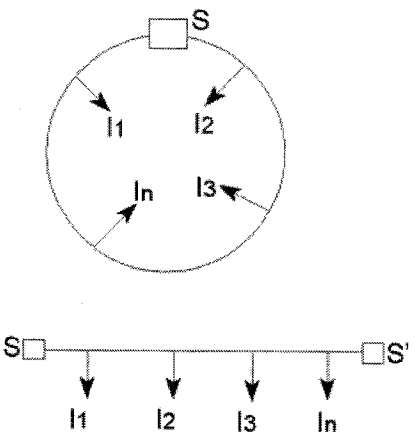


Figura 13. Línea en anillo.

como queda de manifiesto el punto de carga en donde se produce la máxima caída. Sea el circuito, el de la figura 14. Las fuentes S_A y S_B generan a la misma tensión.

Las resistencias de los tramos S_A-1, 1-2, 2-3, 3-4 y 4-S_B serán proporcionales a sus longitudes L_1, L_2-L_1, L_3-L_2, L_4-L_3, etc..

Supongamos que la fuente S_B suministra una intensidad I_B, en consecuencia por el tramo S_B-4 circula I_B, por el tramo 4-3 circula I_B-I_4, etc..

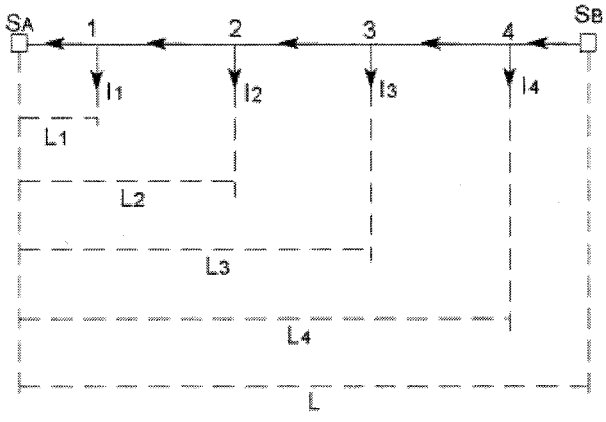


Figura 14.

Formulando las caídas de tensiones para los diversos tramos tendremos que:

$$\begin{aligned}
(V_1 - V_A) &\cong [I_B - I_4 - I_3 - I_2 - I_1]\cdot L_1 \\
(V_2 - V_1) &\cong [I_B - I_4 - I_3 - I_2 \quad]\cdot (L_2 - L_1) \\
(V_3 - V_2) &\cong [I_B - I_4 - I_3 \quad]\cdot (L_3 - L_2) \\
(V_4 - V_3) &\cong [I_B - I_4 \quad]\cdot (L_4 - L_3) \\
(V_B - V_4) &\cong [I_B \quad]\cdot (L - L_4)
\end{aligned} \qquad (46)$$

Teniendo en cuenta que $V_A = V_B$, sumando y simplificando tendremos que:

$$0 = -I_1L_1 - I_2L_2 - I_3L_3 - I_4L_4 + I_BL \qquad (47)$$

es decir,

$$I_B = \frac{L_1I_1 + L_2I_2 + L_3I_3 + L_4I_4}{L} \qquad (48)$$

Expresión esta que recuerda el cálculo de la reacción en un apoyo de una viga sometida a diversas cargas.

Eléctricamente pues, para determinar en estos casos la intensidad que suministra una fuente basta tomar "momentos eléctricos" respecto a la otra fuente y dividir por la distancia que separa las mismas.

La intensidad suministrada por la fuente S_A puede determinarse por idéntica fórmula tomando los momentos eléctricos respecto a S_B o bien por diferencia del total de las cargas menos lo que suministra la fuente calculada.

Establecidos ambos valores y en la observación de cómo circulan las intensidades por los diferentes tramos, pueden suceder dos casos:

- Que una carga sea alimentada solamente por un lado.
- Que una carga sea alimentada por ambos lados.

En el primer caso se pone de manifiesto que por el tramo 2-3 no puede circular intensidad y en consecuencia la caída de tensión ha de ser iguales en ambas cargas.

En el segundo caso se pone de manifiesto que si tanto por parte de la fuente de la izquierda como de la derecha, se suministra la carga de 15 A; este punto debe de tener una caída de tensión mayor que sus dos adyacentes ya que si no fuese así, el sentido indicado para la intensidad sería erróneo, ya que la intensidad circula del mayor al menor potencial.

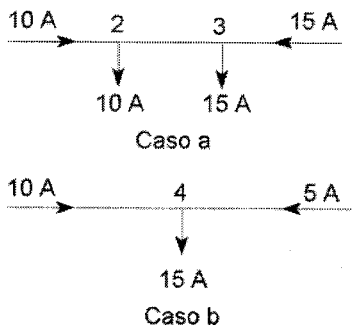


Figura 15.

La caída de tensión máxima que puede darse en una o dos cargas tienen pues como expresión en caso de corriente continua;

$$\Delta U=\frac{2}{K\cdot S}\left[L_1(I_B-I_4-I_3-I_2-I_1)+(L_2-L_1)(I_B-I_4-I_3-I_2)\right] \qquad (49)$$

Partiendo de la fuente S_A para el punto de carga 2.

Partiendo desde la fuente S_B tendremos:

$$\Delta U=\frac{2}{K\cdot S}\left[I_B(L-L_4)+(I_B-I_4)(L_4-L_3)+(I_B-I_4-I_3)(L_3-L_2)\right] \qquad (50)$$

Ambas expresiones son iguales como puede comprobarse teniendo en cuenta el valor de I_B deducido.

Es evidente que siendo parecidas las cargas y las distancias que las separan, en los tramos centrales puede pasar una intensidad reducida. Ello puede inducir a que se pretenda que la sección del conductor en dichos tramos sea inferior a la utilizada en las cercanías de la fuente.

Para el cálculo en este caso debe plantearse qué relación de secciones se pretende a priori, y establecer unas longitudes ficticias que restablezcan la homogeneidad de la línea, de la forma siguiente:

Para ello supongamos que las secciones de los tramos A-2 y B-4 de la figura 16 los deseamos iguales de sección, sin embargo el tramo 2-4 de una sección inferior.

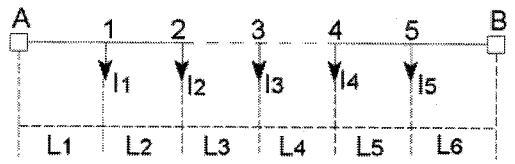


Figura 16.

Llamemos la sección de los tramos:

- A-2 y B-4: S

Llamemos la sección del tramo:

- 2-4: S'

Tendremos que S'/S = K, siendo K < 1.

La resistencia del tramo 2-3 será: $$R_{2-3} = \frac{1}{k}\frac{L_3}{S'} \quad (51)$$

La resistencia del tramo 3-4 será: $$R_{3-4} = \frac{1}{k}\frac{L_4}{S'} \quad (52)$$

Si queremos establecer ficticiamente la homogeneidad de la línea, hemos de hacerlo sin que varíe su resistencia ya que ésta influiría en el cálculo de la intensidad que circula por cada tramo. Ahora bien todo ello es posible si establecemos unas distancias L' ficticias sólo a efectos de cálculo de forma tal que se cumpla:

$$R_{2-3} = \frac{1}{K}\frac{L_3}{S'} = \frac{1}{K}\frac{L'_3}{S}$$
$$R_{3-4} = \frac{1}{K}\frac{L_4}{S'} = \frac{1}{K}\frac{L'_4}{S} \quad (53)$$

De donde:

$$L'_3 = L_3\frac{S}{S'}$$
$$L'_4 = L_4\frac{S}{S'} \quad (54)$$

Siendo el circuito establecido como se indica en la figura 17.

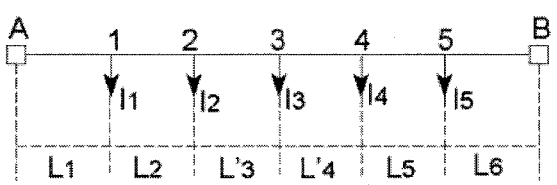


Figura 17

Debe tenerse presente que el cálculo de la sección así obtenida no será en general un valor normalizado y que habrá de tomarse el inmediato superior, sin embargo debido a la relación de secciones establecido a priori puede tomarse para el otro tramo la sección correspondiente a la normalizada inferior, si bien debe ser comprobado todo el cálculo con las secciones establecidas.

Por el contrario si se toma tanto para S como para S' la sección normalizada inmediata superior este cálculo no es necesario realizarlo de nuevo, aunque las circulaciones de intensidad no sean las correctas para esas secciones.

Cabe por último destacar que en caso de emergencia de que quede interrumpido la alimentación por uno de los lados, la densidad de corriente sea admisible para todos los tramos, si bien no se cumple la condición de caída de tensión admisible; ya que en caso contrario se deterioraría la conducción eléctrica.

En el caso de un circuito alimentado por ambos extremos y cuyas alimentaciones no sea de igual tensión. Este circuito no puede ser considerado con una topología en anillo como hemos expuesto anteriormente ya que las fuentes son distintas.

Supongamos que en el circuito de la figura 18 desaparezca la demanda de energía, es evidente de que no por ello deja de circular una determinada intensidad debido a que las tensiones de las fuentes no son iguales.

Por todo ello podemos establecer que la circulación de la intensidad es debida a dos causas, a saber:

- Diferencia de tensiones de las fuentes.
- Demanda de energía en puntos determinados.

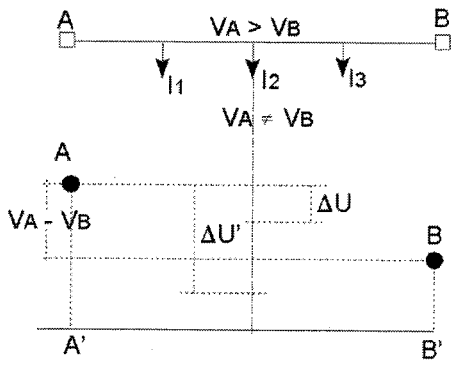


Figura 18. Fuentes con distinto nivel de tensión.

Así planteado el problema para el cálculo de la sección del conductor queda evidente que la determinación de los valores de la intensidad que circula por cada tramo, puede determinarse por un efecto de superposiciones de efectos parciales.

Sin embargo antes de proseguir este estudio es necesario hacer las siguientes observaciones en cuanto a la caída de tensión admisible (ΔU) y la diferencia de tensiones de las fuentes (V_A-V_B) siendo $V_A > V_B$.

Para ello vamos a representar, según figura 19, las tensiones referidas a un origen. AA' representa V_A y BB' representa V_B. La caída de tensión admisible ΔU sea referida respecto a la fuente de mayor tensión. Es evidente que si $\Delta U < (V_A-V_B)$ la fuente B no puede suministrar energía, ahora bien si $\Delta U > (V_A-V_B)$, la carga que tenga la caída de tensión establecida podrá recibir energía de la fuente B.

En el caso límite en que $\Delta U = (V_A-V_B)$ la fuente B ni suministrará ni absorberá energía.

Como hemos indicado anteriormente para el cálculo hemos de establecer la superposición de efectos de caída de tensión por los dos motivos enunciados anteriormente.

Sea $V_A > V_B$ y la sección que se desea calcular homogénea en todo su trayecto, o bien se establecerán las longitudes ficticias necesarias si es condición impuesta al circuito de que no lo sea.

Por otro lado tenemos: $\Delta U > (V_A-V_B)$. En la figura 19a siendo $V_A > V_B$ habrá una determinada intensidad que circula de A a B y que provocará una caída de tensión.

En un punto cualquiera entre A y B, situado por ejemplo a una distancia x de la fuente B la expresión de la caída de tensión será:

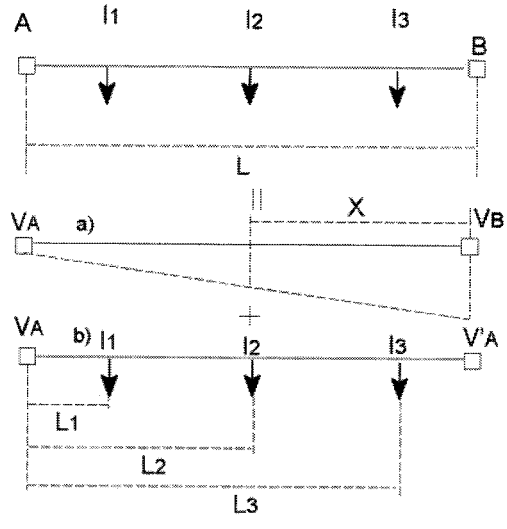


Figura 19.

$$\left.\begin{array}{l} V_A - V_B \rightarrow L \\ \Delta U'_X \rightarrow L - X \end{array}\right\} \Delta U'_X = (V_A - V_B)\frac{L-X}{L} \qquad (55)$$

En la figura 18b nos encontramos con un problema ya conocido para el cual determinaremos la distribución de intensidades y así mismo cual es la carga que tiene mayor caída de tensión. Supongamos que ésta se produzca para I_2. La expresión de la caída de tensión será (corriente continua) (V_A=V'_A):

$$\Delta U' = \frac{2}{K \cdot S}\left[I'_A (L - L_3) + (I'_A - I_3)(L_3 - L_2)\right] \qquad (56)$$

La caída total de tensión vendrá expresada por:

$$\Delta U = (V_A - V_B)\frac{L_2}{L} + \frac{2}{K \cdot S}\left[I'_A (L - L_3) + (I'_A - I_3)(L_3 - L_2)\right] \qquad (57)$$

En esta fórmula, definido el valor admisible de ΔU, permite determinar la sección del conductor, siempre y cuando se mantenga que el punto sumente de intensidad establecido para las dos fuentes a igual tensión permanezca invariable posicionalmente, cuando se determine la intensidad real que circula por el circuito.

- **Ejemplo1:**

Las fuentes A y B generan a la misma tensión. La caída de tensión máxima admisible se establece en 10 V.

Calcular la sección del conductor y comentarla.

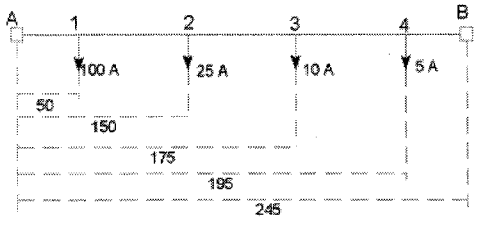


Figura 20.

- Cálculo de la intensidad suministrada por la fuente B:

Tomando momentos eléctricos respecto a la fuente A tendremos:

$$I_B \cdot 245 = 50 \cdot 100 + 150 \cdot 25 + 175 \cdot 10 + 195 \cdot 5$$

$$I_B = \frac{11475}{245} = 46.84 \text{ A.}$$

Las intensidades que circulan por los tramos, su cálculo es inmediato.

B ⇒ 4;	46.84 A.
4 ⇒ 3;	46.84 - 5 = 41.84 A.
3 ⇒ 2;	41.84 - 10 = 31.84 A.
2 ⇒ 1;	31.84 - 25 = 6.84 A.
1 ⇒ A;	6.84 - 100 = -93.16 A.

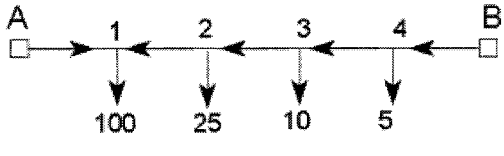


Figura 21.

Luego, la caída de tensión máxima se producirá en la carga 1, y la sección del conductor vendrá dada por:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot 50 \cdot 93.16}{56 \cdot S} = 10 \text{ V}; \; S = 16.63 \text{mm}^2$$

Debiéndose tomar la sección normalizada de 25 mm² cuya intensidad máxima admisible para montaje al aire cable unipolar Sintenax es de 96 A.

Esta alimentación de cargas no es aconsejable ya que existe una de ellas muy dispar a las otras. El circuito establecido con la carga de 100 A alimentada directamente de la fuente A tiene menor coste, si bien, no asegura el servicio con la misma fiabilidad.

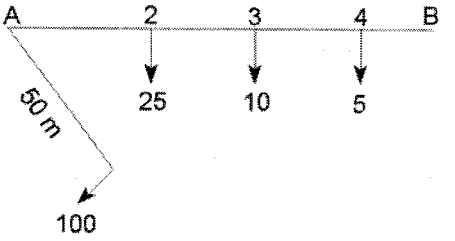


Figura 22.

- **Ejemplo 2:**

La fuente A genera a 220 V D.C. y la fuente B genera a 215 V D.C.

La caída máxima permitida es de 10 V, respecto a la tensión de la fuente que genera a más tensión.

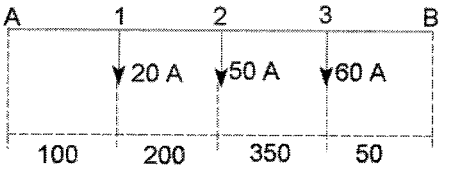


Figura 23.

Para que suministre energía la fuente B debe cumplirse:

$$\Delta U > V_A - V_B$$
$$10 > 220 - 215 \text{ V}$$

Determinaremos en primer lugar la circulación de las intensidades para ambas fuentes a igual tensión.

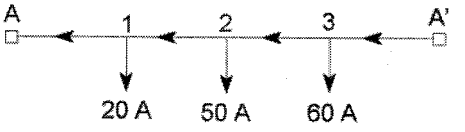


Figura 24.

La fuente A' suministrará una intensidad dada por (Tómese momentos respecto a A):

$$I_{A'} \cdot 700 = 100 \cdot 20 + 300 \cdot 50 + 650 \cdot 60 \; ; \; I_{A'} = 80 \text{ A}$$

Las intensidades que circulan por los tramos serán:

A' ⇒ 3: 80 A.
3 ⇒ 2: 20 A.
2 ⇒ 1: - 30 A.
1 ⇒ A: - 50 A.

Luego la carga 2 tiene la caída parcial de tensión máxima. Por aplicación de la fórmula hallada tendremos:

$$\Delta U = 10 = (220 - 215)\frac{300}{700} + \frac{2}{56 \cdot S}[80 \cdot 50 + 20 \cdot 350]$$

$$S = \frac{2}{56} \cdot 11000 \; \frac{7}{55} = 50 \text{ mm}^2$$

La sección normalizada es de 50 mm² cuya intensidad máxima es de 145 A en condiciones idénticas que el ejemplo anterior.

Conozcamos la circulación real de intensidad, procedamos a efectuar las superposiciones de las dos figuras.

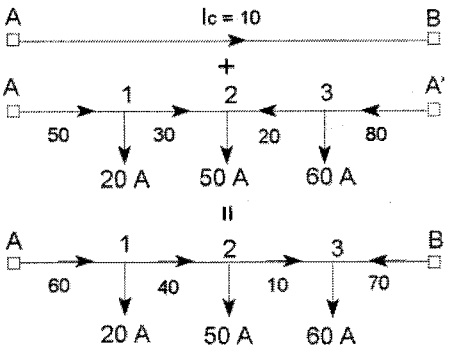


Figura 26.

Intensidad de circulación, sin las cargas:

$$5 = I_C R = I_C \frac{1}{56}\frac{2 \cdot 700}{50}; \quad I_C = 10 \text{ A.}$$

Superponiendo llegamos al último estado, sin modificarse el lugar que ocupa el punto sumente de intensidad.

Comprobemos:

Caída de tensión desde A a 2 y desde B a 2.

$$\Delta U_A = \frac{2}{56 \cdot 50}[60 \cdot 100 + 40 \cdot 200] = \frac{2}{56 \cdot 50} \cdot 14000 = 10 \text{ V.}$$

$$\Delta U_B = \frac{2}{56 \cdot 50}[70 \cdot 50 + 10 \cdot 350] = \frac{2}{56 \cdot 50} \cdot 7000 = 5 \text{ V.}$$

- **Ejemplo 3:**

La fuente A genera a 220 V D.C. y la fuente B genera a 215 V D.C.

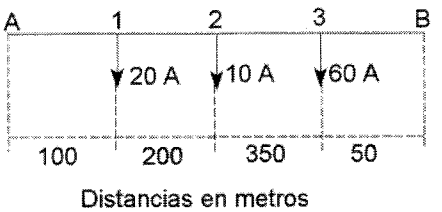


Figura 29.

La caída máxima permitida es de 10 V respecto a la tensión de la fuente que genera a más tensión.

Para que la fuente B suministre energía se cumple también en este caso que $\Delta U > (V_A - V_B)$; 10 > 200 - 215 V.

Determinaremos en primer lugar la distribución de intensidades para fuentes a igual tensión ($V_A = V_{A'}$):

$$I_{A'} \cdot 700 = 100 \cdot 20 + 300 \cdot 10 + 650 \cdot 60; \; I_{A'} = 6285 \text{ A}$$

El punto sumente de intensidad es 2, si superponemos la intensidad de circulación y sigue siendo el punto 2 sumente el problema quedaría resuelto. Veamos este caso:

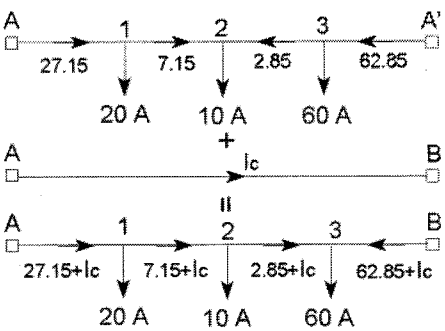


Figura 30.

Para que el punto sumente siga permaneciendo en 2 el valor de I_C no puede ser mayor de 2.85 A.

Expresiones que pueden plantearse:

Resistencia de la red: $R = \frac{2 * 700}{56 * S}$

Intensidad de circulación: $220\text{-}215 = I_c\ R = 5$

Caída de tensión en 2:

$$5 = (62.85 - I_c)\frac{2 \cdot 50}{56 \cdot S} + (2.85 - I_c)\frac{2 \cdot 350}{56 \cdot S}$$

$$I_c = \frac{S}{5}$$

Obtenemos para:

$$S = \frac{8280}{440} = 18.81\ mm^2$$

$$I_c = \frac{18.81}{5} = 3.76\ A > 2.85\ A.$$

De ello deducimos que el punto 2 no es sumente, siendo posible el punto 3, procedamos pues al cálculo para este último.

$$\left.\begin{array}{r} R = \dfrac{2 \cdot 700}{56 \cdot S} \\ 220 - 215 = I_c \cdot R = 5 \\ 5 = (62.85 - I_c)\dfrac{2 \cdot 50}{56 \cdot S} \end{array}\right\}$$ Obteniendo:

$$S = \frac{6285}{300} = 20.95\ mm^2$$

$$I_c = \frac{20.95}{5} = 4.19\ A.$$

Luego la circulación real de intensidad será:

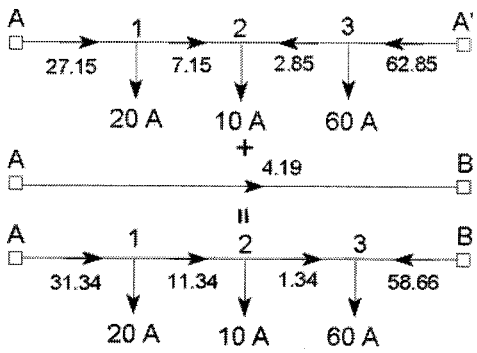


Figura 31.

Comprobación:

Caída de tensión de B a 3 $\Rightarrow$ $\Delta U = \dfrac{2 \cdot 50 \cdot 58.66}{56 \cdot 20.95} = 5\ V.$

Caída de tensión de A a 3 $\Rightarrow$ $\Delta U = \dfrac{2}{56 \cdot 20.95}[100 \cdot 31.34 + 200 \cdot 11.34 + 350 \cdot 1.34] = 10\ V.$

3.6.- Red mallada alimentada en determinados nudos.

Supongamos una red mallada en que todos los nudos de la misma se encuentran alimentados por una fuente, que generan a la misma tensión según queda establecido en la figura 32. Los centros de alimentación por lo tanto serán S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 y S_6.

Dada esta topología para el circuito en general, cada rama es independiente por sí misma, ya que se encuentra alimentada por sus dos extremos. La determinación de la sección es un problema estudiado anteriormente.

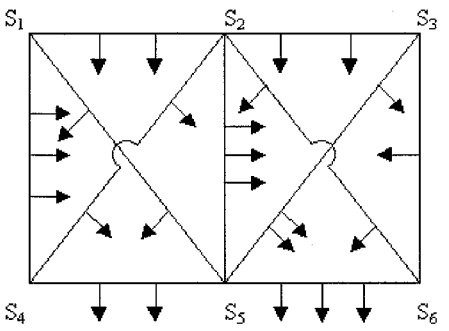


Figura 32. Red mallada alimentada en todos los nudos.

Cabe destacar que existen tantos puntos donde se produce la máxima caída de tensión como ramas independientes establece el circuito. Así mismo al quedar las fuentes conectadas en paralelo entre sí mediante las ramas del circuito, es conveniente considerar que las fuentes en una primera aproximación son capaces de suministrar una potencia infinita (U_n=cte).

Sea la red mallada de la figura 33 donde no todos los nudos alimentados por una fuente de energía. Este es el caso representado en la figura, en la cual hemos designado por la letra S genéricamente las fuentes de alimentación. (Subestaciones) y por las restantes letras propiamente nudos sin alimentar (A y B).

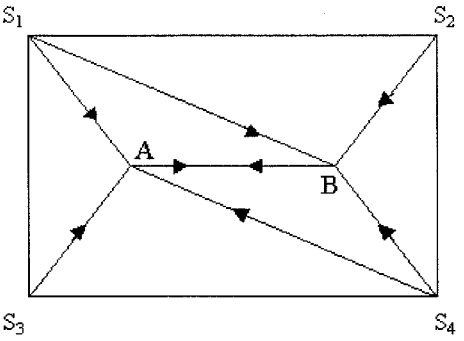


Figura 33. Red mallada alimentada en ciertos nudos.

Pretendemos demostrar que en la rama A-B podemos hacer la sustitución de todas las cargas a ella conectadas por dos cargas resultantes cuyo valor dependerá del lugar en que las cargas respecto al conjunto del circuito.

Para ello aislemos la rama A-B del resto de la red mallada, manteniendo sus condiciones como queda representado en la figura 34.

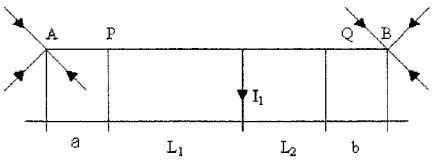


Figura 34. Reducción de una carga a los nudos extremos.

Consideremos una carga solamente de valor I_1, lo cual no quita generalidad a la demostración como podrá comprobarse.

Decimos que puesta una carga en P de valor $I_P=L_2I_1/(L_1+L_2)$ y otra en Q de valor $I_Q=L_1I_1/(L_1+L_2)$ en sustitución de la carga I_1, no se altera el centro de gravedad de las cargas establecidas en la rama A-B.

Para ello tomemos momentos desde A y B bien sea de la carga I_1 y de sus equivalentes, antes expresados, para determinar las alimentaciones desde el nudo A y nudo B.

Para I_1:

$$I_A(a+L_1+L_2+b) = I_1(L_2+b)$$
$$I_B(a+L_1+L_2+b) = I_1(L_1+a)$$
$$I_A = \frac{I_1(L_2+b)}{a+L_1+L_2+b} \; ; \; I_B = \frac{I_1(L_1+a)}{a+L_1+L_2+b} \qquad (58)$$

Para los valores de P y Q:

$$\left.\begin{aligned} I_A(a+L_1+L_2+b) &= \frac{L_2I_1}{L_1+L_2}(L_1+L_2+b) + \frac{L_1I_1}{L_1+L_2}(b) \\ I_B(a+L_1+L_2+b) &= \frac{L_2I_1}{L_1+L_2}(a) + \frac{L_1I_1}{L_1+L_2}(L_1+L_2+a) \end{aligned}\right\} \text{Operando en 2° miembro} \qquad (59)$$

$$\begin{aligned} \frac{L_2I_1}{L_1+L_2}(L_1+L_2) + \frac{L_2I_1b}{L_1+L_2} + \frac{L_1I_1b}{L_1+L_2} &= L_2I_1 + \frac{I_1b(L_1+L_2)}{L_1+L_2} = I_1(L_2+b) \\ \frac{L_2I_1a}{L_1+L_2} + \frac{L_1I_1(L_1+L_2)}{L_1+L_2} + \frac{L_1I_1a}{L_1+L_2} &= L_1I_1 + \frac{I_1a(L_1+L_2)}{L_1+L_2} = I_1(L_1+a) \end{aligned} \qquad (60)$$

Si los valores de «a» y «b» son nulos, los puntos P y Q se confunden con los nudos A y B, y las expresiones de las cargas que sustituyen a I_1 serán:

$$I_A = \frac{I_1L_2}{L_1+L_2} \qquad I_B = \frac{I_1L_1}{L_1+L_2} \qquad (61)$$

La generalización es evidente: Todas las cargas situadas en una rama pueden ser trasladadas a sus extremos o nudos siendo los valores a establecer en los siguientes:

$$\text{En nudo A} : \frac{\left[\sum_{n=1}^{n=n} L_nI_n\right]_{\text{Momento respecto a B}}}{\sum_{n=1}^{n=n} L_n}$$

$$\text{En nudo B} : \frac{\left[\sum_{n=1}^{n=n} L_nI_n\right]_{\text{Momento respecto a A}}}{\sum_{n=1}^{n=n} L_n} \qquad (62)$$

Así pues, ello nos permite sin alterar el centro de gravedad de las cargas, concentrar estas en los nudos con plena generalización, es decir, con independencia de que este nudo sea fuente de alimentación o no.

Conocida pues todas las cargas correspondientes a los nudos en general, aquellos nudos que no son fuentes de energía deberán recibirla de los nudos que lo son. Ello permite establecer para las fuentes de alimentación dos funciones en el circuito a saber:

- Dar las intensidades que le corresponde como tal nudo.
- Alimentar las cargas de los nudos que no son fuentes.

Todo ello nos conduce al conocimiento de las intensidades que suministran las fuentes como superposición de los dos hechos anteriores, y en consecuencia la circulación de intensidades en todas las ramas.

En general pueden existir diversas cargas en una red mallada que se alimenten por dos o más ramas, cuyas cargas presentan en esa rama o nudo una caída de tensión que no tiene por qué ser la caída máxima en el circuito. Por ello hay que determinar la caída de tensión para todas estas cargas, o «centros sumentes» de intensidad, pues una de ellas representa el valor más desfavorable de toda la red mallada.

Hemos indicado como meta inmediata en el cálculo de la red, el conocimiento de la circulación de intensidades, no olvidemos que ésta depende, si la sección no es homogénea, propiamente de la relación de secciones establecidas y la caída de tensión a su vez es inversamente proporcional a la sección.

- **Ejemplo:**

Figura .

S_1, S_2 y S_3 son fuentes de alimentación en corriente continua de igual tensión.

$U_{MAX=}$10 V.

Establecemos que para los tres ramales la sección sea idéntica, como primer caso.

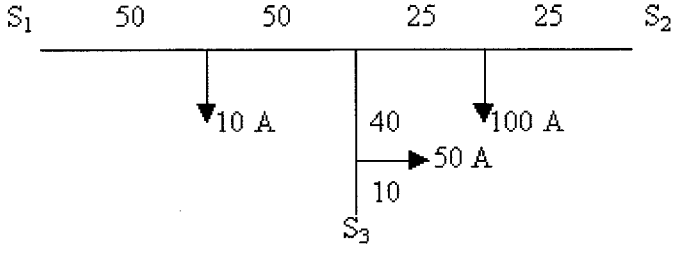


Figura 35.

- Pasos:

1º) Determinación o reducción de las cargas a los nudos.

Así tendremos:

I_{S1}=50x10/100=5A I_{AS1}=50x10/100=5A

I_{S2}=25x10/50=50A I_{AS2}=25x100/50=50A

I_{S3}=40x50/50=40A I_{AS3}=50x10/50=10A

Luego el circuito quedaría resuelto en cuanto a la circulación de intensidad por la siguiente superposición:

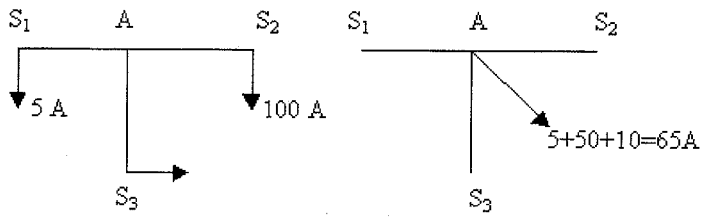


Figura 36.

Resolvamos la parte de la derecha de la figura 36, siendo la sección homogénea y estableciendo igual caída:

$$\left.\begin{array}{l} I'_{S1}100 = I'_{S2}50 = I'_{S3}50 \\ I'_{S1}+I'_{S2}+I'_{S3} = 65\,A \end{array}\right\} \begin{array}{l} I'_{S1}+2I'_{S1}+2S'_{S1} = 65 \quad I'_{S1} = 13\,A \\ I'_{S2} = I'_{S3} = 26\,A \end{array}$$

Por lo tanto deducimos que de la fuente S_1 tendrá que salir: 5 A para la carga de 10 A más 13 A como aportación de esta fuente al nudo A, recibiendo neto el nudo A.

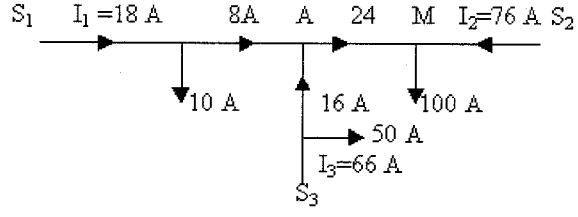


Figura 37.

Para las restantes ramas se procede de igual forma:

$$I_2 = 50+26 = 76A \quad I_3 = 40+26 = 66A$$

El punto M es el único sumente de intensidad, luego en éste existirá la máxima caída de tensión.

Siendo ΔU = 10 V tendremos:

$$S = \frac{1}{56} x \frac{2x25x76}{10} = 6.78\,mm^2$$

Intensidades máximas consideradas. Conductor 1000V, Sintenax al aire:

- 1.5 mm² = 16 A
- 2.5 mm² = 22 A
- 4 mm² = 30 A
- 6 mm² = 38 A
- 10 mm² = 53 A
- 16 mm² = 71 A
- 25 mm² = 96 A
- 50 mm² = 145 A

Considerando que la sección normalizada es de 10 mm². Este conductor establecido en iguales condiciones que en apartados anteriores, admite como carga máxima solamente 52 A, por cuyo motivo hemos de establecer una sección de 25 mm² que admite como máximo 96 A.

Si establecemos esta sección es evidente que la rama S_1A trabajaría con una densidad muy baja por lo que puede pensarse disminuir la sección de esta rama protegiéndola convenientemente en caso de fallo de la alimentación por S_2 y S_3 mediante fusibles calibrados en S_1.

Tomemos pues como relación de secciones las siguientes:

$$\frac{S_{S_1A}}{1} = \frac{S_{S_2A}}{5} = \frac{S_{S_3A}}{2}$$

La determinación o reducción de las cargas a los nudos no sufrirá alteración ya que su calculo se efectúa por ramas y dentro de ellas no hemos alterado la sección.

Establezcamos pues las nuevas longitudes ficticias de las ramas al no ser todas las secciones iguales.

Como expusimos en el apartado anterior las resistencias de las ramas no han de sufrir alteraciones ya que implicaría unas alimentaciones distintas por parte de las fuentes a la carga establecida en el nudo A.

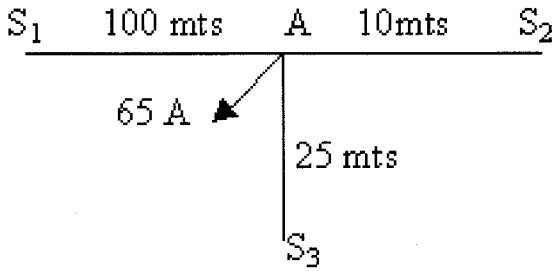


Figura 38.

Las nuevas longitudes ficticias de las ramas vendrían dadas por:

$$R_{S_2A} = \frac{1}{K}\frac{50}{S_{S_2A}} = \frac{1}{K}\frac{l'_{S_2A}}{S_{S_1A}} \qquad l'_{S_2A} = 50\frac{S_{S_1A}}{S_{S_2A}} = 50\frac{1}{5} = 10m$$

$$R_{S_3A} = \frac{1}{K}\frac{50}{S_{S_3A}} = \frac{1}{K}\frac{l'_{S_3A}}{S_{S_1A}} \qquad l'_{S_3A} = 50\frac{S_{S_1A}}{S_{S_3A}} = 50\frac{1}{2} = 25m$$

Expresando las caídas de tensiones:

$$I'_{S1}100 = I'_{S2}10 = I'_{S3}25 \qquad I'_{S1} = \frac{13}{3} = 4.33A \qquad I'_{S2} = \frac{130}{3} = 43.33A$$

$$I'_{S1} + I'_{S2} + I'_{S3} = 65 \qquad I'_{S3} = \frac{52}{3} = 17.33A$$

Luego la fuente S_1 suministrará: 4.33 + 5 = 9.33 A

Luego la fuente S_2 suministrará: 43.33 + 50 = 93.33 A

Luego la fuente S_3 suministrará: 17.33 + 40 = 57.33 A

Estos valores hallados nos permiten establecer las intensidades que circulan por cada tramo y determinar los puntos de posible máxima caída de tensión.

Como puede observarse en este caso existen dos puntos M y N sumentes de intensidad.

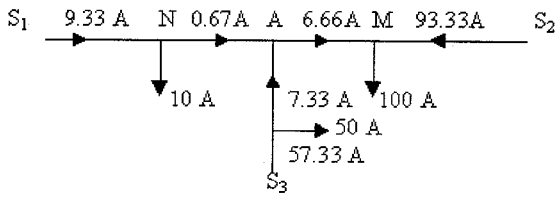


Figura 39.

Cálculo de las secciones de los conductores:

$$S_{2A} = \frac{1}{56}\frac{2x25x93.33}{10} = 8.33\,mm^2$$

$$S_{1A} = \frac{S_{2A}}{5} = \frac{8.33}{5} = 1.66\,mm^2$$

$$S_{3A} = \frac{2S_{2A}}{5} = \frac{2x8.33}{5} = 3.33\,mm^2$$

- Caída de tensión en N:

$$\Delta U_N = \frac{1}{56}\frac{2x9.33x50}{1.66} = 10\ V$$

- Caída de tensión en M:

$$\Delta U_M = \frac{1}{56}\frac{2x9.33x25}{8.33} = 10\ V$$

Los puntos M y N tienen en este caso igual caída de tensión.

La sección hallada para S_2A no es admisible desde el punto de vista de la intensidad que debe circular por la misma. Una sección de 25 mm², admite como máximo 96 A, y es la mínima que puede utilizarse.

Tomada para S_2A una sección de 25 mm², las restantes valdrán:

$$S_{S_1A} = \frac{25}{5} = 5mm^2 \qquad S_{S_3A} = \frac{2}{5}x25 = 10mm^2$$

Las secciones normalizadas serán para S_{S1A} = 6 mm² y S_{S3A} = 16 mm² y cuyas intensidades máximas admisibles son: 38 A y 71 A (para 10 mm² I_{MAX}= 53 A).

Así pues vemos que este circuito está determinado por densidad de corriente y no por caída de tensión. El reparto siguiendo las secciones normalizadas sería:

S_{S1A}= 6 mm²
S_{S2A} = 25 mm²
S_{S3A} = 16 mm²

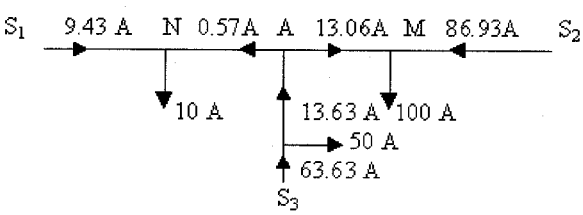


Figura 40.

Estableciendo directamente las igualdades de caída de tensión en el nudo A:

$$I''_{S1}\frac{100}{6}=I''_{S2}\frac{50}{25}=I''_{S3}\frac{50}{16}$$
$$I''_{S1}+I''_{S2}+I''_{S3}=65A$$

Resolviendo obtenemos:

$$I''_{S1}=\frac{195}{44}=4.43A\ ;\ I''_{S2}=\frac{1625}{44}=36.93A\ ;\ I''_{S3}=\frac{1040}{44}=23.63A$$

Luego la fuente S_1 suministrará: 4.43 + 5 = 9.43 A
Luego la fuente S_2 suministrará: 36.93 + 50 = 86.93 A
Luego la fuente S_3 suministrará: 23.63 + 40 = 63.63 A

Las caídas máximas de tensión serán:

Punto M:

$$\Delta U = \frac{1}{56}\text{x}\frac{2\text{x}25\text{x}86.93}{25} = 3.1\ \text{V}$$

Punto N:

$$\Delta U = \frac{1}{56}\text{x}\frac{2\text{x}50\text{x}9.43}{6} = 2.8\ \text{V}$$

De este ejemplo se deduce la gran importancia de establecer a priori unas secciones lo más racionales posibles.

La generalización del método para resolver redes malladas alimentadas en determinados nudos puede analizarse mediante el siguiente proceso:

1- Establecer en los nudos las cargas equivalentes correspondientes a todas las ramas las cuales en toda su longitud normalmente se considera su sección homogénea, si bien ello no quiere decir que todas las ramas sean de igual sección.
2- Reducción a una misma sección todas las ramas, tomando como base la sección que sea más repetitiva, a fin de que la resistencia de cada rama sea función solamente de su longitud. Las secciones se establecerán por asentimiento según los valores de las cargas. Así pues, habrá de calcularse la longitud ficticia de cada rama equivalente a la sección base.
3- Reducción del circuito por asociación de ramas. Cálculo de la carga por la rama equivalente. Reparto de las cargas por las ramas por disociación de las mismas.
4- Diagrama de cargas por rama incidentes en los nudos.
5- Diagrama de cargas por reparto de las cargas a los nudos.
6- Superposición de ambos diagramas y determinación de los puntos sumentes de intensidad.

El tercer punto anterior establece la alimentación que reciben los nudos por las diferentes ramas, de las fuentes de alimentación. Dado que los nudos fueron considerados independientemente uno de otros como fuentes de alimentación para las ramas que inciden en el nudo si superponemos ambos estados (Punto 4 y Punto 5) obtendremos las intensidades reales que pasan a las ramas desde los nudos.

Por ejemplo, en una línea de Cu de D.C. de 110 V con un caída máxima del 5 % de tensión, como regla práctica y dentro de una primera aproximación es conveniente estimar una sección de 1 mm²/A de carga total y 100 a 150 m de longitud de la rama. A la vista de los ejemplos siguientes se comprobará que la distancia debe ser al centro de gravedad de las cargas.

- **Ejemplo nº 1:**

Sea el circuito de la figura 41, con sus cargas correspondientes con una tensión de la red de 110 V. Las líneas serán de Cu. La caída máxima de tensión es de 5%.

Si consideramos el circuito dividido en dos zonas de influencia, una para la fuente S_1 y otra para la fuente S_2 y siendo las cargas no muy dispares, podemos establecer la frontera por la carga de 40 A de la rama (b) y a unos de 80 m del nudo I para la rama (c).

Así la carga total para la fuente S_1 sería aproximadamente:

30 + 50 + 20 + 40/2 + 60 = 180 A

y con una longitud de la carga más alejada de:

40 + 50 + 30 + 15 + 40 = 175 m

o bien:

40 + 50 + 30 +40 = 160 m

Para la fuente S_2 sería aproximadamente:

30 +60 +35 + 40/2 +50 = 195 A

y con una longitud de la carga más alejada de:

60 + 30 + 10 + 25 +50 = 175 m

o bien:

60 + 30 + 10 + 60 = 160 m

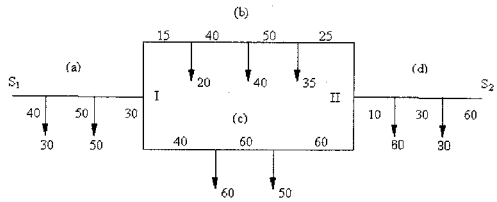


Figura 41.

A la vista de estas comparaciones tomaremos para la rama (a) y (d) 185 mm² y para (b) y (c) la mitad aproximadamente ,70 mm², ya que pueden ser consideradas como bifurcaciones de (a) o bien de (d).

- **Punto nº 1:**

Carga total incidente en el nudo I):

$$I_{Ia} = \frac{40x30+90x50}{120} = 47.5\,A$$

$$I_{Ib} = \frac{25x35+75x40+115x20}{130} = 47.5\,A$$

$$I_{Ic} = \frac{60x50+120x60}{160} = 63.75A$$

$$\sum I_I = 47.5+47.5+63.75 = 158.75\,A$$

Carga total incidente en el nudo II):

$$I_{IId} = \frac{60x30+90x50}{100} = 72A$$

$$I_{IIb} = \frac{15x20+55x40+105x35}{130} = 47.5A$$

$$I_{IIc} = \frac{40x60+100x50}{160} = 46.25A$$

$$\sum I_{II} = 72+47.5+46.25 = 165.75A$$

- Punto nº 2:

Reducción a la sección de 185 mm²:

$$1'_b = 130 \cdot \frac{185}{70} = 343.57m$$

$$1'_c = 160 \cdot \frac{185}{70} = 422.85m$$

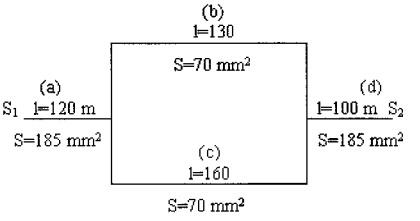


Figura 42.

- Punto nº 3 :

Asociación de las ramas (b) y (c):

$$L.Equiv. = \frac{343.57x422.85}{343.57+422.85} = 189.55m$$

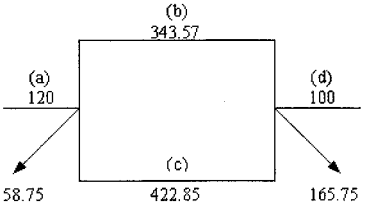


Figura 43.

Intensidad que circula por la rama (a):

$$I_{S_1a} = \frac{165.75x100+158.75x289.55}{120+189.55+100} = 152.71A$$

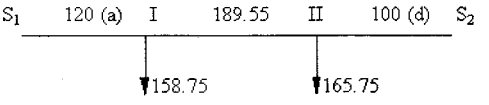


Figura 44.

Intensidad que circula por la rama (I-II): 152.71 - 158.75 = - 6.04 A

Intensidad que circula por la rama (d): 165.75 + 6.04 = 171.79 A

Intensidad que circula por la rama (b):

$$I_{(b)} = \frac{189.55x6.0\ 4}{343.57} = 3.33A$$

Intensidad que circula por la rama (c):

$$I_{(c)} = 6.04-3.33 = 2.71A$$

- Punto nº 4:

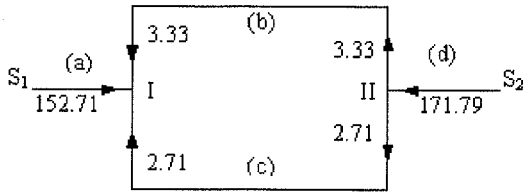


Figura 45.

- Punto nº 5:

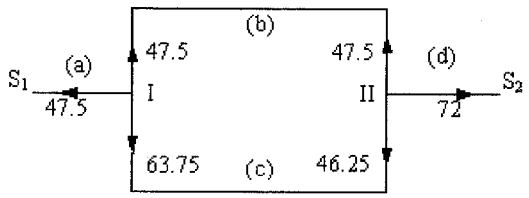


Figura 46.

- Punto nº 6:

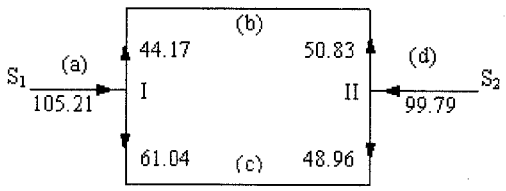


Figura 47.

Así pues, la circulación de intensidades por cada tramo será:

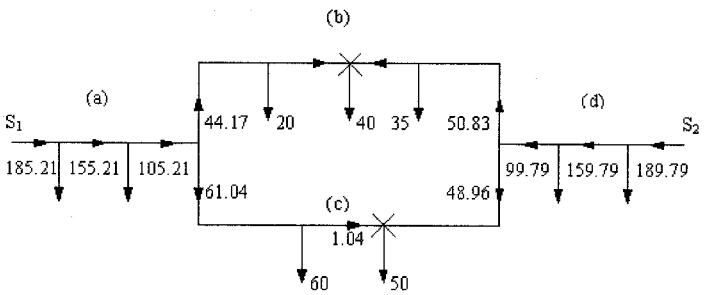


Figura 48.

En la rama (b) y (c) se producen dos puntos sumentes de intensidad. Calculemos sus caídas de tensión, considerando corriente continua:

$$\Delta U_{S_1(b)} = \frac{2}{56x185}(185.21x40+155.21x50+105.21x30)+\frac{2}{56x70}(44.17x15+24.17x40)$$

$$\Delta U_{S_1(b)} = 4.368V$$

$$\Delta U_{S_1(c)} = \frac{2}{56x185}(185.21x40+155.21x50+105.21x30)+\frac{2}{56x70}(61.04x40+1.04x60)$$

$$\Delta U_{S_1(c)} = 4.815V$$

Las caídas de tensión en la rama (b) máxima, así como la caída de tensión en la rama (c) máxima no son iguales como ya se indicó anteriormente. Las intensidades máximas admisibles para cable sintenax unipolar, instalación al aire permiten los siguientes valores:

- Cable 185 mm² Carga máxima: 365 A
- Cable 70 mm² Carga máxima: 185 A

Si disminuimos las secciones a la mitad, las caídas de tensión se duplicarán, lo que nos permite establecer como sección las siguientes :

- Rama (a) y (d) sección 95 mm² Carga máxima: 235 A
- Rama (b) y (c) sección 35 mm² Carga máxima: 115 A

y el valor muy aproximado de la caída máxima será: 4.815x2 = 9.63 V que para una red supuesta a 220 V corriente continua está cerca del 5%.

- Ejemplo nº 2:

Sea el circuito de la figura 49, con sus cargas correspondientes. Se desea establecer unas secciones lógicas y determinar las caídas de tensión en los puntos más desfavorables.

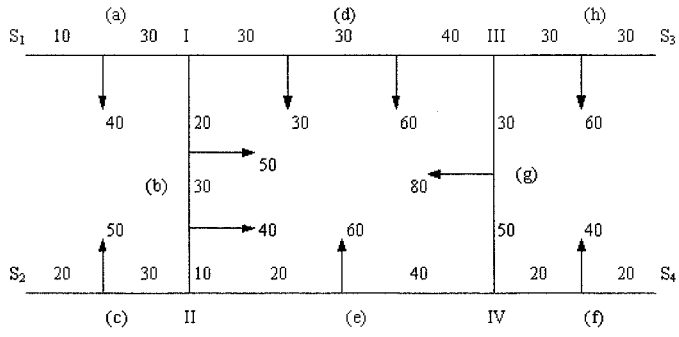


Figura 49.

- Punto nº 1:

Carga total incidente en el nudo I:

$$I_{Ia}=\frac{40x10}{40}=10A \quad I_{Ib}=\frac{10x40+40x50}{60}=40A \quad I_{Id}=\frac{40x60+70x30}{100}=45A$$

$$\sum I_I = 10+40+45=95A$$

Carga total incidente en el nudo II:

$$I_{IIc}=\frac{20x50}{50}=20A \quad I_{IIb}=\frac{20x50+50x40}{60}=50A \quad I_{IIe}=\frac{40x60}{60}=40A$$

$$\sum I_{II} = 20+50+40=110A$$

Carga total incidente en el nudo III:

$$I_{IIIh}=\frac{30x60}{60}=30A \quad I_{IIId}=\frac{30x30+60x60}{100}=45A \quad I_{IIIg}=\frac{50x80}{80}=50A$$

$$\sum I_{III} = 30+45+50=125A$$

Carga total incidente en el nudo IV:

$$I_{IVe}=\frac{20x60}{60}=20A \quad I_{IVg}=\frac{30x80}{80}=30A \quad I_{IVf}=\frac{20x40}{40}=20A$$

$$\sum I_{IV} = 20+30+20=70A$$

- Punto nº 2:

Considerando por ejemplo que la fuente S_2 suministra la carga 50 A de (c), 40 A de (b) y la mitad, 30 A de (e), tenemos como total un valor de 120 A y el centro de gravedad (C.G.) de estas cargas a una distancia de:

$$C.G. = \frac{20x50 + 60x40 + 70x30}{120} = 46m$$ es decir aproximadamente en el nudo II.

Según la regla práctica definida anteriormente deberíamos tomar del orden de 60 mm² para la rama (c), establezcamos esta de 70 mm² así como la (a), (h) y (f). Para las ramas (b), (d), (g) y (e) considerando estas como bifurcación de las ramas anteriores a partir de los correspondientes nudos la sección de 35 mm².

Reducción a la sección de 70 mm²:

$$l'_d = 100\frac{70}{35} = 200m \quad l'_g = 80\frac{70}{35} = 160m$$

$$l'_e = 60\frac{70}{35} = 120 \quad l'_b = 60\frac{70}{35} = 120m$$

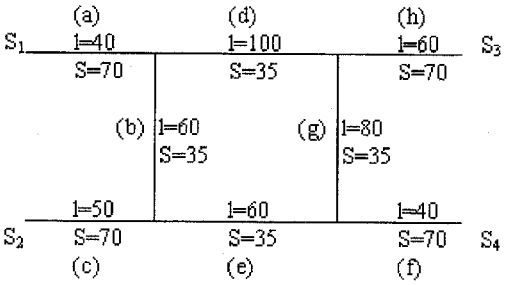


Figura 50.

- Punto nº 3:

Establezcamos pues con los datos anteriores, el esquema de sección homogénea con las correspondientes cargas en los nudos para determinar, como éstas son alimentadas por parte de las fuentes S_1, S_2, S_3 y S_4.

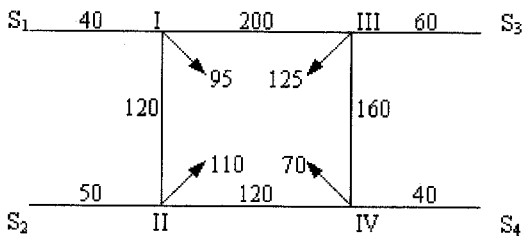


Figura 51.

Este circuito puede ser representado uniendo los puntos S_1 y S_2 así como S_3 y S_4, formándose un triángulo cuya topología puede ser cambiada por una estrella según las fórmulas dadas en la expresión (63):

$$n = \frac{a \cdot b}{a+b+c} \quad m = \frac{a \cdot c}{a+b+c} \quad p = \frac{c \cdot b}{a+b+c} \quad (63)$$

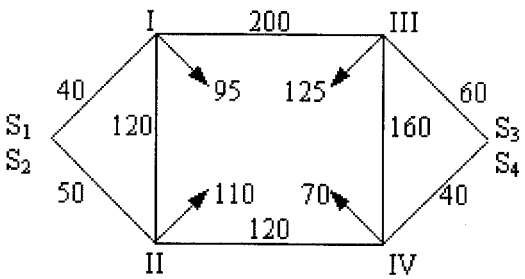


Figura 52.

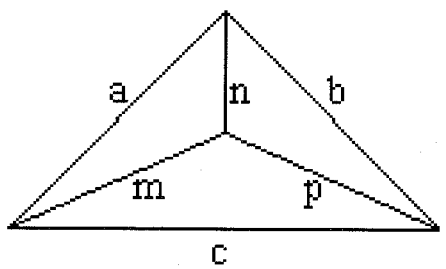


Figura 53.

Aplicando las fórmulas anteriores:

$$OS_1 = \frac{40x50}{210} = \frac{200}{21} \qquad OI = \frac{120x40}{210} = \frac{160}{7}$$

$$OII = \frac{50x120}{210} = \frac{200}{7} \qquad O'S_3 = \frac{60x40}{260} = \frac{120}{13}$$

$$O'III = \frac{160x60}{260} = \frac{480}{13} \qquad O'IV = \frac{160x40}{260} = \frac{320}{13}$$

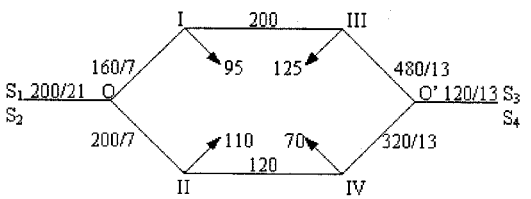


Figura 54.

Traspasemos las cargas de los nudos I y III así como II y IV a los nuevos nudos O y O', así tendremos:

$$I_{O(I,III)} = \frac{\frac{480}{13}x125 + \left(\frac{480}{13} + 200\right)x95}{\frac{160}{7} + 200 + \frac{480}{13}} = \frac{61705}{591} = 104.4A$$

$$I_{O'(I,III)} = \frac{\frac{160}{7}x95 + \left(\frac{160}{7} + 200\right)x125}{\frac{160}{7} + 200 + \frac{480}{13}} = \frac{68315}{591} = 115.6A$$

$$I_{O(II,IV)} = \frac{\frac{320}{13}x70 + \left(\frac{320}{13} + 120\right)x110}{\frac{320}{13} + 120 + \frac{200}{7}} = \frac{20055}{197} = 101.8A$$

$$I_{O'(II,IV)} = \frac{\frac{200}{7}x110 + \left(\frac{200}{7} + 120\right)x70}{\frac{320}{13} + 120 + \frac{200}{7}} = \frac{15405}{197} = 78.2A$$

$$\sum I_O = 104.4 + 101.8 = 206.2A$$

$$\sum I_{O'} = 115.6 + 78.2 = 193.8A$$

$$\overline{OO'}_{(I,III)} = \frac{160}{7} + 200 + \frac{480}{13} = \frac{23640}{91} = 259.78m$$

$$\overline{OO'}_{(II,IV)} = \frac{320}{13} + 120 + \frac{200}{7} = \frac{15760}{91} = 173.18m$$

Luego según estos valores quedará reducido a la figura 55:

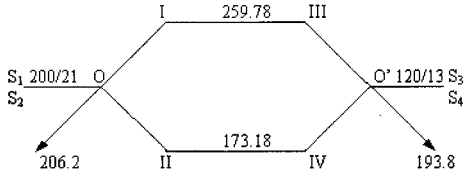


Figura 55.

Reduciendo las ramas en paralelo:

$$\text{Reducida de } OO' = \frac{259.78x173.18}{259.78 + 173.18} = 103.9m$$

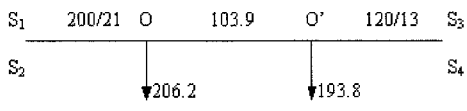


Figura 56.

$$I_{S_1S_2} = \frac{\frac{120}{13}x193.8 + \left(103.9 + \frac{120}{13}\right)x206.2}{\frac{200}{21} + 103.9 + \frac{120}{13}} = \frac{25116.487}{122.654} = 204.78A$$

$$I_{S_3S_4} = 2062+1938-20478=19522A$$

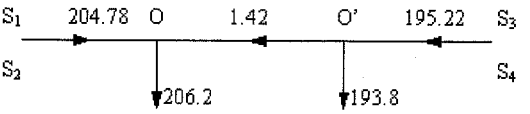


Figura 57.

Intensidades por las ramas:

$$I_{O\,II\,IV\,O'} = \frac{1.42*103.9}{173.18} = 0.852 \ \ A$$

$$I_{O\,I\,III\,O'} = \frac{1.42*103.9}{259.78} = 0.568 \ \ A$$

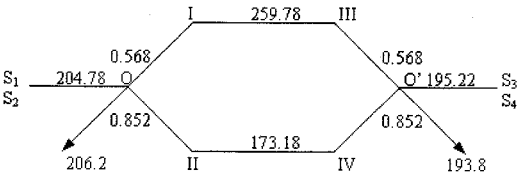


Figura 58.

Dado que reducimos las cargas de los nudos I, II, III y IV a O y O' procederemos a la superposición de los valores hallados con la descomposición de las cargas en O y O'.

El esquema resultante será:

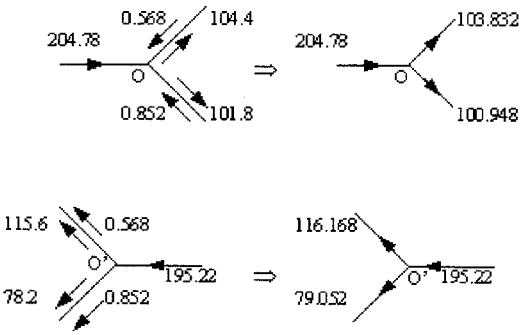


Figura 59.

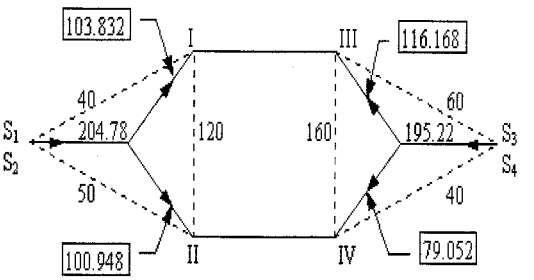


Figura 60.

Calculemos las intensidades que circulan por los triángulos:

$$I_{S_1S_2I} = \frac{204.78x\frac{200}{21} + 103.832x\frac{160}{7}}{40} = 108.09A$$

$$I_{III} = \frac{-103.832x\frac{160}{7} + 100.948x\frac{200}{7}}{120} = 4.258A$$

$$I_{S_3S_4IV} = \frac{195.22x\frac{120}{13} + 79.052x\frac{320}{13}}{40} = 93.7A$$

$$I_{S_1S_2II} = \frac{204.78x\frac{200}{21} + 100.948x\frac{200}{7}}{50} = 96.69A$$

$$I_{S_3S_4III} = \frac{195.22x\frac{120}{13} + 116.168x\frac{480}{13}}{60} = 101.52A$$

$$I_{IVIII} = \frac{116.168x\frac{480}{13} - 79.052x\frac{320}{13}}{160} = 14.648A$$

Luego podemos establecer el circuito de la figura 61:

La intensidad del nudo I al III será:

108.9 - 95 - 4.258 = 8.832 A

La intensidad del nudo II al IV será:

96.69+ 4.258 - 110 = - 9.052 A

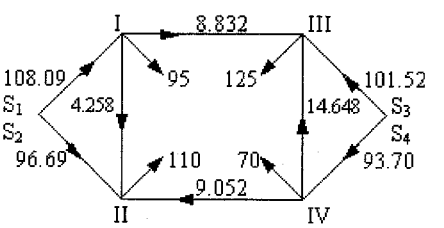


Figura 61.

- Punto nº 4:

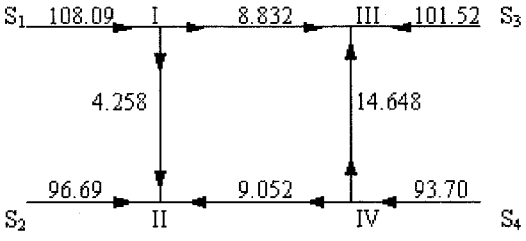


Figura 62.

- Punto nº 5:

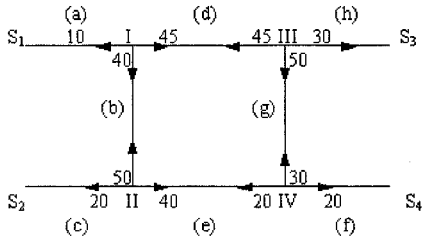


Figura 63.

- Punto nº 6:

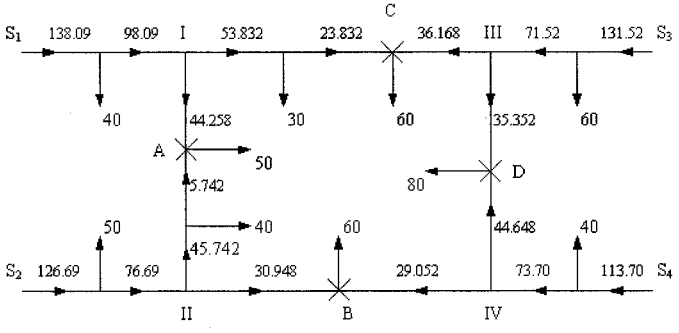


Figura 64.

Calculemos las caídas de tensiones en los puntos A,B,C y D en corriente continua:

$$\Delta U_A = \frac{2}{56x70}(126.69x20+76.69x30)+\frac{2}{56x35}(45.742x10+5.74x30)=3.109V$$

$$\Delta U_B = \frac{2}{56x70}(126.69x20+76.69x30)+\frac{2}{56x35}(30.948x20)=3.098V$$

$$\Delta U_C = \frac{2}{56x70}(131.52x30+71.52x30)+\frac{2}{56x35}(36.168x40)=4.584V$$

$$\Delta U_D = \frac{2}{56x70}(131.52x30+71.52x30)+\frac{2}{56x35}(35.352x30)=4.189V$$

$$I_{MAX}\left[70mm^2\right]=185\ A$$

$$I_{MAX}\left[35mm^2\right]=115\ A$$

Puede verse que no todos los puntos tienen igual caída, siendo el C el más desfavorable con 4.584 V. Luego los valores de las secciones tomadas fueron adecuados.

- El cable de 70 mm² admite una carga máxima de: 185 A.
- El cable de 35 mm² admite una carga máxima de: 115 A.

Como puede observarse la reducción del circuito por asociación de ramas, cuyos extremos se alimentan de fuentes de energía, para poder realizar la primera reducción y lograr llegar

a un circuito equivalente a una rama alimentada por sus extremos. De no lograr este propósito, debe calcularse la circulación de intensidades por el sistema de ecuaciones de nudo, tomando como incógnitas las tensiones de los nudos respecto a las fuentes de alimentación.

Ejemplos de composiciones de resistencias:

- **Ejemplo nº 1:**

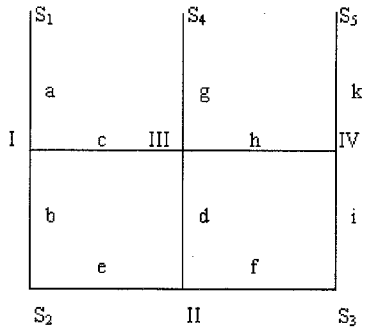
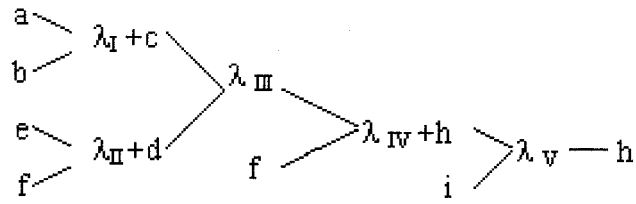


Figura 65.

Combinación de resistencias, por ejemplo:



S_n: Fuentes de alimentación.

- **Ejemplo nº 2:**

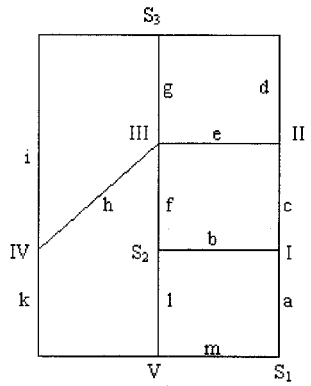
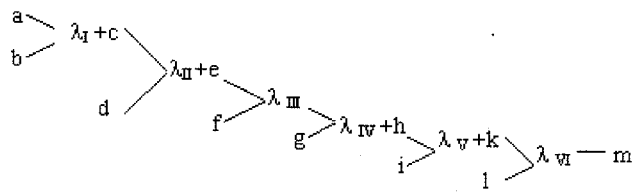


Figura 66.

Combinación de resistencias, por ejemplo:



S_n: Fuentes de alimentación.

- **Ejemplo nº 3:**

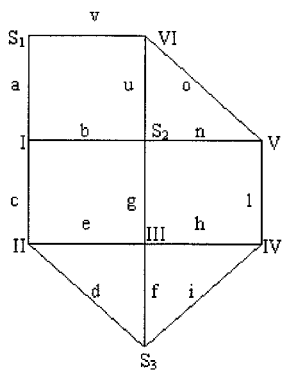
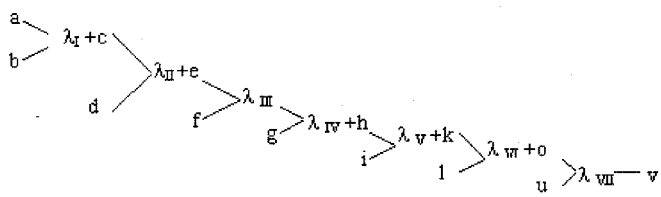


Figura 67.

Combinación de resistencias, por ejemplo:



S_n: Fuentes de alimentación.

Veamos un ejemplo básico que por su topología puede resolverse elementalmente:

Las fuentes de alimentación pueden ser desdobladas:

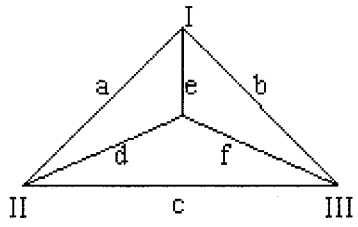


Figura 68.

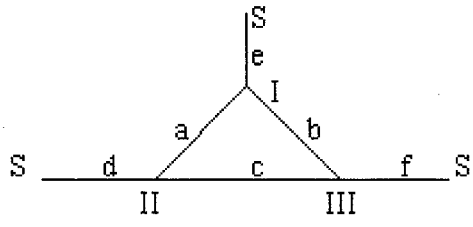


Figura 69.

y recíprocamente pueden ser unidas para formar triángulos, los cuales a su vez pueden ser sustituidas por estrellas, como ya se ha visto en un ejemplo anterior.

3.7.- Circuitos en árbol o mallados alimentados con fuentes alternas monofásicas.

Los elementos pasivos alimentados por corriente monofásica, no tienen en general un carácter resistivo puro, bien al contrario su definición de características son dadas por la potencia activa y el aprovechamiento (cos φ) de la potencia aparente puesta a su disposición. Todo ello expresado en las siguientes fórmulas:

$$P = U_n \cdot I_L \cdot \cos\varphi \text{ (Potencia activa); } S = U_n \cdot I_L \text{ (Potencia aparente)} \qquad (64)$$

La potencia reactiva consumida viene expresada por:

$$Q = U_n \cdot I_L \cdot \operatorname{sen}\varphi, \qquad (65)$$

cuya potencia es necesaria para realizar transformaciones electromecánicas de otro tipo tales como calentamientos por inducción, etc.. En consecuencia podemos decir que un elemento pasivo consume en general energía activa y energía reactiva.

Por todo ello en el circuito circulará una intensidad activa y una intensidad reactiva si bien la medible mediante un amperímetro únicamente es la aparente y existiendo la siguiente relación entre ellas:

$$(I_{APARENTE})^2 = (I_{ACTIVA})^2 + (I_{REACTIVA})^2 \qquad (66)$$

o bien que la suma vectorial de la intensidad activa con la intensidad reactiva (entre ellas en cuadratura) es igual a la intensidad aparente.

La resolución del circuito en general se apoya en el Teorema de Boucherot, el cual expresa la independencia que existe entre la energía activa y reactiva, es decir que en general el problema queda dividido en determinar las circulaciones de intensidad activa y de intensidad reactiva por separado, estableciéndose a posteriori la composición en cuadratura de los dos valores para determinar la intensidad aparente que circula.

Es obvio que procediendo de esta manera queda definido el cos en cualquier tramo del circuito. A efectos de comprobación si el conductor es apto para la carga que ha de circular por el mismo, la comparación de valores será con la intensidad aparente, que es la que realmente circula y que como hemos indicado anteriormente, podemos medir.

Así pues, expuesta la base de cálculo, veamos algunos ejemplos y comentarios a los mismos.

- **Ejemplo nº 1:**

Sea el circuito de la figura 70, alimentado por dos fuentes d.c. de 220 V. Las intensidades han sido medidas, es decir, son las aparentes, mediante amperímetro. Se desea establecer la sección mínima por densidad de corriente y la caída de tensión en el punto más desfavorable. La caída de tensión máxima es del 5 % = 11V.

Establezcamos el circuito y las intensidades que circulan para la componente activa.

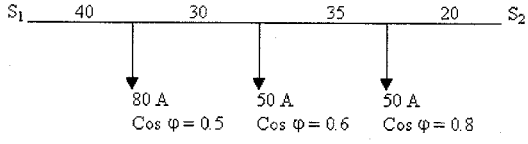


Figura 70.

Intensidad suministrada por la fuente:

$$S_1 = \frac{20x40+5x30+85x40}{125} = 46.8A$$

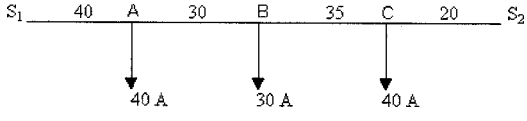


Figura 71.

Luego la circulación de intensidad será:

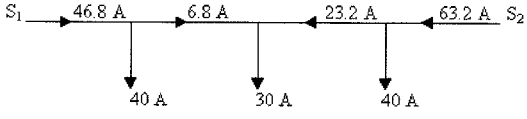


Figura 72. Circulación de intensidad activa.

Establezcamos el circuito y las intensidades que circulan para la componente reactiva:

Cos φ = 0.5 φ = 60º Sen 60º = 0.866
Cos φ = 0.6 φ = 53.13º Sen 53.13º = 0.8
Cos φ = 0.8 φ = 36.86º Sen 36.86º = 0.6

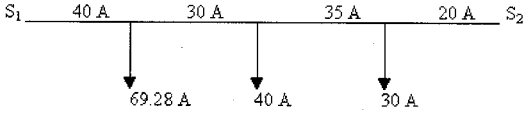


Figura 73.

Intensidad suministrada por la fuente S1:

$$S_1 = \frac{20x30+55x40+85x69.28}{125} = 69.52A$$

Luego la circulación de intensidad será (figura 74):

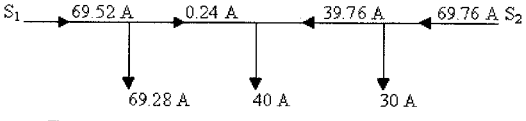


Figura 74. Circulación de intensidad reactiva.

Calculemos la intensidad aparente que circula por cada tramo y su cos φ:

$$\text{Tramo } \overline{S_1A}; I = \sqrt{46.8^2 + 69.52^2} = 83.8 \text{ A}; \quad \cos\varphi = \frac{46.8}{83.8} = 0.558 \text{ (Inductivo)}$$

$$\text{Tramo } \overline{AB}; I = \sqrt{6.8^2 + 0.24^2} = 6.804 \text{ A}; \quad \cos\varphi = \frac{6.8}{6.804} = 0.999 \text{ (Inductivo)}$$

$$\text{Tramo } \overline{BC}; I = \sqrt{23.2^2 + 39.76^2} = 46.03 \text{ A}; \quad \cos\varphi = \frac{23.2}{46.03} = 0.504 \text{ (Inductivo)}$$

$$\text{Tramo } \overline{CS_2}; I = \sqrt{63.2^2 + 69.76^2} = 94.13 \text{ A}; \quad \cos\varphi = \frac{63.2}{94.13} = 0.671 \text{ (Inductivo)}$$

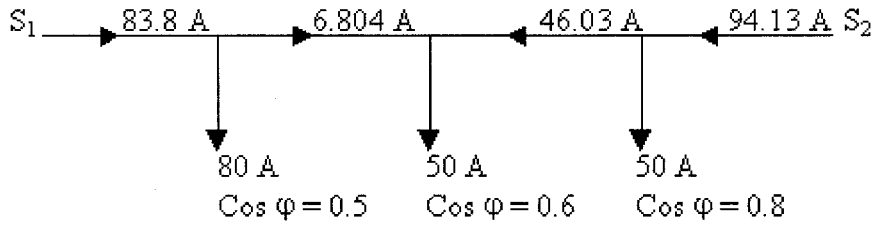


Figura 75. Circulación de intensidad aparente.

El punto sumente de intensidades, tanto para la intensidad activa como reactiva, es B, para el caso que nos ocupa y será igualmente donde se produzca la mayor caída de tensión.

La caída de tensión para una carga monofásica, dentro de las aproximaciones establecidas, viene expresada por:

$$\Delta V = \frac{2LI\cos\varphi}{KS} \qquad (67)$$

Luego la expresión de la caída de tensión en B será:

$$\Delta U = \frac{2x40x83.8x0.558}{56xS} + \frac{2x30x6.804x0.999}{56xS}$$

o bien:

$$\Delta U = \frac{2}{56xS}(40x46.8 + 30x6.8)$$

En esta expresión sólo aparece la componente activa y su cálculo a efecto de caída no presenta mayor dificultad. Sin embargo, la comprobación si el cable admite dicha intensidad aparente que circula, trae consigo el establecer la circulación de la componente reactiva y su composición posterior con la componente activa para determinar la aparente. El cable de 35mm^2 admite una carga máxima de 115 A. Si en este ejemplo sustituimos el valor de S por 35 mm^2 obtenemos como caída de tensión:

$$\Delta U = \frac{2}{56x35}(40x46.8 + 30x6.8) = 2.11\,V$$

La cual una vez más establece que la sección viene definida en este caso por la intensidad máxima admisible y no por la caída de tensión, dado su escaso valor.

- **Ejemplo nº 2:**

Supongamos el circuito de la figura 76 en el cual no coincide el punto sumente de intensidades activas y reactivas, una vez establecidos los correspondientes cálculos que volvemos a desarrollar. U_{MAX} = (5 % de 220 V) = 11 V.

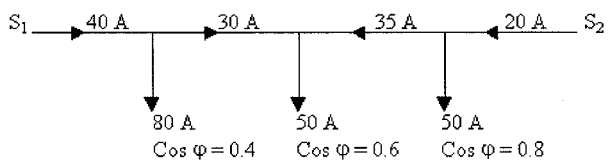


Figura 76.

- Componente activa (figura 80):

$$I_{S1} = \frac{20x40+55x30+85x32}{125} = 41.36$$

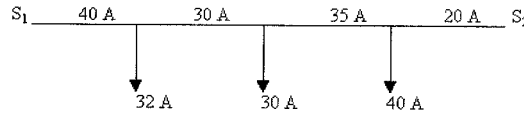


Figura 77.

- Componente reactiva:

Cos φ = 0.4 ⇒ φ = 66.42º

Sen 66.42º = 0.916

$$I_{S1} = \frac{20x30+55x40+85x73.32}{125} = 72.25\,A$$

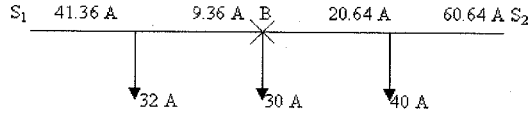


Figura 78. Circulación componente activa de intensidad.

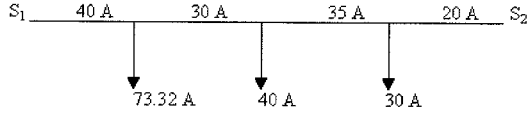


Figura 79.

El punto sumente de intensidad activa es B, así como el punto sumente de intensidad reactiva es A.

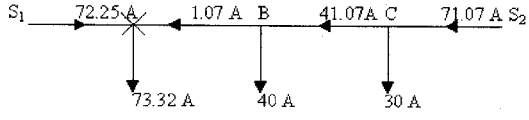


Figura 80. Circulación componente reactiva de intensidad.

Podemos sin embargo establecer el punto B como de intensidad sumente de energía reactiva, recibiendo por un lado intensidad reactiva inductiva y por el otro lado intensidad reactiva capacitiva. El esquema de distribución sería el de la figura 81.

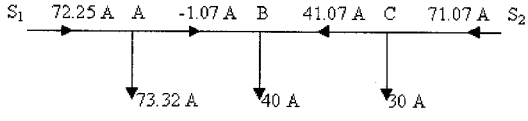


Figura 81. Circulación intensidad aparente.

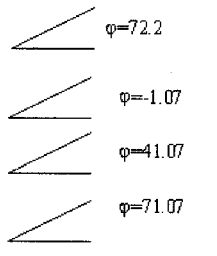
Calculemos la intensidad aparente en cada tramo y su cos φ:

Tramo $\overline{S_1A}$; $I = \sqrt{41.36^2 + 72.25^2} = 83.25$ A; $\cos\varphi = \frac{41.36}{83.25} = 0.496$

Tramo $\overline{AB}$; $I = \sqrt{9.36^2 + (-1.07)^2} = 9.42$ A; $\cos(-\varphi) = \frac{9.36}{9.42} = 0.993$

Tramo $\overline{BC}$; $I = \sqrt{20.64^2 + 41.07^2} = 45.96$ A; $\cos\varphi = \frac{20.64}{45.96} = 0.449$

Tramo $\overline{CS_2}$; $I = \sqrt{60.64^2 + 71.07^2} = 93.42$ A; $\cos\varphi = \frac{60.64}{93.42} = 0.649$



En la figura 82 tenemos:

I AB I: R x Componente activa tramo I S_1A I.
I BC I: R x Componente reactiva tramo I S_1A I.
I CD I: R x Componente activa tramo I AB I.
I DE I: R x Componente reactiva tramo I AB I.

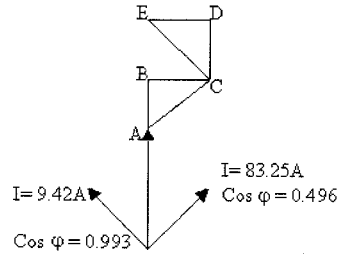


Figura 82.

La caída expresada por la fórmula como ya se indicó es aproximada respecto a las lecturas tomadas con aparatos de

medida pero suficiente si tenemos valores del cos φ relativamente altos. El valor exacto puede calcularse a partir de estos hallados aplicando fórmulas de resolución de triángulos.

De todo ello se deduce que el punto donde se produce la máxima caída de tensión viene determinado por el punto sumente de intensidades activas y el carácter de la corriente reactiva no influye en la fórmula.

Con la sección mínima establecida por calentamiento de 35 mm² (I_{ADM} = 115 A) la caída de tensión será:

$$\Delta U = \frac{2}{56x35}(40x83.25x0.496 + 30x9.42x0.993) = \frac{2}{56x35}(40x41.36 + 30x9.36) = 1.97\ V$$

En la práctica y en topología en árbol suele tomarse para las diferentes cargas un coseno medio, lo cual permite ciertas simplificaciones en el cálculo pero sobre todo en el caso de una topología en malla.

- **Ejemplo nº 3:**

Veamos la simplificación que se produce cuando establecemos un coseno medio en la instalación.

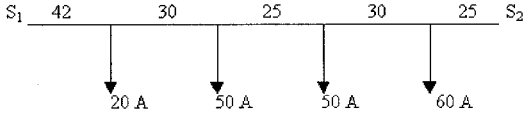


Figura 83.

$$\text{Cos}\ \varphi_{\ medio} = 0.8.$$

La comparación de las fórmulas de caída de tensión para corriente continua y monofásica es la siguiente:

Corriente continua: $\Delta U = \frac{2LI}{KS}$; Alterna monofásica: $\Delta U = \frac{2LI}{KS}\text{Cos}\varphi$

Observando las expresiones nos hace deducir que el problema planteado se reduce a uno de corriente continua, tomando la componente de intensidad activa por el valor de la intensidad de corriente continua.

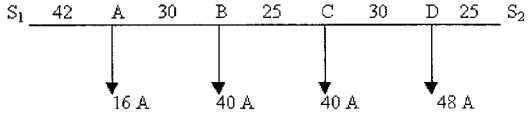


Figura 84.

Así tendremos el circuito siguiente:

$$I_{S1} = \frac{25x48 + 55x40 + 80x40 + 110x16}{152} = 55\ A$$

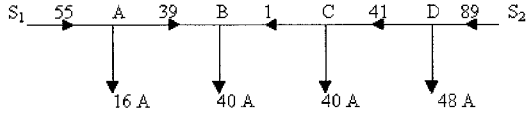


Figura 85.

- Circulación de intensidades activas:

- Circulación de intensidades aparentes:

Dado que todas las cargas tienen igual cos las intensidades de circulación estarán

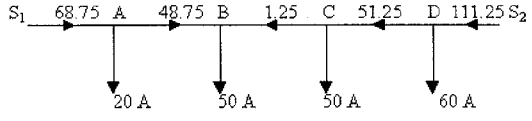


Figura 86.

afectadas por igual factor divisor de 0.8. Utilizando una sección de 35 mm² cuya carga máxima es 115 A, la caída de tensión valdrá:

$$\Delta U = \frac{2}{56x35}(42x55+30x39) = 3.55V$$

En consecuencia en el caso de un cos φ medio no es necesario determinar las intensidades reactivas que circulan para determinar bien sea, caídas de tensiones o secciones de los conductores.

3.8.- Circuitos en árbol o mallados alimentados con fuentes alternas trifásicas.

El cálculo de la caída de tensión o determinación de la sección de una red trifásica, bien en árbol o mallada, existiendo fuertes desequilibrios de fases es de una gran complejidad ya que tendríamos que recurrir a la descomposición en componentes simétricas del sistema de intensidades.

Por otra parte es obvio, que las redes en estas condiciones de trabajo son mal aprovechadas y producen grandes disparidades en las caídas de tensión entre fases.

La implantación de una red trifásica y la conexión a la misma de unas cargas bien monofásica o trifásica, tiende para el primer caso de que sean éstas dispuestas de forma que se equilibren, es decir, que la alimentación monofásica de varias cargas se haga siempre repartiendo entre dos fases o fase y neutro en la mínima distancia posible, para evitar tramos desequilibrados de red.

Por todo ello y siendo en la práctica este hecho comprobado, trataremos el problema únicamente desde el punto de vista de una red equilibrada.

El circuito trifásico equilibrado es reducible a uno monofásico, quedando la intensidad aparente determinada por las expresiones:

Potencia activa: $$P = \sqrt{3}U_N I_L \cos\varphi \qquad (69)$$

o bien,

Potencia aparente: $$S = \sqrt{3}U_N I_L \qquad (70)$$

siendo en general conocidos los valores P, U_N (tensión de alimentación) y cos φ estimado según el tipo de carga, o la potencia aparente.

Determinadas pues, las intensidades aparentes, cuanto ha quedado expuesto en el apartado anterior respecto al cálculo de la circulación de intensidades en general para fuentes de alimentación alternas monofásicas es aplicable.

A efectos de cálculo de la caída de tensión en los puntos sumentes de intensidad habrá de tenerse presente la expresión:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3}LI_L \cos\varphi}{KS} \qquad (71)$$

Cuya aplicación tendrá que hacerse por tramos en que circula igual intensidad, hasta alcanzar el punto o carga interesada.

En general y para mayores simplificaciones de cálculo, como ya se indicó para una red monofásica, suele tomarse un $\cos\varphi_{medio}$, lo cual evita efectuar el cálculo para determinar las intensidades reactivas que circulan por cada rama, y efectuar su composición posterior.

En el apartado 3.3. dejamos establecido que la caída de tensión en una red monofásica dependía de dos términos según la fórmula de Blondel:

$$\Delta U = RL_L \cos\varphi + XI_L \operatorname{Sen}\varphi \qquad (72)$$

donde:

R: Resistencia óhmica del conductor.
X: Reactancia del conductor.

Las caída de tensión en todos los casos anteriores de corriente alterna han sido determinada teniendo presente únicamente el parámetro resistivo, es por lo tanto necesario introducir en el cálculo el efecto de la reactancia. Para ello vamos a efectuar la comparación, tanto en monofásica como en trifásica de la fórmula aplicada hasta el momento, con la expresada anteriormente en la que interviene la reactancia.

- **Alimentación monofásica:**

Llamamos ΔU_r al valor obtenido con los dos términos de la fórmula:

$$\Delta U_r = 2LI_L(R_1\cos\varphi + X_1\operatorname{sen}\varphi) \qquad \Delta U = 2LI_L(R_1\cos\varphi)$$

$$\frac{\Delta U_r}{\Delta U} = \frac{R_1\cos\varphi + X_1\operatorname{sen}\varphi}{R_1\cos\varphi} = K \qquad (73)$$

- **Alimentación trifásica:**

$$\Delta U_r = \sqrt{3}LI_L(R_1\cos\varphi + X_1\operatorname{sen}\varphi) \qquad \Delta U = \sqrt{3}LI_L(R_1\cos\varphi)$$

$$\frac{\Delta U_r}{\Delta U} = \frac{R_1\cos\varphi + X_1\operatorname{sen}\varphi}{R_1\cos\varphi} = K \qquad (74)$$

De donde deducimos que el factor de corrección K es idéntico para ambos casos y cuyo valor es siempre mayor que la unidad, lo cual como era lógico de suponer dentro de los valores normales del cosφ representa una mayor caída de tensión ($\cos\varphi_{inductivo}$ de la carga).

Hagamos ciertas comparaciones del factor K de acuerdo con el cosφ, bien sea inductivo o capacitivo, supuesta una intensidad aparente constante. Para ello hemos representado dos cargas cuyo consumo de energía activa es idéntica siendo la energía reactiva una inductiva y otra capacitiva pero de igual valor absoluto.

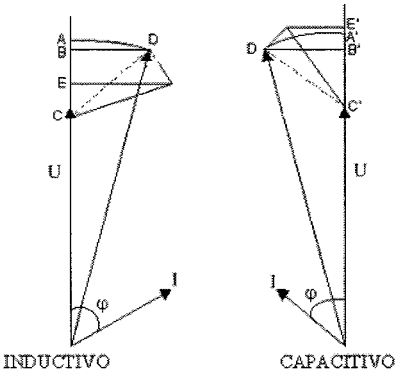


Figura 87. Comparación de caída de tensión con una carga inductiva y otra capacitiva.

Para la carga inductiva el error que comete la fórmula es IABI. El error cometido por considerar al conductor sólo el parámetro resistivo es IAEI. Gráficamente se observa que IABI< IAEI.

Para la carga capacitiva el error que comete la fórmula es IE'A'I de signo contrario al anterior, pues ello depende del ángulo φ. El error cometido por considerar al conductor sólo el parámetro resistivo es IA'E'I. Como se aprecia en la figura 87 para el caso capacitivo el error es por exceso y para el caso inductivo es por defecto. De todo ello deducimos que para cargas capacitivas el factor K puede ser menor que la unidad.

El valor de R_L es inversamente proporcional a la sección, mientras que el valor de X_L (función de L_L) depende de una función logarítmica de la sección, por lo tanto el valor de K no puede ser proporcional a la sección.

Por ello constatamos que para cada conducción eléctrica monofásica o trifásica, y según disposición de los conductores y sección, obtendremos de acuerdo con un cos φ un valor de K.

En una estructura de red en árbol siendo los valores de K, para cada tramo diferentes por ser las secciones (si bien para simplificar hemos tomado un cos φ medio) es fácil determinar la nueva caída de tensión, pero con ello ya se advierte que en una red mallada los puntos sumentes de intensidad no tendrán la misma caída de tensión según el «camino» que se adopte para su cálculo.

- **Ejemplo nº 1, Red radial:**
Se desea calcular una red aérea monofásica realizada mediante cobre desnudo, dispuesta en vertical con una separación entre conductores de 35 cm.

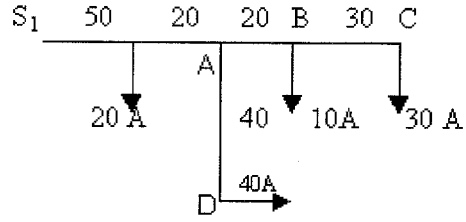


Figura 88.

El cos φ de las cargas se considerarán todas iguales a 0.8. Las intensidades indicadas han sido medidas. La caída máxima admisible de tensión será de 11 V.

La longitud virtual o distancia del centro de gravedad a la fuente será:

$$\lambda = \frac{50x20+110x40+90x10+120x30}{100} = 99m$$

- **Sección para el tramo S_1A** considerando sólo el parámetro resistivo será :

$$\Delta U = \frac{2\lambda \sum I\cos\varphi}{56S} \qquad 11 = \frac{2x99x100x0.8}{56S} \qquad S = \frac{2x99x100x0.8}{11x56} = 25.71mm^2$$

Tomemos la sección normalizada de 35 mm² cuya carga máxima admisible es de: 5.75 A/ mm² según MI-BT-004, o sea: 201.25 A.

Calculemos el valor de K para 35 mm², siendo su diámetro 7.5 mm (7 venas):

$$R_1 = \frac{1000}{56x35} = 0.5102\ \Omega / Km$$

$$L_1 = (0.064 + 0.4605 \log \frac{35}{0.375})10^{-3} = 0.0009712 \text{ Henrio / Km}$$

$$X_1 = 2\Pi x50x0.0009712 = 0.3051\ \Omega / \text{Km}$$

$$K = \frac{0.5102x0.8 + 0.3051x0.6}{0.5102x0.81} = 1.4485$$

Caída en el tramo S_1A:

$$\frac{2x1.4485x0.8}{56x35}(50x100 + 20x80) = 7.804 \text{ V}$$

Caída permisible desde A: 11-7.804 = 3.196 V

- Sección del tramo AD considerando sólo el parámetro resistivo igual que en el caso anterior:

$$\Delta U = \frac{2x40x40x0.8}{56xS_{AD}} = 3.196 \quad S_{AD} = \frac{2x40x40x0.8}{56x3.196} = 14.3\text{mm}^2$$

Probemos con la sección normalizada de 16 mm² cuya carga máxima admisible es de 7.6 A/mm² según MI-BT-004, o sea: 121.6 A.

Calculemos el valor de K para 16 mm² siendo su diametro 5.1 mm (7venas):

$$R_1 = \frac{1000}{56x16} = 1.116\Omega/\text{Km}$$

$$L_1 = (0.064 + 0.4605 \log \frac{35}{0.225})10^{-3} = 0.0010483 \text{ Henrios / Km}$$

$$X_1 = 2\Pi x50x0.0010483 = 0.3293\ \Omega / \text{Km}$$

Luego el valor de K para 16 mm² será:

$$K = \frac{1.116x0.8 + 0.3293x0.6}{1.116x0.8} = 1.2213$$

Luego la caída será:

$$\Delta U_{AD} = \frac{2x40x40x0.\ 8x1.2213}{56x16} = 3.489 > 3.196\ V$$

Por tanto, nos vemos obligados si no admitimos esta pequeña diferencia a tomar la sección inmediata superior, es decir 25 mm² (∅ = 6.3 mm, 7 venas).

Veamos cual sería la caída en este caso: Determinemos el nuevo valor de K para 25mm²:

$$R_1 = \frac{1000}{56x25} = 0.5102\ \Omega / Km$$

$$L_1 = (0.064 + 0.4605 \log \frac{35}{0.315})10^{-3} = 0.001006\ Henrio / Km$$

$$X_1 = 2\Pi x50x0.001006 = 0.316\ \Omega / Km$$

$$K = \frac{0.7142\ x0.8 + 0.316\ x0.6}{0.7142\ x0.8} = 1.3318$$

Luego la caída de tensión será:

$$\Delta U_{AD} = \frac{2x40x40x08x1.3318}{56x25} = 2.435V$$

La caída de tensión en el punto D será: 7.804+2.435=10.239 V.

- Tramo AB:

$$\lambda_1 = \frac{20x10 + 50x30}{40} = 42.5\,m$$

La sección para el tramo AB considerando solo el parámetro resistivo será:

$$\Delta U = \frac{2x42.5x40x\ 0.8}{56xS_{AB}} = 3.196\ \ V \qquad S_{AB} = \frac{2x42.5x40x\ 0.8}{56x3.196} = 15.19\,mm^2$$

No podemos tomar la sección normalizada de 16 mm² ya que su valor K=1.2213 y el margen entre la calculada y normalizada no es un aumento del 22%, por lo tanto adoptamos 25 mm².

La caída de tensión en el tramo AB será:

$$\Delta U_{AB} = \frac{2x40x20x0.8x1.3318}{56x25} = 1.217\ V$$

Luego la caída permisible desde B será: 3.196-1.217=1.979 V

- Sección para el tramo BC considerando sólo el parámetro resistivo será:

$$\Delta U = \frac{2x30x30x0.8}{56xS_{BC}} = 1.979\ \ V \qquad S_{AB} = \frac{2x30x30x0.8}{56x1.979} = 12.99\,mm^2$$

Tomemos la sección de 16 mm² en cuyo caso la caída será:

$$\Delta U = \frac{2x30x30x08x1.2213}{56x16} = 1.962V$$

Luego la caída total en el punto C será:

$$\Delta U_C = 7.804+1.217+1.962 = 10.983\ V$$

Resumen:

- Tramo SA: sección 35 mm²
- Tramo AD y AB: sección 25 mm²
- Tramo BC: sección 16 mm²

Puede comprobarse la no proporcionalidad de la sección del conductor con el valor de K ya que puede escribirse:

$$\frac{16}{1.2213} \neq \frac{25}{1.3318} \neq \frac{35}{1.4485}$$

a pesar de haberse mantenido el cos φ y la separación entre conductores.

- Reducción a sección única:

Es evidente que si establecemos una sección a priori para todas las ramas iguales, el coeficiente K corrector afectará a todas las caídas de tensión que se calculen, así pues, si la caída máxima admisible es de ΔU_m a efectos de cálculo no podrá sobrepasarse el valor de $\Delta U_m/K$.

Por lo tanto el problema para una red mallada monofásica o trifásica sólo afectará a las fórmulas básicas a aplicar en cada caso. Es decir, para hallar la caída de tensión tendremos.

Para monofásica:

$$\frac{\Delta U_m}{K} \geq \frac{2 x \text{Cos}\,\varphi}{56 x S}(L_{AB}I_{AB} + L_{BC}I_{BC} + L_{CD}I_{CD} \ldots) \qquad (75)$$

Para trifásica:

$$\frac{\Delta U_m}{K} \geq \frac{\sqrt{3} x \text{Cos}\varphi}{56 x S}(L_{AB}I_{AB} + L_{BC}I_{BC} + L_{CD}I_{CD} \ldots) \qquad (76)$$

En el caso en que se adopten secciones diferentes en las ramas, teníamos que proceder a determinar unas longitudes ficticias que permitiesen considerar el circuito con una sección base igual para todas las mallas, lo cual nos permita establecer el cálculo por momentos eléctricos.

Dado que los valores de K dependen de cada sección, y a una sección dada según la disposición de los conductores; hemos de proceder a determinar las nuevas magnitudes ficticias no sólo a efecto de las secciones, sino también a los diferentes valores de K establecidos para las ramas, ya que estos intervienen en las fórmulas de caída de tensión como un factor multiplicativo, o bien puede interpretarse como un aumento de la resistencia de la rama.

Así, si una rama tiene de característica una resistencia R y una longitud L y un factor de corrección K y hemos de homogeneizarla respecto a los valores de una rama cuyas características hemos tomado como base, la longitud ficticia vendrá dada por:

$$R = \frac{1}{\sigma}\frac{L}{S}K = \frac{1}{\sigma_B}\frac{L'}{S_B}K_B \qquad (77)$$

donde:

- σ: Conductividad del cobre (= 56) ó aluminio(= 36).
- S_B: Sección de la rama tomada como base.
- K_B: Coeficiente de incremento de caída de tensión por el efecto de reactancia en la rama tomada como base.

Luego:

$$L' = L\frac{S_B}{S}\frac{K}{K_B}\frac{\sigma_B}{\sigma} \text{(Longitud ficticia para cálculo)} \qquad (78)$$

- **Ejemplo nº 2:**

Sea el circuito de la figura 89 donde S_1 y S_2 son dos fuentes de corriente alterna monofásica de 110V. $\Delta U_{MAX\,(5\%)}$ = 5.5 V.

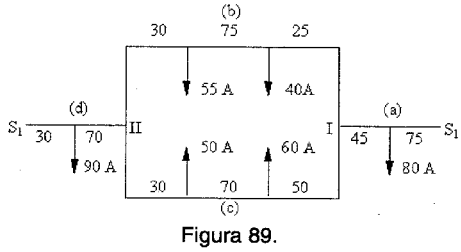


Figura 89.

El $\cos\varphi_{medio}$ de las cargas es 0.8 y las intensidades indicadas han sido medidas mediante amperímetros. Se considerará una red aérea de cobre desnudo con separación entre conductores de 40 cm.

Dado que el coeficiente K a medida que el conductor es de mayor sección va en aumento y para una carga total de S_2 de 195 A a una longitud λ = 83 m si tomamos 1 mm²/A cada 100 a 150 m, tomaremos como sección para la rama (a) y (d): 185 mm² y para las ramas (b) y (c) la sección de 95 mm².

Procedamos pues a seguir el proceso indicado en el apartado 3.6.

- Punto nº 1:

$$I_{Ia} = \frac{75x80}{120} = 50\,A \qquad I_{Ib} = \frac{30x55+105x40}{130} = 45\,A \qquad I_{Ic} = \frac{30x50+100x60}{150} = 50\,A$$

Intensidades en el nudo I:

$$\sum I_I = 50+45+50 = 145A$$

$$I_{IIa} = \frac{30x90}{100} = 27\,A \qquad I_{IIb} = \frac{25x40+100x55}{130} = 50\,A \qquad I_{IIc} = \frac{50x60+120x50}{150} = 60\,A$$

Intensidades en el nudo II:

$$\sum I_{II} = 27+50+60 = 137A$$

- Punto nº 2:
Tomaremos como base la sección de 185mm².

Determinación del factor de corrección K para el cable de 185 mm², Ø=17.5 mm (37 venas).

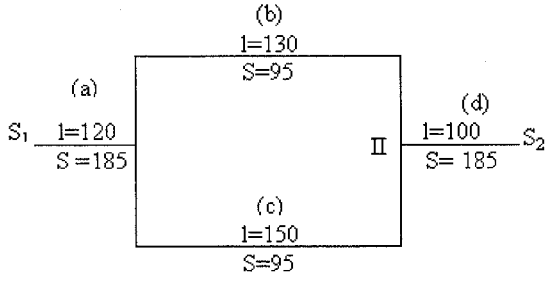


Figura 90.

Valor de K_{185}:

$$R_1 = \frac{1000}{56x185} = 0.0965\ \Omega / Km$$

$$L_1 = (0.053 + 0.4605 \log \frac{40}{0.875})10^{-3} = 0.0008174 \text{ Henrio / Km}$$

$$X_1 = 2\Pi x50x0.0008174 = 0.2568\ \Omega / Km$$

$$K_{185} = \frac{0.0965x0.8 + 0.2568x0.6}{0.0965x0.8} = 2.9958$$

Para cable de 95 mm², =12.5 mm (19 venas). Valor de K_{95}:

$$R_1 = \frac{1000}{56x95} = 0.1879\ \Omega / Km$$

$$X_1 = 2\Pi x50x0.0008867 = 0.2785\,\Omega / Km$$

$$L_1 = (0.055 + 0.4605 \log \frac{40}{0.625})10^{-3} = 0.0008867\ Henrio / Km$$

$$K_{95} = \frac{0.1879x0.8 + 0.2785x0.6}{0.1879x0.8} = 2.1116$$

Reducción de las ramas (b) y (c) a la base (185 mm²).

Rama (c) y (b):

$$l'_b = 130 \frac{185}{95} \frac{2.1116}{2.9958} = 178.44\ m$$

$$l'_c = 150 \frac{185}{95} \frac{2.1116}{2.9958} = 205.89\ m$$

- Punto nº 3:

Longitud equivalente (b) con (c):

$$l_{b,c} = \frac{178.44x205.89}{178.44 + 205.89} = 95.592\ m$$

$$I_{S_1A} = \frac{137x100 + 145x195.592}{315.592} = 133.27\ A$$

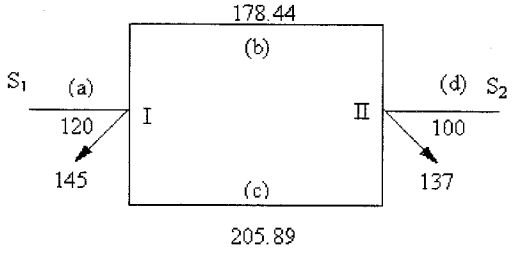


Figura 91

Intensidad por rama I-II:

133.27 - 145 = -11.73 A

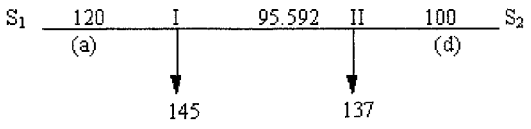


Figura 92.

Intensidad por rama (d):

137+11.73 = 148.73 A

Intensidad que circula por (b):

$$I_{(b)} = \frac{95.592x11.73}{178.44} = 6.28\,A$$

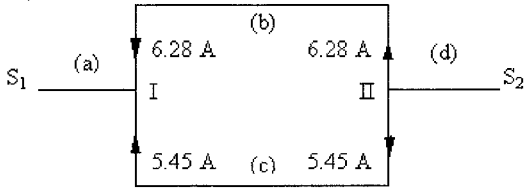


Figura 93.

Intensidad que circula por (c):

$$I_{(c)} = 11.73 - 6.28 = 5.45A$$

- Punto nº 4:

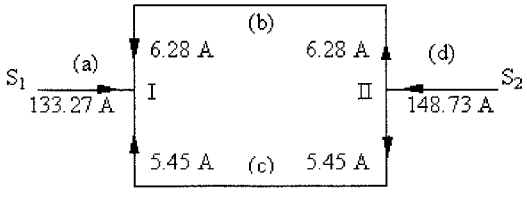


Figura 94.

- Punto nº 5:

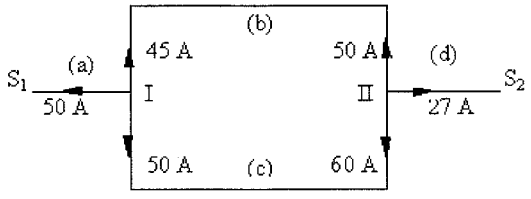


Figura 95.

- Punto nº 6:

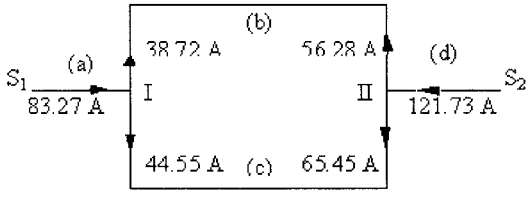


Figura 96.

De esta forma la circulación de intensidades por cada tramo será:

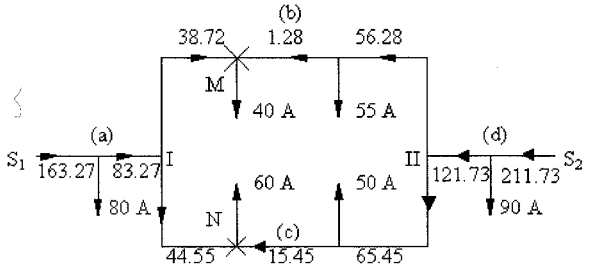


Figura 97.

Calculemos la caída de tensión en los puntos sumentes de intensidad, bien sea desde la fuente S_1 o S_2 para comprobar las caídas:

$$\Delta U_{S1M} = \frac{2x2.9958x0.8}{56x185}(163.27x75 + 83.27x45) + \frac{2x2.1116x0.8}{56x95}(38.72x25) =$$
$$\Delta U_{S1M} = 8.0136\,V$$

$$\Delta U_{S2M} = \frac{2x2.9958x0.8}{56x185}(211.73x30 + 121.73x70) + \frac{2x2.1116x0.8}{56x95}(56.28x30 + 1.28x75) =$$
$$\Delta U_{S2M} = 8.0144\,V$$

Como puede apreciarse las tensiones son iguales. (Téngase presente los decimales despreciados):

$$\Delta U_{S1N} = \frac{2x2.9958x0.8}{56x185}(163.27x75 + 83.27x45) + \frac{2x2.1116x0.8}{56x95}(44x50) =$$
$$\Delta U_{S1N} = 8.8136\,V$$

$$\Delta U_{S2N} = \frac{2x2.9958x0.8}{56x185}(211.73x30 + 121.73x70) + \frac{2x2.1116x0.8}{56x95}(65.45x30 + 15.45x70) =$$
$$\Delta U_{S2M} = 8.8144\,V$$

La caída de tensión mayor es para el punto N y las secciones adoptadas cumple los requisitos establecidos.

3.9.- Cálculo de redes a partir de las características facilitadas por los fabricantes de conductores.

En los apartados anteriores han quedado expuestos los parámetros que intervenienen en una conducción eléctrica en general. La posibilidad en el mundo físico de efectuar mediciones y comprobaciones de los fenómenos que se manifiestan en el mismo inducen a establecer cálculos proporcionales partiendo de unidades básicas.

Este es el caso que nos ocupa si establecemos una conducción cuya longitud sea unitaria y la circulación de intensidad sea 1 A, una disposición de conductores determinada así como por último para un valor considerado del aprovechamiento de la energía o potencia puesta a disposición del receptor (cos φ).

Estos datos, bien sean tabulados o ensayados en cuanto a la caída de tensión, según sección y demás datos característicos de la conducción, aparecen en los catálogos de los fabricantes de conductores eléctricos (tabla 10), lo cual permite un cálculo en el cual son tenidos en cuenta todos los factores que intervienen.

Por tanto es necesario desarrollar la metodología de cálculo partiendo de estos datos, así como en apartados anteriores lo fue de una forma más o menos aproximada, pero en la mayoría de los casos suficientes, cuando se desconocen los datos del fabricante.

La caída de tensión unitaria vendría deducida de la siguiente expresión:

$$\Delta U = f(R,L,g;C)_{\cos \varphi} / L * I \qquad (80)$$

RV-0,6/1KV

TETRAPOLARES

CONDUCTOR: Cobre recocido clase 1 hasta 4 mm², resto clase 2. Aluminio clase 2.

AISLAMIENTO: Polietileno reticulado XLPE.

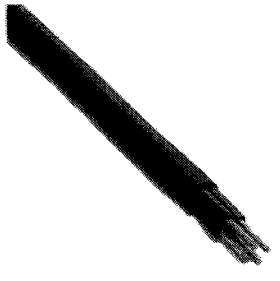
RELLENO: Policloruro de Vinilo (PVC).

CUBIERTA EXTERIOR: Policloruro de Vinilo (PVC-ST2).

DIMENSIONADO Y MATERIALES: Según norma

UNE-21123, en correspondencia con IEC-502. Identificación de conductores según UNE-21089.

VARIANTE: ENERGY UNFIRE, cables ignífugos "no propagadores del incendio", según UNE-20432.3 catg. C.



SECCION NOMINAL	CARACTERISTICAS FISICAS					CARACTERISTICAS ELECTRICAS			
	ESPESOR RADIAL DE AISLAMIENTO	DIAMETRO SOBRE AISLAMIENTO	DIAMETRO EXTERIOR APROXIMADO	PESO APROXIMADO	RADIO MINIMO DE CURVATURA	INTENSIDAD ADMISIBLE EN REGIMEN PERMANENTE		CAIDA DE TENSION ENTRE FASES	
						CABLE ENTERRADO 25 °C	CABLE AL AIRE 40 °C	COS φ = 0,8	COS φ = 1
mm²	mm	mm	mm	kg/km	mm	A	A	V/A. km.	V/A. km.

CONDUCTOR DE COBRE

4 x 1,5	0,7	2,8	9,6	145	38	28	17	21,4	26,6
4 x 2,5	0,7	3,2	10,5	195	42	40	25	12,9	16,1
4 x 4	0,7	3,7	11,7	270	47	52	34	8,11	10,1
4 x 6	0,7	4,9	15,2	435	60	66	44	5,52	6,80
4 x 10	0,7	5,8	17,4	640	70	88	61	3,31	4,03
4 x 16	0,7	6,9	20,4	940	85	115	82	2,11	2,54
4 x 25	0,9	8,6	25,1	1460	125	150	110	1,27	1,60
4 x 35	0,9	9,7	27,7	1915	140	180	130	1,01	1,16
4 x 50	1	10,9	31,1	2505	155	215	165	0,75	0,85
4 x 70	1,1	12,8	36	3560	180	260	210	0,55	0,59
4 x 95	1,1	14,7	41,4	4775	210	310	260	0,41	0,43
4 x 120	1,2	15,9	43,8	5440	220	355	300	0,34	0,33
4 x 150	1,4	17,20	47,5	6990	235	400	350	0,29	0,27
4 x 185	1,6	19,40	53,1	8790	315	450	400	0,25	0,22
4 x 240	1,7	22,00	59,8	11350	360	520	475	0,21	0,17

CONDUCTOR DE ALUMINIO

4 x 16	0,7	6,9	20,4	545	85	90	64	3,47	4,24
4 x 25	0,9	8,6	25,1	830	125	115	86	2,21	2,66
4 x 35	0,9	9,7	27,7	1045	140	140	105	1,62	1,92
4 x 50	1	10,9	31,1	1310	155	165	130	1,21	1,42
4 x 70	1,1	12,8	36	1830	180	205	165	0,86	0,98
4 x 95	1,1	14,7	41,4	2375	210	240	205	0,64	0,71
4 x 120	1,2	15,9	43,8	2720	220	275	235	0,52	0,55
4 x 150	1,4	17,20	47,5	3325	235	310	275	0,43	0,46
4 x 185	1,6	19,40	53,1	4100	315	350	315	0,36	0,37
4 x 240	1,7	22,00	59,8	5310	360	405	370	0,29	0,28

Tabla 10. Características técnicas de conductores.

En donde L es la longitud de la conducción analizada e I la intensidad que circula por un conductor. Si los valores de L e I son la unidad el valor de $f(R,I,g,C)_{cos\varphi}/(L*I)$ representa la caída unitaria de tensión.

Obsérvese que los parámetros L e I intervienen en la definición formando un producto lo cual permite establecer el procedimiento de cálculo del «Momento eléctrico».

En general en los catálogos de los fabricantes se dan los valores de acuerdo con la sección y el tipo de cable, de caída de tensión unitaria, considerando par la longitud de un kilómetro y la corriente de un Amperio.

Es obvio que el cálculo de la sección del conductor a aplicar teniendo en cuenta solamente el parámetro resistivo orienta el valor a tomar como sección del conductor, y por lo tanto a menos que la práctica facilite la toma de decisión respecto a la sección, es aconsejable efectuar un cálculo simplificado.

- **Ejemplo nº 1:**

Se desea calcular una red subterránea realizada mediante conductores de aluminio trifásica de designación UNE VV 0.6/1 kV. El cos φ de las cargas se considerarán todas iguales a 0.8. La caída máxima admisible de tensión será de 11V.

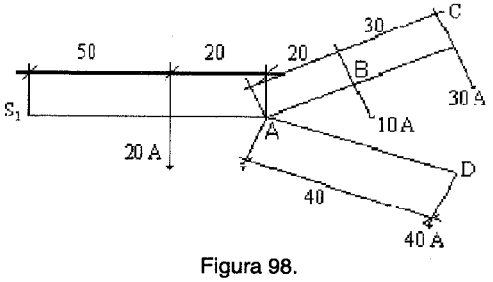


Figura 98.

Calculemos la sección sólo a efecto resistivo:

$$\lambda = \frac{50x20 + 110x40 + 90x10 + 120x30}{100} = 99m$$

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot \lambda \cdot I \cdot Cos\varphi}{36 \cdot S} \qquad S = \frac{\sqrt{3}x99x100x0.8}{36x11} = 34.641 mm^2$$

Tomaremos pues conductor de 3x50 mm², cuya caída unitaria es 1.18 V/(A*km). Por tanto la caída de tensión en el punto A será:

ΔU_A = 0.05*100*1.18+0.02*80*1.18 = 7.78 V y la caída permisible desde A es de:
11.00-7.78 = 3.21 V

- Tramo AD:

$$S = \frac{\sqrt{3}x40x40x0.8}{36x3.21} = 19.17\ mm^2$$

Tomaremos pues conductor de 3x25 mm², cuya caída unitaria es 2.15 V/(A*km).

Caída en AD:

$$\Delta U_{AD} = 0.04x40x2.15 = 3.44 > 3.212 V$$

Luego hemos de pasar a 3x35 mm², cuya caída unitaria es1.57 V/(A*km) y tendremos entonces:

$$\Delta U_{AD} = 0.04x40x157 = 2.512 \text{ V}$$

Caída total de tensión al punto D: 7.788 + 2.512 = 10.3 V

- Tramo AB:

$$\lambda_1 = \frac{20x10 + 50x30}{40} = 42.5m$$

Luego,

$$S = \frac{\sqrt{3}x42.5x40x0.8}{36x3.212} = 20.37mm^2$$

Tomaremos pues conductor de 3 x 25 mm² para el tramo AB. La caída de tensión en el tramo AB será:

$$\Delta U_{AB} = 2.15x0.02x40 = 1.72 \text{ V}$$

Caída permisible desde B = 3.212-1.720= 1.492 V

- Tramo BC:

$$S = \frac{\sqrt{3}x30x30x0.8}{36x1.492} = 23.21mm^2$$

Tomando una sección de 3 x 25 mm². Por tanto tendremos una caída de tensión en el tramo BC:

$$\Delta U_{BC} = 2.15x0.03x30 = 1.935 > 1.492 \text{ V}$$

Aumentar la sección al tramo BC, siendo AB igual a 25 mm² no es lógico, luego cambiamos el tramo AB por 35 mm².

Nueva caída de tensión en el tramo AB:

$$\Delta U_{AB} = 1.57x0.02x40 = 1.256 \text{ V}$$

Caída permisible desde B = 3.212 - 1.256 = 1.956 V

Tomando para BC igual a 3 x 25 mm² tendremos:

$$\Delta U_{BC} = 1.935 < 1.956 \text{ V}$$

Caída total al punto C: 7.768 + 1.256 + 1.935 = 10.979 V.

La comprobación por densidad de corriente:

- 3 x 50 mm² I_{max} = 140 A
- 3 x 35 mm² I_{max} = 120 A
- 3 x 25 mm² I_{max} = 98 A

En resumen:

- Tramo S,A: 3 x 50 mm², Aluminio.
- Tramo A,D: 3 x 35 mm², Aluminio.
- Tramo A,B: 3 x 35 mm², Aluminio.
- Tramo B,C: 3 x 25 mm², Aluminio.

- Ejemplo nº 2:

Sea el circuito de la figura 99 donde S_1 y S_2 son dos fuentes de corriente alterna trifásica.

El cos φ_{medio} de las cargas es 0.8 y las intensidades indicadas han sido medidas mediante amperímetros. Se considera que la red se desea con cable trenzado de cobre aérea, siendo la caída máxima admisible de 10 V.

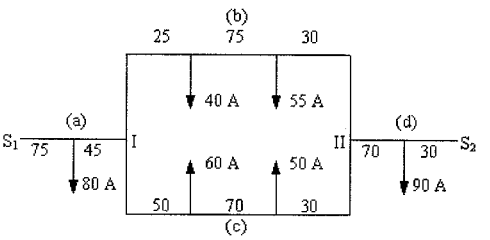


Figura 99.

Tomemos como secciones para las ramas (a) y (d) de 3 x 95 mm² y para las ramas (b) y para las ramas (b) y (c) de 3 x 50 mm² ya que el efecto inductivo en los cables trenzados queda muy aminorado, siendo uno de los motivos de haberse prodigado su utilización.

- Punto nº 1:

$$I_{Ia} = \frac{75x80}{120} = 50A \qquad I_{Ic} = \frac{30x50 + 100x60}{150} = 50A \qquad I_{Ib} = \frac{30x55 + 105x40}{130} = 45A$$

$$\sum I_I = 50 + 50 + 45 = 145A$$

$$I_{IId} = \frac{30x90}{100} = 27A \qquad I_{IIc} = \frac{50x60 + 120x50}{150} = 60A \qquad I_{IIb} = \frac{25x40 + 100x55}{130} = 50A$$

$$\sum I_{II} = 27 + 60 + 50 = 137A(\text{NudoII})$$

- Punto nº 2:

La caída de tensión unitaria para cable trenzado de cobre con cos φ = 0.8 es de:

- 95 mm²: 0.41 V/(A*km)
  I_{max} = 295 A
- 50 mm²: 0.76 V/(Akm)
  I_{max} = 190 A

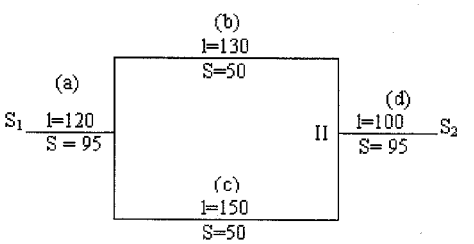


Figura 100.

Tomaremos como sección base 95 mm² para homogeneizar las secciones del circuito. Estableciendo que no modificamos la caída de tensión en la rama a homogeneizar por modificación de la sección, ya que lo compensamos en longitud, tendremos:

Para rama (b): 130 x 0.76 = L'_b x 0.41 L'_b = 130 x 0.76/0.41 = 240.97 m
Para rama (c): 150 x 0.76 = L'_c x 0.41 L'_c = 150 x 0.76/0.41 = 278.04 m

- Punto nº 3:
Longitud equivalente (b) con (c):

$$L_{b,c} = \frac{240.97 x 278.04}{240.97 + 278.04} = 129.09 \text{ m}$$

$$I_{S_1,a} = \frac{100x137 + 229.09x145}{349.09} = 134.40 \text{ A}$$

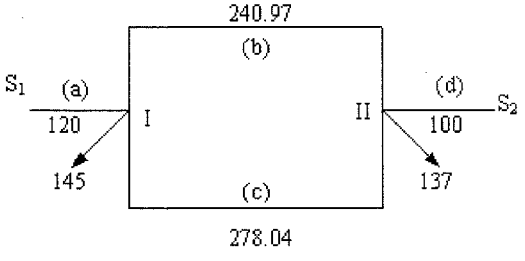


Figura 101.

Intensidad por la rama I-II:
134.4 - 145 = -10.6 A

Intensidad por la rama (d):
137 + 10.6 = 147.6 A

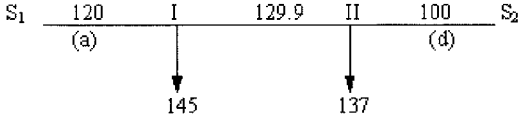


Figura 102.

Intensidad por la rama (b):

$$129.09 \text{ x } 10.6 = 240.97 \text{ x } I_b$$

$$I_b = \frac{129.09x10.6}{240.97} = 5.678 \text{ A}$$

Intensidad por la rama (c):
I_c = 10.6 - 5.678 = 4.922 A

- Punto nº 4:

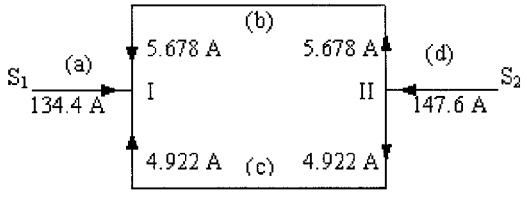


Figura 103.

- Punto nº 5:

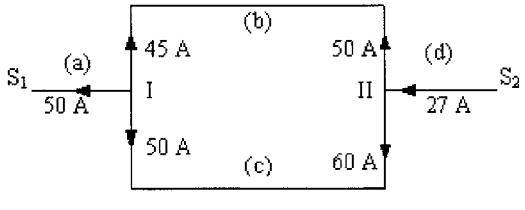


Figura 104.

- Punto nº 6:

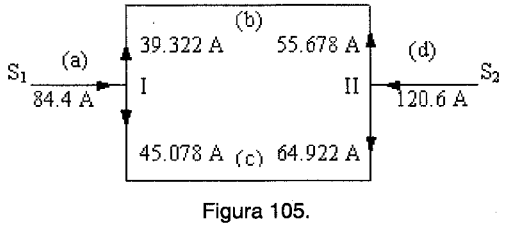


Figura 105.

De esta forma la circulación de intensidades por cada tramo será:

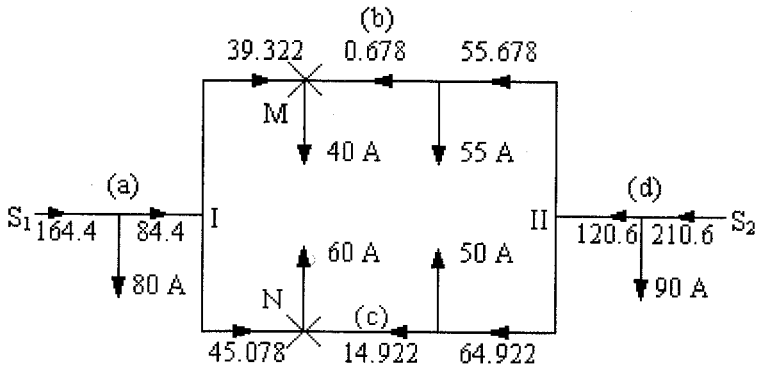


Figura 106.

Comparando esta distribución con la establecida en el apartado 3.8. puede observarse unas mínimas diferencias.

Calculemos la caída de tensión en los puntos sumentes de intensidad, bien sea desde la fuente S_1 o S_2 para comprobar las caídas.

Para el punto M tendremos:

$$\Delta U_{S1M} = 0.41(164.4 x 0.075 + 84.4x0.045) + 0.76(39.322x0.025) = 6.61248 + 0.74711 = 7.35459 \text{ V}$$

$$\Delta U_{S2M} = 0.41(210.6x0.03 + 120.6x0.07) + 0.76(55.678x0.03 + 0.678x0.075) = 6.0516 + 1.3081 = 7.3597 \text{ V}$$

Para el punto N tendremos:

$$\Delta U_{S1N} = 0.41(164.4 x 0.075 + 84.4x0.045) + 0.76(45.078x0.05) = 6.61248 + 1.71296 = 8.32544 \text{ V}$$

$$\Delta U_{S2N} = 0.41(210.6x0.03 + 120.6x0.07) + 0.76(64.922x0.03 + 14.922x0.07) = 6.0516 + 2.2740 = 8.325 \text{ V}$$

Una vez más como puede apreciarse las caídas de tensiones obtenidas por distintos caminos son iguales. La mayor caída pertenece al punto N y queda dentro de los límites establecidos.

En los catálogos figuran las caídas unitarias para el cos $\varphi = 1$ y cos $\varphi = 0.8$ cabe establecer de forma aproximada la caída unitaria para otro cos φ mediante la expresión:

$$\Delta U_1 = R_1 x \cos\varphi + X_1 x \operatorname{sen}\varphi \qquad (81)$$

planteando la determinación de R_1 y X_1 en esta fórmula.

Veamos un ejemplo:

Sea el cable de trenzado de cobre de 3 x 50 mm² cuya caída de tensión para cos φ = 0.8 es 0.76 V/(A*km) y para el valor de cos φ =1 es: 0.85 V/(Akm).

Se desea conocer la caída unitaria para el valor de cos φ = 0.7.

$$\left.\begin{aligned} 0.76 &= R_1 \cdot 0.8 + X_1 \cdot 0.6 \\ 0.85 &= R_1 \end{aligned}\right\} \text{De donde} \left\{ 0.76 = 0.85 \cdot 0.8 + X_1 \cdot 0.6 \right\} X_1 = 0.1333 \quad (82)$$

Caída de tensión unitaria para cos φ = 0.7:

$$\cos \varphi = 0.7 \Rightarrow \varphi = 45.57^{\circ} \Rightarrow \operatorname{sen} \varphi = 0.714$$

$$\Delta U_1 = 0.85 \times 0.7 + 0.1333 \times 0.714 = 0.69 \text{ V/(A * km)} \quad (83)$$

Finalmente existen ábacos que nos permiten determinar directamente la sección de un conductor a emplear a partir de los datos de entrada. Estos ábacos se han construido a partir de la ecuaciones planteadas en este tema.

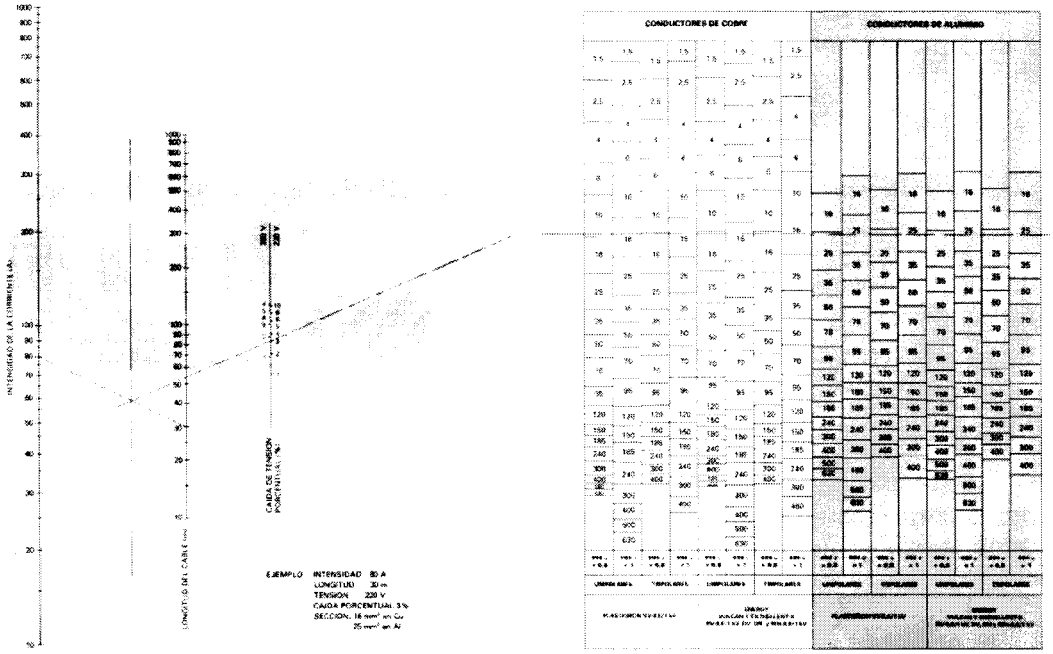


Figura 107. Ábaco para determinar la sección de un conductor.

TEMA 12. CÁLCULO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN EN B.T. MEDIANTE MÉTODOS MATRICIALES

1.- BASES DEL CÁLCULO.

Cada tramo o línea de una instalación eléctrica queda caracterizado por cuatro variables principales, que son:

- La intensidad (I).
- La caída de tensión máxima (e).
- La potencia que transporta (P).
- La sección (S).

Dos ecuaciones ligan obligatoriamente estos cuatro parámetros en cada tramo o línea que son:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi} \quad \text{Sistema trifásico}$$
$$e = \frac{\sqrt{3} * L * I * \cos\varphi}{KS} \quad \text{Sistema trifásico } (X=0) \qquad (1)$$

Cuando se tiene una línea única que alimenta un receptor o una línea ramificada sencilla, normalmente la potencia (P) a transportar es especificada como un parámetro de diseño, es decir, lo que conocemos es la potencia del receptor a alimentar. Así pues, queda solo introducir una restricción más para tener el problema totalmente resuelto.

Desde un punto de vista teórico, la indeterminación puede resolverse fijando directamente una sección comercial o bien fijando una caída de tensión.

La solución definitiva nos viene impuesta por criterios funcionales y económicos a la vez. Funcionales, porque la restricción o ligadura que nos falta vendrá dada por el balance calorífico o máximo calor que es capaz de disipar el conductor al ambiente en las condiciones de su instalación (Intensidad máxima admisible); esto determinará una intensidad máxima a transportar para cada sección, en unas determinadas condiciones con lo que tendré un rango de secciones válidas desde este punto de vista; otro criterio funcional, ligado al anterior, es que, de todas las secciones que cumplan con la condición anterior (calentamiento), debemos quedarnos sólo con las que cumplan con las máximas caídas de tensión que imponen nuestra normativa (criterio de caída de tensión). Finalmente, la elección la sección menor o mínima de las que verifican las dos condiciones anteriores, me proporcionarán la solución definitiva aportando el criterio económico y por lo tanto el abaratamiento de las instalaciones, junto con la seguridad, la solución óptima.

Por último, cuando la línea o tramo pertenece a una red muy ramificada o mallada, la intensidad que circula por ella, una vez especificados los consumos o potencias exteriores, no se conoce de forma inmediata, como en el caso anterior de una línea simple. No obstante, a cambio podemos introducir unas ecuaciones de ligadura, conocidas como Leyes Kirchhoff. Éstas introducen una ecuación más por línea o tramo, ya que de la primera ley se obtiene un

número de ecuaciones igual al número de nudos, N, pero al tener que verificarse el equilibrio de consumo (o potencias) exteriores, una de estas ecuaciones es ligada, de aquí que la primera ley de origen a N-1 ecuaciones linealmente independientes. La segunda ley proporciona tantas ecuaciones como número de mallas independientes, M. Por tanto, se dispondrá de M+N-1 ecuaciones adicionales. Por otro lado, debido a una propiedad topológica de los circuitos planos, se verifica que el número de líneas L, es igual al número de mallas más el de nudos menos uno, concluyendo finalmente que las leyes de Kirchhoff aportan una ecuación más por línea.

La última ligadura o relación para la determinación de secciones en este tipo de redes, vendrá impuesta por criterios económicos, abaratando la red y haciendo así mismo que se cumplan las condiciones o restricciones fundamentales en todo tramo o línea, que son el criterio de calentamiento y el de caída de tensión.

Existen muchos métodos de optimización de redes por métodos matriciales, como es el caso de minimizar el coste de la red.

2.- MÉTODO DE ANÁLISIS MATRICIAL POR NUDOS.

Éste es el método más utilizado y el que se presenta como más eficaz, en el planteamiento y resolución de las redes eléctricas, en diseño o en comprobación, ya sean de Alumbrado Publico, Redes de Distribución malladas y/o ramificadas, etc..

Sea una red de 7 nudos (figura 1). Tomemos un nudo, que vamos a denominar "A", como referencia de las caídas de tensión (normalmente se toman un nudo de alimentación de la red eléctrica). Las caídas de tensión respecto de dicho nudo serán e_{nA} (n=1,....., N), así por ejemplo, para el nudo 1, se tendrá e_{1A}.

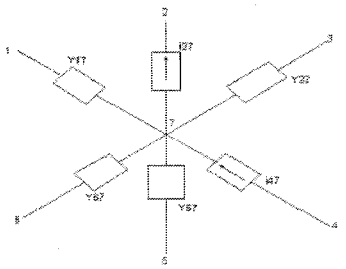


Figura 1. Red trifásica con 7 nudos.

La caída de tensión para una rama cualquiera, por ejemplo la 7-2, será $e_{72}=e_{7A}-e_{2A}$. Si recorremos una línea cerrada, por ejemplo 1-2-3-4-5-6-1, se tendrá:

$$e_{12}=e_{1A}-e_{2A} \quad (2)$$

$$e_{23}=e_{2A}-e_{3A} \quad (3)$$

$$e_{45}=e_{4A}-e_{5A} \quad (4)$$

$$e_{56}=e_{5A}-e_{6A} \quad (5)$$

$$e_{34}=e_{3A}-e_{4A} \quad (6)$$

$$e_{67}=e_{6A}-e_{7A} \quad (7)$$

Si sumamos veremos que la caída de tensión a lo largo de cualquier línea cerrada es "cero", debido a la naturaleza de las variables elegidas, que sean cuales sean sus valores cumplen con la segunda ley de Kirchhoff, por lo tanto esta segunda ley no introduce condición alguna en la caída de tensión de un nudo, respecto al de referencia, "e_{nA}".

Para obtener la intensidad por rama vamos a plantear en los distintos nudos la primera ley de Kirchhoff. Para ello observemos la figura 1 y tomemos como nudo genérico de la red el "7". Aplicamos el siguiente criterio:

- Corriente entrante en el nudo "7" debido a las fuentes (si son aporte de energía en dicho nudo como en un centro de transformación será positiva, si es un consumo será negativa) es igual a la corriente saliente por los elementos pasivos. Esto no es otra cosa que un criterio de signos (se puede tomar cualquier otro criterio).

Según lo dicho, se tiene para el nudo "7":

$$i_{47} - i_{27} = Y_{17}(U_{7A} - U_{1A}) + Y_{37}(U_{7A} - U_{3A}) + Y_{57}(U_{7A} - U_{5A}) + Y_{67}(U_{7A} - U_{6A}) \qquad (8)$$

Desglosando y sacando factor común, se tiene:

$$(Y_{17} + Y_{37} + Y_{57} + Y_{67})U_{7A} + (-Y_{17})U_{1A} + (-Y_{37})U_{3A} + (-Y_{57})U_{5A} + (-Y_{67})U_{6A} = i_{47} - i_{27} \qquad (9)$$

Esta ecuación es la ecuación nodal para el nudo 7 y se interpreta de forma muy fácil. En el primer miembro de la igualdad se tiene, que el primer sumando lo constituyen la suma de todas las admitancias de las ramas que concurren en el nudo en estudio, por la caída de tensión de dicho nudo respecto al de referencia. Los siguientes sumandos negativos, los componen las admitancias de las ramas, unidas con el nudo en estudio, por la caída de tensión del otro nudo de la rama.

El otro miembro de la igualdad es la suma de las intensidades (cargas), exteriores que concurren en el nudo en estudio, es decir, serán físicamente los consumos o entradas de energía a la red en dicho nudo. Puede representarse en nuestro nudo como i_7.

Generalizando para todos los nudos de la red, se tendrá:

$$\begin{aligned} &Y_{11}e_1 + Y_{12}e_2 + \ldots\ldots + Y_{1N}e_N = i_1 \\ &Y_{21}e_1 + Y_{22}e_2 + \ldots\ldots + Y_{2N}e_N = i_2 \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &Y_{N1}e_1 + Y_{N2}e_2 + \ldots\ldots + Y_{NN}e_N = i_N \end{aligned} \qquad (10)$$

Expresando en forma matricial:

$$\begin{matrix} Y_{11} & Y_{12}\ldots\ldots\ldots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22}\ldots\ldots\ldots & Y_{2N} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & & \ldots \\ Y_{N1} & Y_{N2}\ldots\ldots\ldots & Y_{NN} \end{matrix} \begin{matrix} e_1 \\ e_2 \\ \ldots \\ e_N \end{matrix} = \begin{matrix} i_1 \\ i_2 \\ \ldots \\ i_N \end{matrix} \qquad (11)$$

donde:

Y_{NN}: Suma de admitancias de ramas que concurren en el nudo N (valor positivo).
Y_{N1}: Admitancia de la rama que contiene los nudos N y 1, (valor negativo) $Y_{N1}=Y_{1N}$.
e_N: Tensión del nudo "N" respecto al de referencia.
i_N: Suma de las intensidades exteriores en el nudo "N".

2.1.- Propiedades y ventajas del método matricial.

Vamos a resaltar algunas propiedades y ventajas del método matricial visto:

- El vector $i_1....i_N$, de cargas exteriores es conocido, pues son los receptores o centros de transformación conectados a nuestra red.
- La matriz de admitancia [Y] es muy fácil de constituir, además, es fácil de resolver, debido a las propiedades que presenta:

  - La matriz [Y] es diagonalmente dominante y definida positiva, por lo que no se precisan técnicas complicadas de pivotamiento.
  - La matriz [Y] es simétrica Yij=Yji, por lo que el número de operaciones se reduce a la mitad. Los nudos que no se unan entre ramas aportaran ceros a dicha matriz.
  - Existen técnicas de renumeración interna de los nudos que explotan los ceros de la matriz, haciendo que su resolución por el método de eliminación de Gauss sea muy rápido y simple.

- Una vez obtenidas las incógnitas $e_1.....e_N$, por el método de Gauss o métodos iterativos, las intensidades en cada rama se obtendrán como sigue, por ejemplo, para la rama entre los nudos i y j.

$$Iij=Yij(e_i-e_j) \qquad (12)$$

- También hay que señalar para finalizar, que podemos plantear las ecuaciones nodales para todos los nudos "N" de la red y para que el sistema sea determinado (recuérdese que debido a la ligadura exterior tan sólo se tienen N-1 ecuaciones independientes) podemos hacer intercambios de variables y en el nudo de referencia de caída de tensión, plantear como incógnita la intensidad exterior.

  Para que se comprenda mejor, se tiene como ejemplo, que en una red de distribución, con un centro de transformación que la alimenta, éste es el nudo que debemos tomar de referencia y sobre él, obtener las caídas de tensión de todos los nudos de la red, evidentemente este nudo tendrá tensión constante y lo que nos interesa es que nos de la intensidad o carga que aporta el sistema o red de distribución.

3.- CÁLCULO DE TENSIONES, INTENSIDADES Y FLUJO DE POTENCIAS EN UNA RED TRIFÁSICA POR MÉTODOS ITERATIVOS.

3.1.- Introducción.

La resolución de una red trifásica por un método iterativo parte de:

- Régimen permanente. Dadas Pg, Pc, calcular el flujo potencia por las líneas.
- Red lineal, parámetros concentrados. Modelo estático.
- Restricciones en los nudos no lineales (modelo no lineal de cargas)
  $\Rightarrow$ SOLUCIÓN ITERATIVA.
- Vector de estado (tensión compleja en todos los nudos).
- Magnitudes secundarias: flujo potencia, perdidas, etc..
- Rutinas más utilizadas:
  - Planificación: comparar alternativas de diseño.
  - Explotación: seguridad de red, despacho económico, estabilidad.

3.2.- Formulación básica.

La intensidades netas inyectadas en un nudos mediante un plateamiento nodal se puede expresar mediante las ecuaciones nodales:

$$I = Y_{nudo} E$$

$$I_i = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} E_j \quad (i=1.....n) \qquad (13)$$

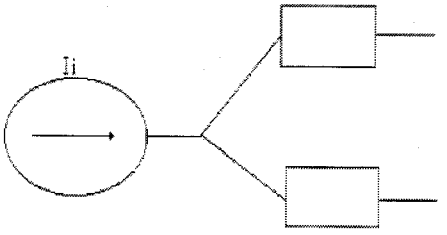


Figura 2. Nudo i de una red trifásica.

- **Restricción en cada nudo:**

$$S_i = E_i I_i^* \quad ; S_i \ (neta\ inyectada\ [generación-consumo]) \qquad (14)$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \ ; \ E_i = V_i^{\angle \theta_i} \ ; \ \theta_{ij} = \theta_i - \theta_j \qquad (15)$$

$$S_i^* = P_i - jQ_i = E_i^* \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} E_j \quad n\ ecuaciones\ complejas \qquad (16)$$

$$E_i = e_i + jf_i \qquad (17)$$

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{n} V_j [G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} sen\ \theta_{ij}]$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{n} V_j [G_{ij} sen\ \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}] \qquad (18)$$

"2n" reales (cartesianas)

- Ecuaciones algebraicas no lineales.
- P, Q, V,θ: conocidas 2 por nudo, es posible calcular las otras 2.

- **Grupos de variables:**
  - Parámetros: G, B.
  - Variables incontrolables: Pc, Qc } } α
  - Variables de control o independientes: Pg, Qg} y.
  - Variables de estado o dependientes: V,θ } X.

⇒ Conocidos α, y para unos valores supuestos de y se calcula X tal que:

$$g(\alpha, y, X) = 0 \qquad (19)$$

Se calcula con X flujos de potencia, intensidades, pérdidas, etc..

- **Problemas:**
  - No es posible especificar Pg en todos los nudos, las pérdidas de las líneas no se conocen a priori.
  - Los ángulos aparecen siempre como diferencias θij.

  ⇒ Solución: en un nudo liberamos P y fijamos θ(θ =0)

- **Tipos de nudos básicos:**
  - Nudos P-Q (o de carga):

$$Dato \begin{matrix} P=-P_c \\ Q=-Q_c \end{matrix} \text{ modelo de carga constante} \quad (20)$$

Incógnitas V, θ. 2 ecuaciones.

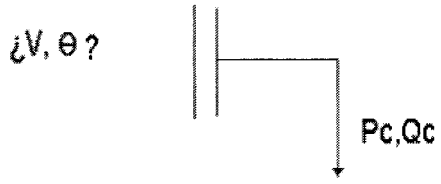


Figura 3. Nudo PQ.

  - Nudos P-V (o de generación):

$$Dato \begin{matrix} P=P_g-P_c=P^{esp} \\ V=V^{esp} \end{matrix} \quad (21)$$

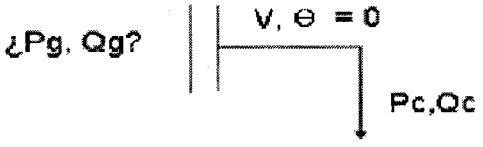


Figura 4. Nudo PV.

Incógnitas θ, Qg=Q+Qc. 1 ecuación (en polares).

  - Nudos de referencia (o slack): nudo P-V de gran capacidad:

    Incógnitas Qg, Pg. Ninguna ecuación.

  - Con la ecuación no utilizada para nudos P-V y las dos ecuaciones del slack, calculamos Pg (slack) y Qg.

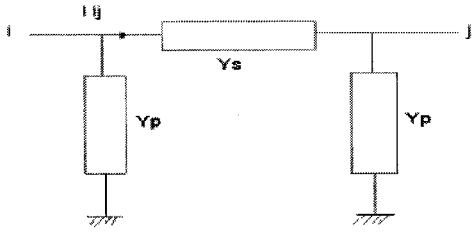


Figura 5. Flujo de corrientes por las líneas.

- **Pérdidas:**

$$P_{loss}=\sum_{i=1}^{n} P_i$$

$$Q_{loss}=\sum_{i=1}^{n} Q_i$$

- **Flujo por las líneas:**

$$I_{ij}=(E_i-E_j)Y_s+E_iY_p$$

$$S_{ij}=E_iI_{ij}^*$$

3.3.- MÉTODOS ITERATIVOS.

Los métodos iterativos se caracterizan por:

- Primer algoritmo de ordenador en 1956 (Ward-Mole).
- Numerosos métodos:
  - Basados en Z nudos.
  - Basados en Y nudos.
  - Newton-Raphson.
  - Métodos desacoplados.
  - Métodos de segundo orden.
- Lo más frecuente es formulación nodal y coordenadas polares.
- Valores iniciales influyen en el resultado final:
  - "flat start":

$$1^{\angle 0} \rightarrow en\ P-Q\ ;\ V^{esp\angle\Phi}\ en\ P-V \qquad (24)$$

  - Solución anterior [reparto de cargas].
- Criterios de convergencia:
  Decidir cuando la solución es suficientemente buena.

  - **1er Caso:**

$$\begin{aligned} |\Delta P_i| &= |P_i^{esp} - P_i^{\upsilon}| < \xi \\ |\Delta Q_i| &= |Q_i^{esp} - Q_i^{\upsilon}| < \xi \end{aligned} \qquad (\xi \approx 10^{-3}\ ;\ 10^{-4}\ p.u.) \qquad (25)$$

    - Interpretación física directa.
    - Costoso computacionalmente.
  - **2º Caso:**

$$|E_i^{\upsilon+1} - E_i^{\upsilon}| < \xi \qquad (26)$$

    - Requiere poco cálculo.
    - Sensible a la velocidad de convergencia.

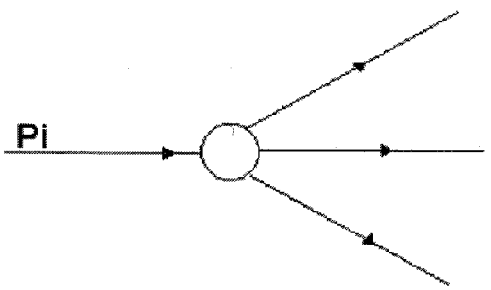


Figura 6. Flujo de potenicas en un nudo.

3.3.1.- Método de Gauss-Seidel.

Sus principales características son su simplicidad, es fácil de programar aunque presenta una pobre convergencia.

- **Ilustración, caso escalar:**

Queremos obtener la solución de una función f (x) = 0, para lo cual procederemos como sigue:

$$f(x)=0 \Rightarrow x=F(x) \quad x^0 \rightarrow x^{\xi+1}=F(x^{\upsilon}) \tag{27}$$

$$x^2-5x+4=0 \quad x=\frac{4}{5}+\frac{x^2}{5} \tag{28}$$

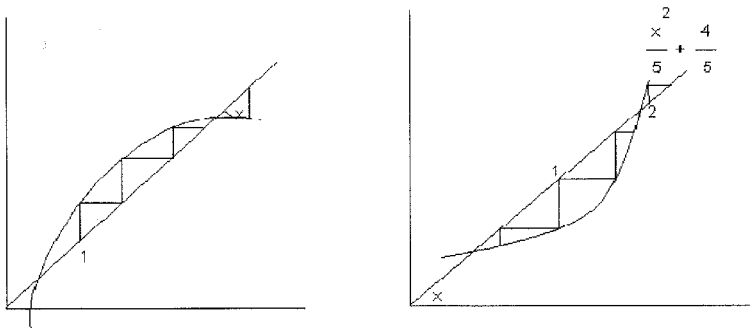


Figura 7. Aplicación del método de Gauss Seidel en el caso de una función escalar.

- **Aplicación al reparto de cargas** (1, nudo de referencia)**:**

$$S_i^*-E_i^*\sum Y_{ij}E_j=0$$

$$E_i=\frac{1}{Y_{ii}}\left[\frac{S_i^*}{E_i^*}-\sum_{j\neq i}^{n} Y_{ij}E_j\right] \quad i=1,2.....n \tag{29}$$

Gauss-Jacobi:

$$E_i^{\upsilon+1}=\frac{1}{Y_{ii}}\left[\frac{P_i^{esp}-jQ_i^{esp}}{E_i^{*\upsilon}}-\sum_{j\neq i}^{n} Y_{ij}E_j^{\upsilon}\right] \quad i=2.....n \tag{30}$$

Gauss-Siedel:

$$E_i^{\upsilon+1}=\frac{1}{Y_{ii}}\left[\frac{P_i^{esp}-jQ_i^{esp}}{E_i^{*\upsilon}}-\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij}E_j^{\upsilon+1}-\sum_{j=i+1}^{n} Y_{ij}E_j^{\upsilon}\right] \quad i=2.....n \tag{31}$$

Test de convergencia:

$$Max_i|E_i^{\upsilon+1}-E_i^{\upsilon}|<\xi \tag{32}$$

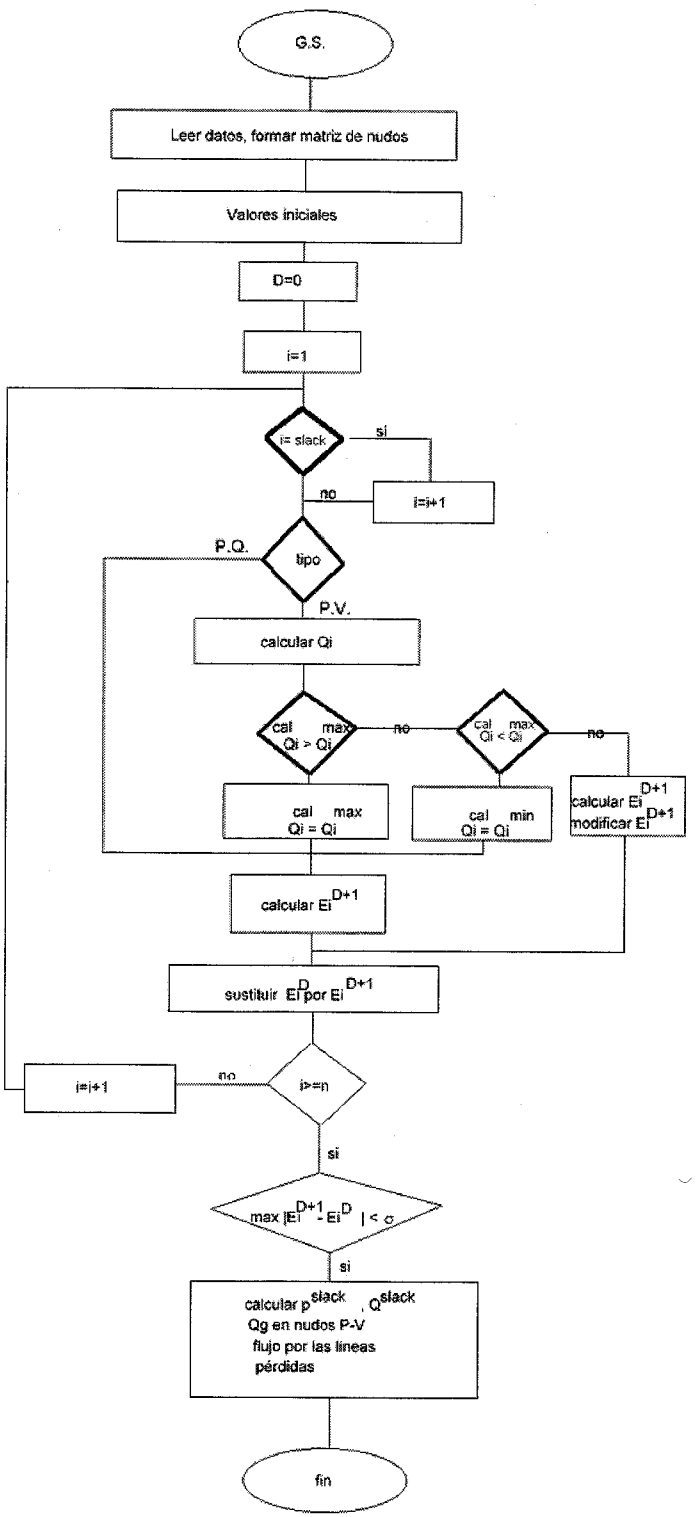


Figura 8. Esquema general del método de Gauss-Seidel para resolver una red eléctrica.

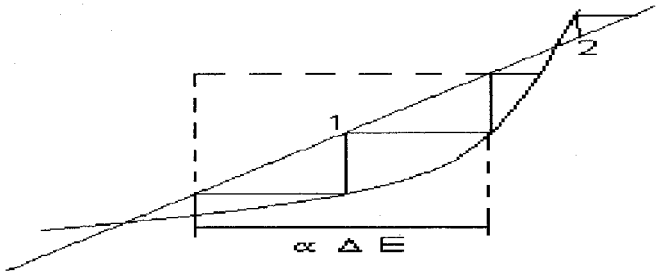


Figura 9. Uso de factor de aceleración.

Se pueden utilizar factores de aceleración para converger a la solución rápidamente.

$$E_i^{\upsilon+1} = E_i^{\upsilon} + \alpha[E_i^{\upsilon+1} - E_i^{\upsilon}] \qquad (33)$$

TEMA 13. INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN EDIFICIOS INDUSTRIALES Y COMERCIALES

1.- INTRODUCCIÓN.

En este tipo de instalaciones podemos englobar cualquier instalación eléctrica destinada a un sólo abonado (para distinguirla de instalaciones eléctricas en edificios destinados principalmente a viviendas).

El proyectista suele intervenir más en el diseño de estas instalaciones (no vienen tan prefijadas como en edificios destinados principalmente a viviendas). Ésta deberán adaptarse a la normativa especial según el tipo de local o emplazamiento, así por ejemplo, habrá que tener especial cuidado en el cumplimiento de la MIE BT 025 (Instalaciones en locales de publica concurrencia), MIE BT 026 (Prescripciones particulares para las instalaciones en locales con riesgo de incendio o explosión), MIE BT 027 (Instalaciones en locales de características especiales).

2.- LOCALES DE PÚBLICA CONCURRENCIA.

Esta definición comprende los siguientes edificios:

1. Locales de espectáculo. Se incluyen en este grupo toda clase de locales destinados a espectáculos cualquiera que sea su capacidad.

2. Locales de reunión. Se incluyen en este grupo los centros de enseñanza con elevado número de alumnos, iglesias, salas de conferencias, salas de baile, hoteles, restaurantes, cafés, bibliotecas, museos, casinos, aeropuertos, estaciones de viajeros, estacionamientos subterráneos, establecimientos comerciales o de servicios y, en general, todos los locales con gran afluencia de publico.

3. Establecimientos sanitarios. Se incluyen en este grupo los hospitales, sanatorios, ambulatorios y, en general, todo local destinado a fines análogos.

Mención particular merecen, para este tipo de edificios, los alumbrados especiales (emergencia, señalización y reemplazamiento), con los que es obligado dotar a todos ellos, pues tienen por objeto asegurar, aun faltando el alumbrado general, la iluminación en los locales y accesos hasta las salidas, para una eventual evacuación del público, o iluminar otros puntos que se señalen (quirófano, etc.).

Como complemento a esta instrucción, para los alumbrados especiales, existe la NBE CPI-96 (Condiciones de protección contra incendios en los edificios), en la que se recoge su normativa particular para este tipo de locales.

El resto de prescripciones, tanto generales como complementarias para cada tipo de establecimiento, se pueden observar en la Instrucción MIE BT 025.

3.- LOCALES CON RIESGO DE INCENDIO O EXPLOSIÓN.

Se consideran emplazamientos con riesgo de incendio o explosión todos aquellos en los que se fabriquen, procesen, manipulen, traten, utilicen o almacenen sustancias sólidas, líquidas o gaseosas, susceptibles de inflamarse o de hacer explosión, al coincidir una atmósfera explosiva y una fuente de ignición de origen eléctrico (chispas, arcos y temperaturas superficiales del material eléctrico), incluyendo también la electricidad estática.

Para establecer los requisitos que han de satisfacer los distintos elementos constitutivos de la instalación eléctrica en emplazamientos peligrosos, estos se clasifican:

1. Emplazamientos de clase I.
Son aquellos lugares en los que hay o puede haber gases, vapores o nieblas en cantidad suficiente para producir atmósferas explosivas o inflamables. Como ejemplos tenemos, las estaciones de servicio, garajes y talleres de reparación de vehículos, cabinas de pintura donde se utilicen pistolas de pulverización, emplazamientos en los que existan tanques o recipientes abiertos que contengan líquidos inflamables, etc..

2. Emplazamientos de clase II.
Son aquellos lugares en los que el riesgo se debe a la presencia de polvo combustible, excluyendo los explosivos propiamente dichos. Como ejemplos más representativos tenemos, zonas de trabajo en plantas de manipulación y almacenamiento de cereales, salas que contienen máquinas o equipos productores de polvo en instalaciones de tratamiento de grano, fertilizantes, etc..

3. Emplazamiento de clase III.
Son aquellos en los que el riesgo se debe a la presencia de fibras o materiales volátiles fácilmente inflamables, pero en los que no es probable que estas fibras o materias volátiles estén en suspensión en el aire en cantidad suficiente como para producir atmósferas explosivas. Como ejemplos podemos destacar, las zonas de plantas textiles del rayon, algodón, entre otros, plantas de fabricación y procesado de fibras combustibles, talleres de confección, carpinterías, etc..

Por otra parte, para la selección del material eléctrico apropiado para el emplazamiento peligroso, nos basaremos en los siguientes criterios:

- a) *Clasificación del emplazamiento.*

- b) *Selección del material eléctrico con relación a la temperatura de ignición.*

El material eléctrico será seleccionado de tal modo que se asegure que su temperatura máxima superficial no exceda la temperatura de ignición de los gases, vapores, polvos o fibras que puedan estar presentes.

La relación entre la temperatura del material eléctrico o partes del mismo con su temperatura superficial máxima y la temperatura de ignición de los gases y vapores se muestra en la tabla adjunta:

Clase de temperatura del material eléctrico	Temp. superficial máxima del material eléctrico	Temp. de ignición de gas o vapor
T1	< 450ºC	> 450ºC
T2	< 300ºC	> 300ºC
T3	< 200ºC	> 200ºC
T4	< 135ºC	> 135ºC
T5	< 100ºC	> 100ºC
T6	< 85ºC	> 85ºC

Tabla 1. Selección del material eléctrico.

- c) Selección del material eléctrico en función de los grupos IIA, IIB, IIC.

La elección del grupo apropiado de la envolvente antideflagrante y del material e instalaciones de seguridad intrínseca se hará teniendo el grupo de gas y vapor indicado en las normas que definen estos modos de protección.

- d) Influencias externas.

Los materiales eléctricos estarán protegidos contra las influencias externas (por ejemplo, químicas, mecánicas y térmicas). Las exigencias de construcción asegurarán la conservación del modo de protección cuando el material se utilice en las condiciones especificas de servicio.

- e) Temperatura ambiente.

El material eléctrico será utilizado en la gama de temperaturas para las que se ha diseñado y que deberá incluirse en su marcado. Si no se da ninguna referencia se considera que el margen de utilización está comprendido entre -20ºC y 40ºC. Otras temperaturas deberán indicarse expresamente en el certificado del laboratorio.

Todas las demás prescripciones, generales y complementarias para cada tipo de emplazamiento, se pueden observar en la MIE BT 026.

4.- LOCALES DE CARACTERÍSTICAS ESPECIALES.

Esta definición comprende los siguientes grupos:

4.1.- Locales húmedos.

Son aquellos cuyas condiciones ambientales se manifiestan momentáneamente o permanentemente bajo la forma de condensación en el techo y paredes, manchas salinas o moho aún cuando no aparezcan gotas, ni el techo o paredes estén impregnados de agua. Las canalizaciones podrán estar constituidas por:

- Conductores rígidos aislados, de 750 V de tensión nominal, como mínimo, bajo tubos protectores.
- Conductores flexibles, aislados, de 440 V de tensión nominal, como mínimo, colocados sobre aisladores.

- Conductores rígidos aislados armados, de 1.000 V de tensión nominal, como mínimo, fijados directamente sobre las paredes o colocados en el interior de huecos de la construcción.

Las cajas de conexión, interruptores, tomas de corriente y, en general toda la aparamenta utilizada, deberán presentar el grado de protección correspondiente a la caída vertical de gotas de agua. Sus cubiertas y las partes accesibles de los órganos de accionamiento no serán metálicos.

4.2.- Locales mojados.

Son aquellos en que los suelos, techos y paredes estén o puedan estar impregnados de humedad y donde se vean aparecer, aunque sólo sea temporalmente, lodo o gotas gruesas de agua debido a la condensación o bien estar cubiertos con vaho durante largos periodos.

Se consideran como locales o emplazamientos mojados los establecimientos de baños, los cuartos de duchas o para uso colectivo, los lavaderos público, las cámaras frigorificas, et., así como las instalaciones a la intemperie.

Para el sistema de canalizaciones se seguirá la instrucción especificada anteriormente. Se recomienda instalar los aparatos de mando y protección y tomas de corriente, fuera de estos locales. Cuando no se pueda cumplir esta recomendación, los citados aparatos, y en general toda la aparamenta eléctrica, serán del tipo protegido contra las proyecciones de agua, o bien se instalarán en el interior de cajas que les proporcionen una protección equivalente.

4.3.- Instalación en locales con riesgo de corrosión.

Son aquellos en los que existen gases o vapores que puedan atacar a los materiales eléctricos utilizados en la instalación.

Se consideran como locales con riesgo de corrosión: las fábricas de productos químicos, depósitos de éstos, etc..

En estos locales o emplazamientos se cumplirán las prescripciones señaladas para las instalaciones en locales mojados, debiendo protegerse, además, la parte exterior de los aparatos y canalizaciones con un revestimiento inalterable a la acción de dichos gases o vapores.

4.4.- Instalación en locales polvorientos sin riesgo de incendio ó explosión.

Son aquellos en que los equipos eléctricos están expuestos al contacto con el polvo en cantidad suficiente como para producir su deterioro o un defecto de aislamiento.

En estos locales queda prohibido el uso de conductores desnudos, presentando además, todo el material eléctrico el grado de protección que su emplazamiento exija.

4.5.- Instalaciones en locales a temperatura elevada.

Son aquellos donde la temperatura del aire ambiente es susceptible de sobrepasar frecuentemente los 40 grados centígrados, o bien se mantiene permanentemente por encima de los 35 grados centígrados.

Podrán utilizarse los conductores aislados con materias plásticas o elastómera para una temperatura ambiente de hasta 50º C, pues para temperaturas ambientes superiores se utilizarán conductores especiales con un aislamiento que presente una mayor estabilidad térmica, y los conductores desnudos sobre aisladores. Además, toda la aparamenta utilizada deberá soportar los esfuerzos resultantes a que se van a ver sometidos debido a las condiciones ambientales.

4.6.- Instalaciones en locales a muy baja temperatura.

Son aquellos donde puedan presentarse y mantenerse temperaturas ambientales inferiores a -20ºC, como cámaras de congelación.

El aislamiento y demás elementos de protección del material eléctrico utilizado, deberá ser tal que no sufra deterioro alguno a la temperatura de utilización.

4.7.- Instalaciones en locales en que existan baterías de acumuladores.

Los locales en que deban disponerse baterías de acumuladores con posibilidad de desprendimiento de gases, se considerarán como locales o emplazamientos con riesgo de corrosión, debiendo cumplir, además de las prescripciones señaladas para estos locales, las señaladas en la MIE BT 027, apartado 7.

4.8.- Instalaciones en locales afectos a un servicio eléctrico.

Son aquellos que se destinan a la explotación de instalaciones eléctricas y, en general, sólo tienen acceso a los mismos personas cualificadas para ello, tales como centros de transformación, laboratorios de ensayo, salas de mando y distribución en locales independientes de las salas de máquinas de centrales, etc.. Cumplirán las condiciones señaladas en la MIE BT 027, apartado 8.

4.9.- Instalaciones en estaciones de servicio garajes y talleres de reparación de vehículos.

Se consideran como estaciones de servicio, los locales o emplazamientos donde se efectúan trasvases de gasolina, otros líquidos volátiles inflamables o gases licuados inflamables, a vehículos automóviles.

Como garajes se consideran aquellos locales en que puedan estar almacenados más de tres vehículos al mismo tiempo. Como talleres de reparación de vehículos se consideran los locales utilizados para la reparación y servicio de vehículos automóviles, sean estos de

pasajeros, camiones, tractores, etc., y para los cuales se empleen como combustible líquidos o gases volátiles inflamables.

Para las instalaciones eléctricas de los locales anteriormente citados se tendrán en cuenta los volúmenes peligrosos que a continuación se señalan:

- En relación con suelos que estén al nivel de la calle o por encima de ésta el volumen peligroso será el comprendido entre el suelo y un plano situado a 0,60 m sobre el mismo.
- En relación con suelos situados por debajo del nivel de la calle, el volumen peligroso será el comprendido entre el suelo y un plano situado a 0,60 m por encima de la parte mas baja de las puertas exteriores o de otras aperturas para ventilación que den al exterior por encima del suelo. Cuando a juicio de la Delegación Provincial correspondiente del Ministerio de Industria, la ventilación de estos locales este suficientemente asegurada, podrá considerarse únicamente como volumen peligroso el limitado por un plano situado a 0,60 m del suelo del local, o sea, considerar como volumen peligroso el mismo al especificado en el apartado anterior, aún estando por debajo del nivel de la calle.

La ventilación de estos locales, consideramos que está suficientemente asegurada cuando nos adaptemos a alguno de los dos casos siguientes:

- Ventilación natural: Admisible solamente en garajes con fachada al exterior en semisótano o con "patio inglés". En este caso, las aperturas para ventilación deberán ser permanentes, independientes de las entradas de acceso, y con una superficie mínima de comunicación al exterior de 0,5 por ciento de la superficie del local de garaje.
- Ventilación forzada: Para todos los demás casos, o sea, para garajes en sótanos. En estos casos la ventilación será suficiente cuando se asegure una renovación mínima de aire de 15 m^3/h de superficie del garaje. El caudal de ventilación por planta se repartirá, como mínimo, entre dos dispositivos o tomas de ventilación independientes. Cuando la superficie del local en su conjunto sea superior a 1.000 m^2, en los aparcamientos públicos, debe asegurarse el funcionamiento de los dispositivos de renovación del aire, con un suministro complementario, siendo obligatorio disponer de aparatos detectores de CO que accionen automáticamente la instalación de ventilación.

Las instalaciones y equipos destinados a estos locales cumplirán las siguientes prescripciones:

- Los volúmenes peligrosos serán considerados como locales con riesgo de Clase 1, División 1, y en consecuencia, las instalaciones y equipos destinados a estos volúmenes deberán cumplir las prescripciones señaladas en la Instrucción MIE BT 026 para estos locales.
- Las canalizaciones situadas por encima de los volúmenes peligrosos podrán realizarse mediante conductores aislados bajo tubos rígidos blindados (pueden incluirse en esta definición los conductores de material plástico que ofrezcan un grado de protección 7 ó 9, según UNE 20.324) en montaje superficial o bien bajo tubos de otras características en montaje empotrado, Igualmente podrán establecerse las canalizaciones con conductores aislados armados, directamente sobre las paredes o no armados, en huecos de la construcción, cuando estos huecos presenten suficiente resistencia mecánica.
- Se colocarán cierres herméticos en las canalizaciones que atraviesan los límites verticales u horizontales de los volúmenes definidos como peligrosos.

- Las tomas de corriente e interruptores se colocarán a una altura mínima de 1,50 metros sobre el suelo a nos ser que presenten una cubierta especialmente resistente a las acciones mecánicas.

Estos locales pueden presentar también, total o parcialmente, las características de un local húmedo o mojado y, en tal caso, deberán satisfacer igualmente lo señalado para las instalaciones eléctricas en éstos. No obstante, más amplia información para este tipo de Locales Especiales se puede observar en la Instrucción MIE BT 027.

5.- CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE EDIFICIOS Y LOCALES ESPECÍFICOS.

5.1.- Edificios de oficinas.

Además de la forma y tipo de construcción (la mayoría de las veces edificios de gran altura de hormigón armado) y de las exigencias en cuanto a la seguridad y rentabilidad de servicio, deben considerarse adicionalmente las especificaciones que emiten las autoridades para el proyecto del abastecimiento de energía eléctrica. Las disposiciones exigen, por ejemplo, para los edificios de gran altura, instalaciones auxiliares de alimentación de energía eléctrica, que asuman el abastecimiento de los equipos de seguridad en caso de fallar la red. Tales equipos son, por ejemplo, bombas de desagüe y de impulsión, válvulas de extracción de humos, instalaciones de ventilación, ascensores, partes de la instalación de la iluminación y sistemas de alarmas y señalización.

En el tipo de construcción más usual hoy en día no pueden instalarse las líneas de distribución de corriente eléctrica en las paredes exteriores o en los tabiques deslizables. Los canales de las líneas dispuestas bajo las ventanas o los sistemas de alimentación dispuestos bajo el piso sirven para la conducción de los cables y para el montaje de los accesorios correspondientes. Las redes de iluminación y otros sistemas de abastecimiento se instalan en el falso techo. Siempre que sean necesarios pasamuros para el tendido de líneas en muros de protección contra incendios, deben sellarse de nuevo para garantizarse la clase de protección aplicada al muro.

Para la conexión de aparatos de alumbrado puede utilizarse en el falso techo el sistema de montaje rápido. Con ayuda de este sistema pueden instalarse todos los circuitos de alimentación (incluso los de corriente trifásica) como también los de conexión de los aparatos de alumbrado, sin que sea necesario establecer uniones atornilladas.

5.2.- Hoteles.

Entre las comodidades que hoy día espera generalmente el huésped de un hotel, las instalaciones eléctricas desempeñan un papel especial. Por una parte, el huésped percibe su efecto directamente (por ejemplo, la iluminación y climatización) y, por otra, es el beneficiario indirecto, sea por los equipos técnicos en el ámbito económico o en el campo de las telecomunicaciones. Esto está inevitablemente asociado a un abastecimiento de energía muy ramificado y seguro.

El abastecimiento y distribución de energía eléctrica presentan las características típicas de los grandes edificios: transformadores de distribución en los centros de carga de las plantas

bajas y (en hoteles tipo rascacielos) eventualmente, en la planta alta, si en dicha planta se encontrarán igualmente consumidores eléctricos de gran potencia.

Es necesario, para la protección de personas y bienes, el servicio de las instalaciones de seguridad y abastecimiento incluso en caso de fallar la red general de alimentación. Entre estos equipos cabe contar, entre otros, la bomba de impulsión para el abastecimiento de agua, sectores de las instalaciones de ascensores y ventilación, el sistema de balizamiento, por ejemplo, en edificios de gran altura, y la iluminación de seguridad de la escalera, corredores y los grandes recintos de huéspedes y reuniones.

En grandes hoteles se recomienda instalar un grupo electrógeno, de forma que, además de los grupos de consumidores anteriormente mencionados, puedan conectarsetambién al grupo parte de la cocina, recintos frigoríficos, una parte del alumbrado de las habitaciones y los aparatos de alimentación para las instalaciones telefónicas y de señalización.

La iluminación general de las habitaciones de huéspedes debe poder gobernarse desde la puerta y desde la cama. Para ello son apropiadas las lámparas fluorescentes que, por ejemplo, pueden instalarse tras las cortinas. Cuando se utilicen lámparas fluorescentes debe prestarse atención al color de la luz. Además, la iluminación se complementa con lámparas decorativas de pared, de pie o de mesa, así como con focos de radiación vertical empotrados en el techo.

En el cuarto de baño y en el vestíbulo debe disponerse la iluminación a ambos lados del espejo, a la altura de la cabeza, para evitar sombras molestas en la cara.

Para los aparatos eléctricos que desee utilizar el huésped en su habitación deben preverse en las proximidades de la mesa-escritorio y de las camas otras bases de enchufe además de las correspondientes conexiones para radio, televisión y aparatos de limpieza.

La iluminación y las bases de enchufe en las habitaciones de huéspedes deben alimentarse de circuitos diferentes. La base de enchufe en el cuarto de baño para la máquina de afeitar, con transformador de separación incorporado, incrementa la seguridad protegiendo contra contactos indirectos y permite enchufar aparatos de afeitado con diferentes conectores.

La sala de recepción es la tarjeta de visita del hotel. En la recepción, punto de contacto más importante entre el personal del hotel y los huéspedes, la iluminación debe ser clara y no ocasionar deslumbramientos. La iluminación general del hall puede mantenerse relativamente baja, a fin de que la iluminación adicional de los tresillos, por ejemplo, lámparas de pie o focos empotrados de radiación vertical, le den al huésped la sensación de intimidad.

En el restaurante se eligen preferentemente, para iluminar cada mesa, focos de radiación vertical. La gran proporción de luz dirigida refuerza el efecto festivo de cristalería y objetos de plata. Para esta parte de la iluminación se emplean lámparas de incandescencia, mientras que para la iluminación general complementaria son idóneas también las fluorescentes.

En los cafés y bares espera el huésped una atmósfera especial, a la que debe adaptarse también la luz en el local. El alumbrado general debe ser tenue y estar complementado por múltiples efectos conseguidos por medio de focos pequeños con filtros de colores, reflectores ultravioletas (dirigidos hacia cuadros y decorados fluorescentes), pistas de baile luminosas, etc..

En las salas de conferencias y reuniones debe preverse un sistema de control de la iluminación general para poderla adaptar a las diferentes circunstancias. La proyección de películas, diapositivas o transparencias, así como la reproducción de cintas de vídeo, exigen una intensidad de iluminación apropiada. Se recomienda el empleo de lámparas fluorescentes. Desde el puesto central de control debe poderse gobernar además del sistema de iluminación, también las persianas o pantallas para impedir la entrada de la luz por las ventanas. Debe preverse un número suficiente de bases de enchufe para la conexión de los aparatos proyectores. Es importante una disposición conveniente de las tomas, que evite en lo posible el tener que utilizar cables de prolongación.

Las salas de fiestas tienen una utilización variada: bailes, desfiles de moda, conferencias, exposiciones o conciertos exigen diferentes modos de iluminación, además de otras instalaciones eléctricas. Cada organizador se sirve de distintos grupos de iluminación. Además, debiera preverse un sistema de control de luces, por ejemplo, para conciertos o representaciones de teatro. En caso de que los focos para el escenario o los reflectores de efectos no formen parte de la instalación fija, se preverán para su conexión temporal circuitos de enchufe en suficiente cantidad y potencia, provistos de control.

Los corredores y escalera no sólo deben iluminarse de un modo práctico, sino al mismo tiempo decorativo. La disposición y modo de conexión de los aparatos de alumbrado debe elegirse de tal forma que por la noche pueda permanecer en servicio una parte de la misma como iluminación nocturna. El abastecimiento de esta iluminación reducida puede conmutarse, junto con la iluminación de seguridad, automáticamente al abastecimiento auxiliar de energía eléctrica, garantizando así, en caso de fallo de la red, una buena iluminación de las zonas de tránsito. Los interruptores o pulsadores en los corredores y escaleras deben preverse con símbolos luminosos, que permitan ser encontrados fácilmente por los huéspedes.

Sobre todo para fines de limpieza debe preverse en corredores y escaleras un número suficiente de cajas de enchufe. Para la iluminación y los enchufes se dispondrán circuitos independientes de los instalados en las habitaciones de los huéspedes.

Las cocinas de los hoteles se consideran recintos húmedos. Debido a la humedad y al peligro de corrosión se utilizarán aparatos en carcasas plásticas de aislamiento. Seguridad y limpieza exigen una alta intensidad de iluminación. En las cámaras frigoríficas basta un alumbrado de poca intensidad. Muchas veces se emplean lámparas incandescentes, que, a diferencia de las fluorescentes, pueden funcionar incluso a muy baja temperatura sin medios adicionales. En el entrepaño de la puerta es preciso prever un caldeo eléctrico mediante cable de calefacción para evitar deterioros por formación de hielo.

- ***Locales de servicio:***

Las cocinas, despensas y cámaras frigoríficas forman frecuentemente una unidad; se conectan a una distribución común que, debido al gran consumo de potencia, se alimenta directamente desde el cuadro eléctrico principal de baja tensión. Debido a la humedad y al peligro de corrosión conviene utilizar distribuciones con carcasas de material aislante. En caso de fallo de la red, el abastecimiento auxiliar de energía eléctrica debe alimentar una parte de la instalación eléctrica de la cocina, cámara frigorífica e iluminación, para poder seguir atendiendo a los huéspedes sin limitaciones considerables.

Además de los circuitos para los consumidores fijos deben instalarse circuitos de enchufes de corriente alterna y trifásica para la conexión de aparatos manuales. Para la conexión de aparatos de cocina fijos han dado buen resultado los sistemas instalados bajo el piso. Mediante una instalación práctica de canales longitudinales y transversales, en disposición reticular, pueden conectarse los aparatos prácticamente en cualquier lugar.

5.3.- Hospitales.

Los hospitales cuentan siempre con importantes instalaciones eléctricas, que junto con el tratamiento médico, contribuyen a la atención general de pacientes y personal (cocina, lavandería, etc.). Según el tamaño del hospital (el número de camas es una buena referencia) y el volumen de las instalaciones eléctricas, varía también la potencia necesaria. A mayor número de camas, disminuye la potencia específica necesaria por cama.

La seguridad en el suministro de energía eléctrica en un hospital es particularmente importante. Por eso se recomienda, incluso en pequeños hospitales, el suministro a través de varios transformadores, a fin de que el hospital siga abasteciéndose de la red pública, incluso en el caso de que se averíe uno de ellos.

Mientras que para los recintos generales del hospital, por ejemplo, la administración, cocina, lavandería y residencia de enfermeras, se aplica una determinada normativa para los recintos destinados a fines médicos rigen, además, disposiciones complementarias.

La clasificación de un recinto destinado a fines médicos depende también del tipo de utilización médica que de él se haga. Así, por ejemplo, a la unidad de vigilancia intensiva puede aplicársele cualquiera de las tres categorías.

En las líneas para instalaciones de rayos X no debe sobrepasarse la resistencia máxima indicada por el fabricante. Igualmente han de tenerse en cuenta las indicaciones del fabricante sobre los órganos de protección contra sobreintensidades. La instalación de rayos X se conecta directamente al cuadro eléctrico principal de baja tensión. Así se impide una influencia perturbadora sobre otros receptores, a causa del servicio pulsatorio de los equipos de rayos X. Más efectivo todavía resulta alimentar el equipo de rayos X mediante un transformador propio.

El abastecimiento general de emergencia debe garantizar, en caso de avería de la red, que las instalaciones eléctricas más importantes en todas las áreas funcionales del hospital puedan continuar su servicio. Debe diferenciarse de los "grupos especiales de emergencia" para los equipos médicos de los que pueda depender la vida de los pacientes. En caso de avería de la red, alimenta total o parcialmente:

- La iluminación de las vías de comunicación interiores y exteriores del edificio.
- La iluminación general de las habitaciones para fines médicos.
- Los ascensores; entre ellos, como mínimo, 1 para camas.
- Las instalaciones de seguridad y de abastecimiento (por ejemplo, abastecimiento médico de gases).

- Los sistemas de llamada y señalización.
- Los equipos de rayos X y de esterilización.
- Las cocinas de las estaciones.
- La cocina principal con las instalaciones de refrigeración.
- Las bombas contra incendios.
- Las instalaciones de calefacción.
- Las instalaciones de ventilación.

Debido a su especial dependencia de un suministro de reserva seguro se exigen requisitos adicionales en quirófanos y en unidades de tratamiento y vigilancia intensivos. Estos se refieren a la alimentación de los aparatos eléctricos, que, caso de fallar éstospor perturbaciones en la instalación eléctrica, puedan poner en peligro la vida del paciente.

Al proyectar este suministro de emergencia especial, debe consultarse al hospital el número y potencia de dichos aparatos. En caso de que no se utilicen éstos, a pesar de ello, deberá fijarse un lugar para la instalación de la fuente de energía especial, a fin de que sea posible una futura inclusión de la misma, sin tener que modificar la obra civil ni realizar grandes gastos, considerando que la ubicación debe encontrarse en la proximidad de los receptores, por ejemplo, en la planta bajo los quirófanos. En caso contrario, y si resultara necesario un emplazamiento futuro, difícilmente podría encontrarse un lugar idóneo para este grupo especial: (batería con onduladores o grupos electrógenos diesel, cuadro eléctrico, tanque de combustible, alimentación de aire y escape de gases).

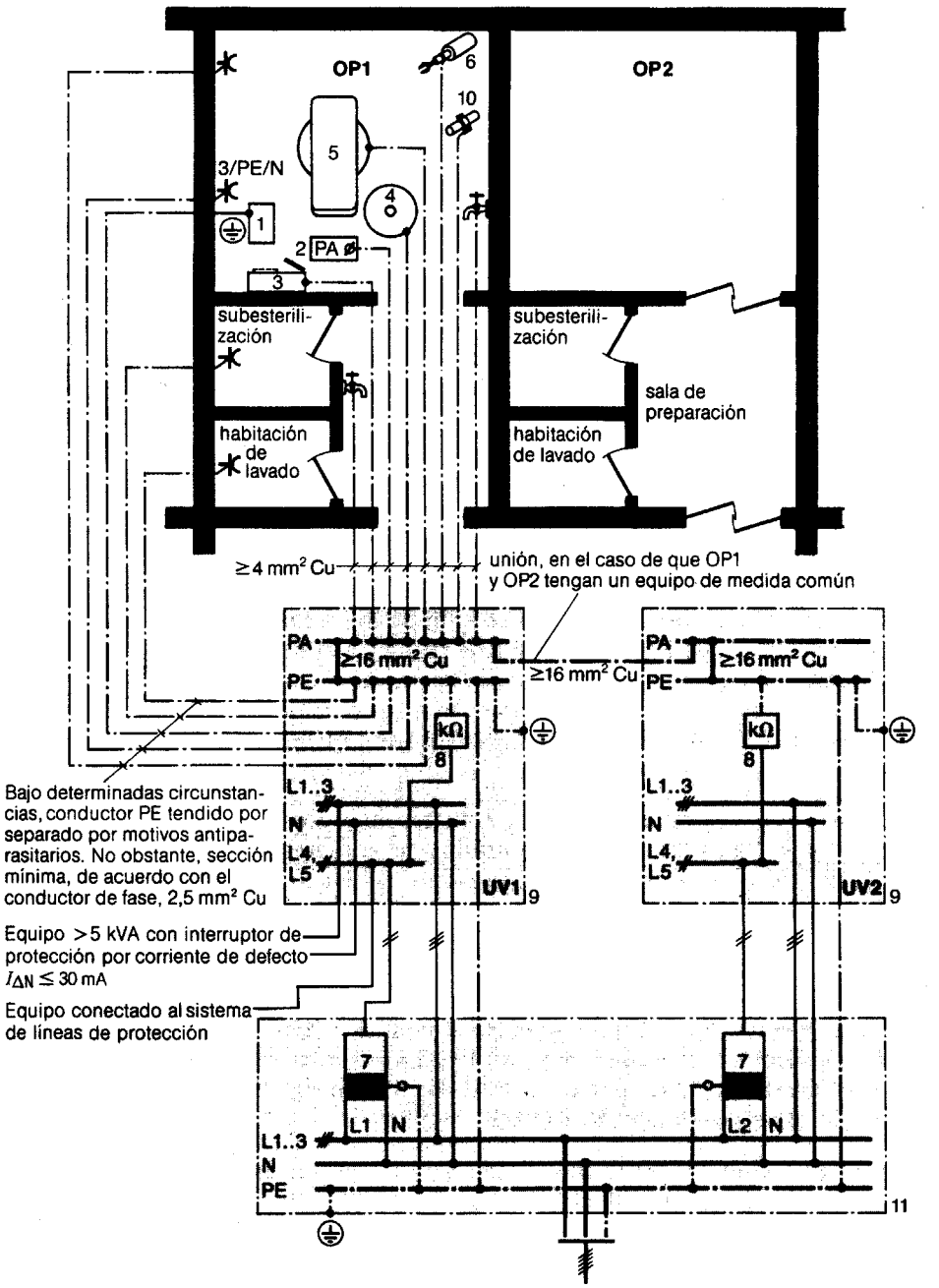
Las líneas ascendentes para este suministro de emergencia especial deben instalarse separadas de los restantes cables de la red de distribución, a fin de que éstas, en caso de incendio en el canal de líneas, permanezcan en servicio.

Para evitar perturbaciones debidas a campos eléctricos basta generalmente con utilizar tubos blindados de acero, para los cables de energía en los recintos mencionados, o tender cables con envoltura metálica. Los tubos blindados deben enlazarse con uniones conductoras y conectarse al conductor de compensación de potencial. Las cajas de plástico situadas a lo largo de las líneas o tubos no reducen de forma significativa el efecto antiparasitario.

5.4.- Teatros y edificios culturales.

Las instalaciones eléctricas en teatros pueden presentar grandes diferencias en su envergadura y composición. Esto depende sobre todo del gran abanico de condiciones exigidas, que en el caso de modestos teatros de colegio y de aficionados son diferentes de las correspondientes a un teatro u ópera de una gran ciudad. Además, ha de tenerse en cuenta que muchos teatros no sólo se utilizan para representaciones escénicas, sino también para conciertos, e incluso bajo determinadas circunstancias para shows y exhibiciones deportivas.

Para teatros mayores con una demanda de energía eléctrica superior a 50 kVA, es usual la alimentación en alta tensión.



1 Aparato de rayos X o equipo ≥ 5 kVA
2 Dispositivo de conexión para la compensación de potencial (PA)
3 Armario metálico instrumental con una resistencia <2,4 MΩ respecto al conductor PE
4 Lámpara de operación
5 Mesa de operación
6 Apantallamiento del cable
7 Transformador para el sistema de líneas de protección con apantallamiento estático
8 Equipo de vigilancia del aislamiento
9 Subdistribución para el quirófano (en las proximidades de éste)
10 Instalación de gas, agua y calefacción
11 Distribución intermedia

Figura 1. Instalación eléctrica de un quirófano.

Debido a que el receptor principal (la instalación de iluminación escénica) contiene un sistema de control de luces por cada circuito, se prefiere la red radial para el lado de baja tensión. Los equipos de control se reúnen en una sala central, desde donde parten las líneas de una longitud aproximada de 10 a 100 m, directamente hasta los receptores. La distribución principal de baja tensión contiene las derivaciones para cada uno de los grupos de receptores, por ejemplo:

- Instalaciones de fuerza, tales como maquinaria del escenario, instalación de ventilación y climatización, ascensores, conexiones adicionales de fuerza e instalaciones de calefacción.
- Alumbrado:
  - en el recinto de espectadores: iluminación general con instalaciones exteriores (por ejemplo, salas de descanso, corredores, escaleras), sala de espectadores;
  - en el recinto escénico iluminación general, iluminación del escenario, iluminación de trabajo, vestuarios, talleres y almacenes;
  - iluminación de seguridad.

Las derivaciones han de disponerse de forma clara. Cada línea de salida ha de poderse desconectar por separado. Es admisible el uso de un interruptor común a una o varias líneas, si ello fuera conveniente para el servicio.

La distribución principal de baja tensión ha de estructurarse de tal forma que el funcionamiento de las instalaciones de seguridad y equipos necesarios, tales como suministro de agua para el servicio de extinción de incendios, bombas, ascensores, instalaciones de ventilación y extractores de humos, esté asegurado también fuera del tiempo habitual de servicio.

La distribución principal de baja tensión debe ser accesible fácilmente y estar protegida contra incendios. La distribución para la iluminación de seguridad ha de separarse de las restantes instalaciones eléctricas, de forma que no pueda haber interacciones entre ellas, por efectos de arcos eléctricos. Para ello se emplea preferentemente un revestimiento de chapa.

Por medio de los interruptores de zona se reúnen los circuitos para los enchufes y la iluminación de los vestuarios y talleres, por ejemplo, en los talleres de pintura y sastrería. Desconectando al abandonar los recintos se elimina el peligro de incendio que supone el que algunos aparatos puedan quedar en funcionamiento. En instalaciones más pequeñas, con no más de 5 circuitos para receptores, basta en lugar del interruptor de zona, un interruptor principal dispuesto en la distribución. El circuito de iluminación general no se hace pasar a través del interruptor de zona.

Con excepción de los recintos escénicos, es admisible utilizar para la iluminación general de todas las partes del edificio, los cables y restantes materiales de tendido de uso general en grandes edificaciones. En todos los lugares accesibles a los espectadores, los cables han de tenderse de tal modo que en caso de incendio en el recinto escénico no queden afectados.

En los recintos escénicos pueden utilizarse, debido a la gran acumulación de cables para la instalación de la iluminación escénica (esto es una excepción dentro de la técnica de instalaciones) los cables de múltiples conductores para escenarios. Pueden contener varios circuitos y tienen que tenderse sobre revoque. Los cables de conductores paralelos no están autorizados en los recintos escénicos, exceptuando pequeños escenarios. Para la

iluminación general, así como para el alumbrado de seguridad en los recintos escénicos, son apropiados los cables con envoltura.

- ***Iluminación de escenarios:***

Sobre el escenario y en la sala de espectadores son necesarios, para la iluminación de la escena, innumerables receptores, luces cenitales, aparatos de proyección, luces de escena, etc., una parte de los cuales están montados sobre armazones fijos, mientras que otros están sobre soportes móviles (puentes, torres, etc.). Si se colocan directamente sobre el suelo del escenario deben disponerse preferentemente por detrás de los decorados.

A cada dispositivo de iluminación escénica se le asigna normalmente un circuito propio con control eléctrico. Según el tamaño del escenario, el número de estos circuitos puede ser de 100 a 500 o más. Los escenarios pequeños y los edificios culturales de usos múltiples tienen, por lo general, de 24 a 100 circuitos de ajuste. Entre los equipos de control y los puntos de conexión de los aparatos de iluminación escénica se instalan los cables de múltiples conductores antes mencionados.

Los aparatos de alumbrado móviles que se encuentran en el escenario suspendidos de barras y puentes de alumbrado, se conectan con cables planos en los que, de acuerdo con el número de circuitos, se cosen conductores de alambre fino de cobre con aislamiento para una tensión de prueba de 2 kV, sobre una lona para formar una banda conductora. Las bandas deben ser suficientemente largas a fin de que los aparatos de alumbrado puedan bajarse hasta una altura de un metro sobre el piso del escenario. Los cables planos, al izar los aparatos de alumbrado, se recogen en forma de lazos en el bastidor de almacenamiento.

Los aparatos de alumbrado se conectan con enchufes especiales (de hasta 63 A) a la instalación eléctrica del escenario. Dichos enchufes se componen de una caja de material aislante, a prueba de golpes, tienen un contacto de protección y llevan un dispositivo de enclavamiento para evitar que se desconecten inadvertidamente.

5.5.- Salas de exposición.

Las salas de exposición se utilizan para exhibir los objetos más diferentes. Debido a ello se establecen los más variados requisitos en cuanto a la configuración de la red eléctrica de alimentación y en cuanto a la seguridad de abastecimiento. Las salas de exposición se construyen usualmente sin prever la entrada de luz natural.
Las cargas más significativas son:

- El alumbrado general, con una carga específica por unidad de superficie de 10 W/m^2 para una intensidad aproximada de iluminación de 300 lux.
- Instalaciones de ventilación y extracción de aire, con una potencia especifica de acometida de 5 kW/1000 m^3 de volumen de la sala.
- Abastecimiento de los stands, con una potencia específica de 50 a 100 W/m^2, considerando una carga en superficie. Determinados objetos individuales pueden requerir, bajo determinadas circunstancias, un múltiplo de la potencia de acometida definida.

Para el abastecimiento eléctrico de los stands, por lo general, a baja tensión, pueden utilizarse tanto redes radiales, como malladas.

5.6.- Estaciones de servicio.

Para las instalaciones eléctricas de las estaciones de servicio rigen en especial, las siguientes disposiciones, prescripciones y reglamentos técnicos:

- Disposiciones sobre líquidos inflamables.
- Reglamentos técnicos sobre líquidos inflamables.
- Disposiciones sobre instalaciones eléctricas en recintos expuestos al peligro de explosiones.

Los límites de las áreas expuestas al peligro de explosiones (zona de peligro) dependen de la construcción de los surtidores y del área batida por la manguera. En la zona de peligro deben seleccionarse los equipos eléctricos de acuerdo con la clasificación por zonas establecidas. Si desean utilizarse equipos eléctricos tales como cajas de derivación, cajas de paso de cables, interruptores, motores, aparatos de alumbrado, etc., en la zona 1, deben estar éstos clasificados, como mínimo, en la clase de temperatura T3 (grupo de encendido G3) y, en caso de blindaje a prueba de presión, en la clase de explosión 1.

Desde la distribución hasta los distintos surtidores deben utilizarse preferentemente, como líneas de alimentación, cables con envoltura metálica, en uno de los extremos del cable deben unirse la envoltura metálica al conductor de protección.

Para el montaje fijo de los cables dentro del surtidor se pueden emplear cables con envoltura de plomo.

Si se instalan los cables dentro del zócalo de los surtidores por canales o tubos, se han de rellenar éstos con arena y se han de sellar por ambos extremos, para evitar la penetración de combustible o vapores de combustible.

Las distribuciones eléctricas para surtidores deben ser en cualquier momento fácilmente accesibles. Deben identificarse de modo especial los equipos de protección y los bornes de aislamiento del neutro de los cables y líneas, que conduzcan a las zonas 0 y 1. A los circuitos de los equipos de un surtidor sólo pueden conectarse aquellos equipos, que sean necesarios para el servicio de dicho surtidor. Los cables de acometida a motores, alumbrado y aparatos de control pueden agruparse en un sólo cable. No obstante, cada una de estas líneas de acometida debe contener los conductores, incluyendo el neutro y el de protección, necesarios para el servicio de los equipos conectados.

Las conexiones de los circuitos de seguridad intrínseca deben ser separadas de forma segura de los circuitos que no tengan esta característica (por ejemplo, guardando una distancia mínima de 50 mm o mediante un tabique separador). Los conductores de los circuitos de seguridad intrínseca no deben tenderse junto con otros conductores en cables, líneas, tubos o haces (mazo de cables).

Las líneas de acometida a los receptores de los equipos de impulsión de los surtidores deben poderse desconectar desde el exterior de la zona de peligro. A este lugar debe poder accederse de forma rápida y sin obstáculos.

Los motores deben estar protegidos contra calentamientos inadmisibles. Lo más adecuado es utilizar una protección total del motor. En la zona de peligro se admiten todos los tipos de protección contra explosiones.

5.7.- Fosos de montaje.

En garajes y estaciones de servicio, además de elevadores hidráulicos, se prevén frecuentemente fosos de montaje; su equipamiento eléctrico debe satisfacer determinados requisitos.

En los centros de trabajo con gases o vapores de los grupos de encendido G1 y G3, y en caso de lámparas fluorescentes, también los del grupo G4, los aparatos de alumbrado deben tener, como mínimo, una clase de protección IP 54, y si están expuestos a daños mecánicos, deben estar protegidos, además, mediante una rejilla resistente.

Los aparatos de alumbrado deben disponerse de tal forma, que se consiga una iluminación uniforme del foso de montaje sin dar lugar a deslumbramiento; son especialmente apropiados los aparatos de alumbrado con lámparas fluorescentes. Para evitar daños mecánicos deben tenderse los cables bajo revoque y los dispositivos de enchufe, interruptores y aparatos de alumbrado deben instalarse en nichos.

Los gases de escape de los automóviles son más pesados que el aire, y su acumulación, incluso en muy pequeña concentración, provoca serios perjuicios para la salud. Por ello, las normas de prevención de accidentes exigen que se prevean instalaciones de ventilación en fosos de profundidades mayores de 1,4 m, que deben ponerse en marcha antes de la entrada del personal en los fosos.

5.8.- Garajes.

En garajes sólo se permite el empleo de aparatos de alumbrado eléctricos. Estos aparatos han de colocarse de forma tal que los garajes, las entradas y salidas, así como las salidas de emergencia, queden suficientemente iluminados.

En garajes cerrados de gran tamaño y en garajes subterráneos de varias plantas de tamaño medio debe existir, para asegurar la iluminación de las salidas de emergencia, un sistema de alumbrado de seguridad. Este sistema deberá estar provisto de un equipo de abastecimiento auxiliar de conexión automática en caso de caída de la tensión de la red, independiente de dicha red, que deberá ser capaz de cubrir tiempos de servicio mínimos de una hora. La intensidad luminosa del alumbrado de seguridad debe ser, como mínimo, de 1 Lux. Esto no rige para garajes de una sola planta utilizados exclusivamente por los inquilinos de las correspondientes viviendas (garajes de viviendas).

Para garajes individuales (de hasta 100 m^2 de superficie útil), resulta conveniente instalar el alumbrado interior del garaje en la pared, cercano al motor y, en garajes para turismos, también cerca del maletero del vehículo.

Para pequeños aparatos de carga de baterías, lámparas portátiles y otros aparatos deben preverse cajas de enchufe. Es conveniente utilizar cajas de enchufe bipolares con contacto de protección y tapa abatible (cajas de enchufe para garajes). Las cajas de enchufe, interruptores, etc., para instalación sobre revoque, conviene colocarlos en nichos a fin de protegerlos contra daños mecánicos.

Los garajes con una superficie útil de 100 a 1.000 m^2 se consideran garajes de tamaño medio, y los de superficies útiles superiores a 1.000 m^2, de tamaño grande. Estos tienen

que estar siempre suficientemente ventilados. Si la ventilación no queda garantizada por vía natural, ha de preverse una instalación que asegure, a una altura aproximada de 1,5m sobre el suelo, una rotación del aire, como mínimo, de 6 m^3/h por m^2 de superficie útil, en garajes de tamaño medio, y de 12 m^3/h por m^2, en los garajes de tamaño grande. Esta instalación debe componerse de dos partes independientes entre sí, debiendo conectarse automáticamente una de ellas cuando falle la otra.

A fin de que, en los garajes con ventilación artificial, no se pongan en peligro los usuarios al fallar la red, es indispensable prever un grupo electrógeno de emergencia. Si un garaje grande forma parte de unos grandes almacenes, edificios de administración, hotel u otros, en los que ya exista un grupo electrógeno de emergencia, puede usarse.

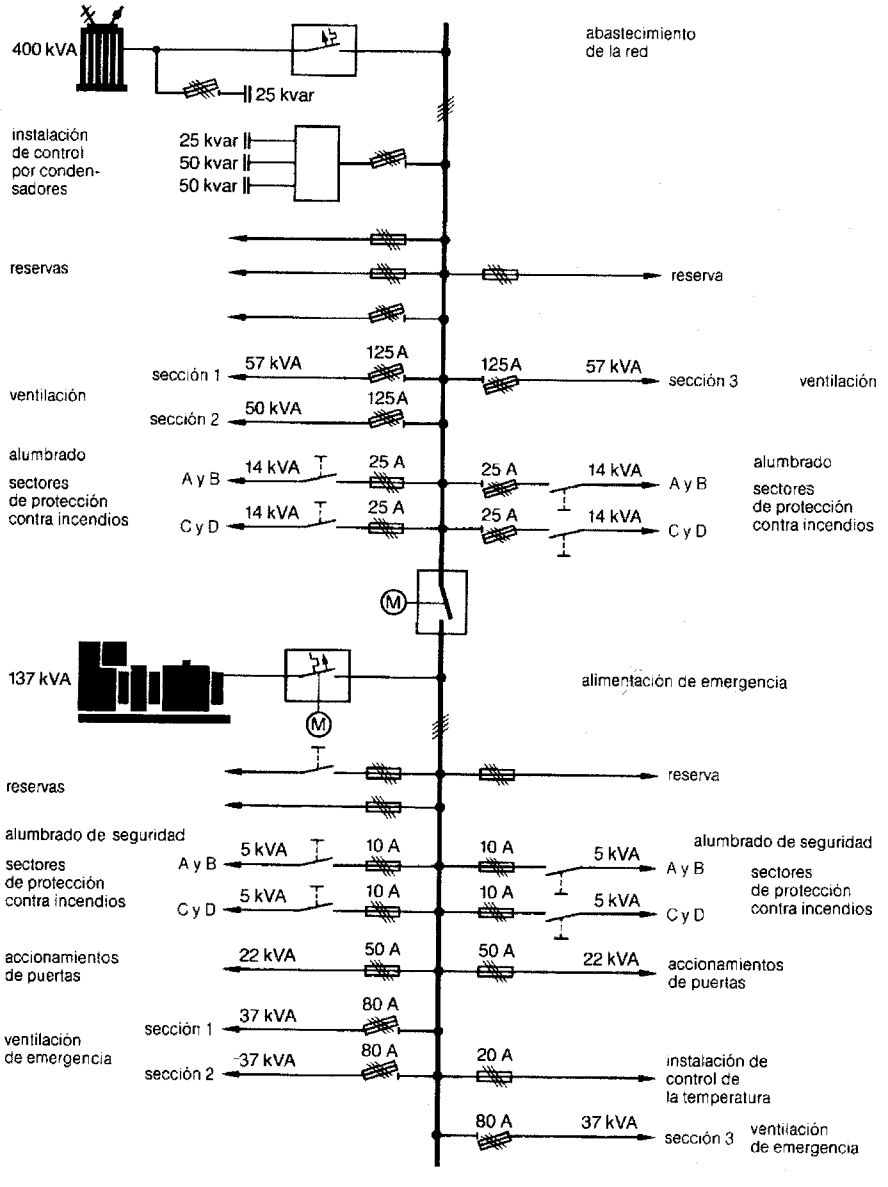


Figura 2. Esquema unifilar de un garaje subterráneo para 700 automóviles.

6.- INSTALACIONES DE EMERGENCIA.

Se denominan genéricamente instalaciones de emergencia en un edificio, aquellas instalaciones que están destinadas a subsanar los posibles fallos en el suministro normal de energía eléctrica, de una parte de la instalación total o bien de toda ella, reemplazando de una manera inmediata el servicio interrumpido. Lógicamente, la utilización de estas instalaciones de emergencia son adecuadas a los edificios que, por su naturaleza, la interrupción del servicio de energía eléctrica, aunque sea por un tiempo relativamente pequeño, pueda producir grandes perjuicios económicos y sobre todo de seguridad, dando lugar a situaciones límites, de posibles riesgos de pánico, etc., como puede ser en hospitales, locales de pública concurrencia, procesos industriales ininterrumpidos, centros de cálculo, etc.. Por tanto, el servicio de emergencia se implantará en las instalaciones de edificios, en los cuales la necesidad del mismo sea notoria.

6.1.- Suministros complementarios.

Los suministros complementarios pueden ser de socorro, de reserva o duplicado, según que el tanto por ciento que abarque el suministro normal, llegue hasta un 15%, un 50% o supere este valor, quedando obligado el abonado a tener unos consumos mínimos según los tipos de contratos, cuyo valor será:

- 15% en el suministro de socorro.
- 25% en el suministro de reserva.
- 50% en el suministro duplicado.

Debiendo estar dotados de estos suministros los siguientes edificios:

- **Suministro de socorro:**

Teatros, cines, bailes y en general, todos los edificios de espectáculos públicos. Los centros de enseñanza con capacidad superior a 300 alumnos, bibliotecas y casinos con capacidad superior a 300 personas, y lo mismo para salas de reuniones o de conferencias.

- **Suministro de reserva:**

Los estadios y pabellones deportivos, estaciones de ferrocarril, autobuses y aeropuertos, grandes establecimientos comerciales, hospitales, clínicas, ambulatorios, etc..

- **Suministro duplicado:**

Todos, o cualquiera de los mencionados anteriormente a juicio del proyectista y con el refrendado de la Delegación de Industria correspondiente. Los suministros complementados requieren un mecanismo de conmutación que entra en funcionamiento al reemplazar un servicio por otro, debiendo llevar un dispositivo de enclavamiento que impida la intercomunicación entre ambos suministros, que puede ser desde un simple sistema manual hasta el más sofisticado sistema automático.

6.2.- Alumbrados especiales.

Los locales de pública concurrencia (locales de espectáculos, de reunión y gran concentración de persona, establecimiento sanitarios, etc.) son objeto de reglamentación específica dentro de la normativa actual y especialmente en lo que se refiere a alumbrados. El REBT denomina como alumbrados especiales aquellos destinados a asegurar en los locales y sus accesos hasta las salidas la iluminación necesaria aún faltando el alumbrado general.

Clases de "alumbrados especiales": Alumbrado de emergencia; alumbrado de señalización; alumbrado de reemplazamiento.

- **Alumbrado de emergencia:**
  - Finalidad: evacuación segura del público al exterior.
  - Fuente: propia (la carga de los equipos podrá proceder del exterior).
  - Duración: 1 hora.
  - Conexión: al fallar el alumbrado general o al bajar el 70% la tensión.
  - Nivel mínimo de iluminación: 5 lumenes/m^2.

- **Alumbrado de señalización:**
  - Finalidad: funciona continuamente durante un tiempo (situación de puertas, pasillos, escaleras, ect.).
  - Fuente: alimentado por dos suministros, normal, complementario o propio.
  - Emplazamiento: si coincide con los de emergencia, podrá ser uno mismo.
  - Si falla el suministro del alumbrado de señalización o su tensión baja a menos del 70%, la alimentación pasará al segundo suministro.

- **Alumbrado de reemplazamiento:**
  - Finalidad: continuación alumbrado total.
  - Duración: mínimo dos horas.
  - Fuente: propia (cargarse de red).

Normas para todos los alumbrados especiales:

- Lámparas de incandescencia.
- Cuadro de protección único.
- Protección líneas máx. 10 A.
- Por línea máximo 12 puntos luz.
- Como mínimo dos líneas.

Locales que deben disponer de alumbrados especiales:

Emergencia:	Locales capacidad de 300 personas en adelante, locales de espectáculos, establecimientos sanitarios.
Señalización:	Estacionamientos subterráneos, teatros y cines, grandes almacenes, hoteles, casinos, todo local donde puedan producirse aglomeraciones.
Reemplazamiento:	Establecimientos sanitarios (quirófanos, salas de cura, vigilancia intensiva).

6.3.- Equipos autónomos.

En las instalaciones de alumbrados de emergencia en edificios se utiliza con mucha frecuencia los equipos autónomos, los cuales llevan incorporada una fuente de alimentación (pila o batería) que se alimenta de una forma continua de la red, y cuando falta la tensión de la misma o desciende por debajo del 70% de su valor nominal, devuelve la energía acumulada, por un período de tiempo relativamente corto (una o dos horas), estando limitada su utilización a este período de tiempo en el cual se prevé la restauración de nuevo de la tensión de la red.

- **Grupos electrógenos:**

Cuando se precisan autonomías de larga duración y, además, con potencias elevadas, el sistema más generalizado es el de la utilización de los grupos electrógenos, que consiste en un alternador acoplado a un motor (Diesel o gasolina) que se pone en marcha, manual o automáticamente, en el caso de que falle el suministro normal. El alternador suele tener acoplado en su eje una excitatriz (dinamo) que produce la corriente continua, necesaria para magnetizar las masas polares del alternador.

El grupo presenta la ventaja fundamental de no tener limitación en la potencia (desde potencias de 5 ó 10 kVA hasta grandes potencias de 100 a 1.000 kVA) pudiendo abastecer la totalidad de la potencia de una instalación o bien solamente una parte, considerada de transferencia al grupo. Con la reserva de combustible necesario para el funcionamiento del motor, la autonomía puede ser muy grande, dando tiempo suficiente para reparaciones, reposiciones, etc., más duraderas.

La disposición del esquema general puede ser como el que representa la figura 3 en la cual según se ve hay una serie de receptores, no prioritarios, los cuales no sonabastecidos por el grupo de emergencia, sino que únicamente se alimentan a través de la red y si esta falla, esta instalación se queda sin servicio. De la misma forma y unido mediante un contactor de red, se abastece a otro conjunto de receptores que son prioritarios para que el grupo los alimente cuando falte la tensión de la red "receptores prioritarios" y cuya conexión con el grupo de emergencia en condiciones de funcionamiento normal, está aislada mediante el contactor de grupo (antagónico en el contactor de red). El funcionamiento es el siguiente:

El grupo electrógeno constituido por el motor Diesel (MD) da movimiento al alternador (G) que cuando está funcionando alimenta a través del conductor de grupo a los receptores prioritarios, para ello dispone de una unidad de control de grupo que mantiene a este en constante aptitud de arranque alimentado continuamente al cargador de baterías. Otro equipo de control de red mantiene en funcionamiento la posición correcta de los contactores y cuando se produce el fallo de la tensión de red, automáticamente abre el contactor de red y cierra el de grupo, al mismo tiempo que arranca el motor Diesel, inmediatamente que alcanza el motor su velocidad de régimen el alternador comienza a producir la energía eléctrica precisa vigilante por el equipo de regulación de tensión, pasando directamente a dar el servicio a los receptores del circuito de emergencia. Todo queda bajo control con los aparatos de medida del grupo, tensión, intensidad y frecuencia, etc..

Tan pronto vuelve la tensión a la red de suministro normal, el equipo de control de red se encarga de abrir el contactor de grupo y cerrar el de red volviendo a abastecerse a través de la red de suministro, parando el motor Diesel y, por tanto, el grupo que sigue quedando dispuesto para responder a una nueva emergencia.

El lugar de instalación de estas fuentes supletorias de energía no está concretado en las disposiciones. Dicho lugar se elige según las características de la construcción, considerando los siguientes puntos de vista:

- Lo más cerca posible de los receptores de gran potencia (instalaciones de refrigeración y ventilación).
- Buen acceso para montar y desmontar los componentes del grupo (vías de transporte cortas).
- Evitar molestias por ruidos y olores (tener en cuenta la dirección principal del viento).

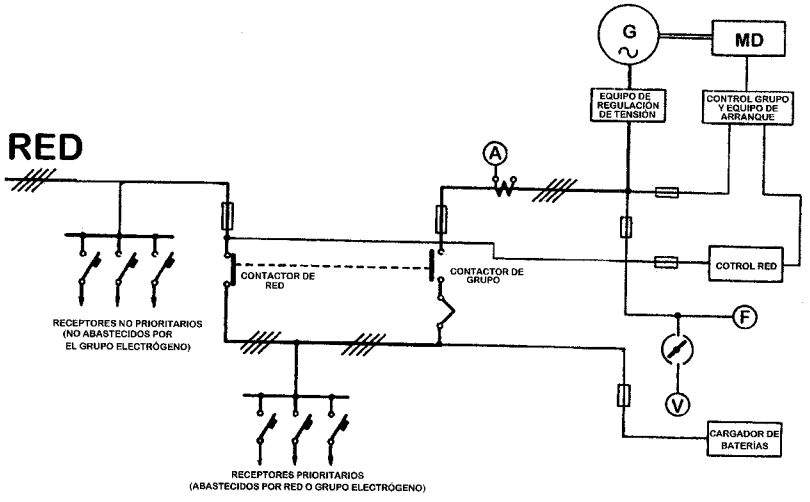


Figura 3. Esquema general de localización del equipo autónomo.

En función de los tiempos de transferencia de una a otra red pueden establecerse distintos grados de disponibilidad como queda puesto de manifiesto en las figuras 4-a, b) y 5-a,b).

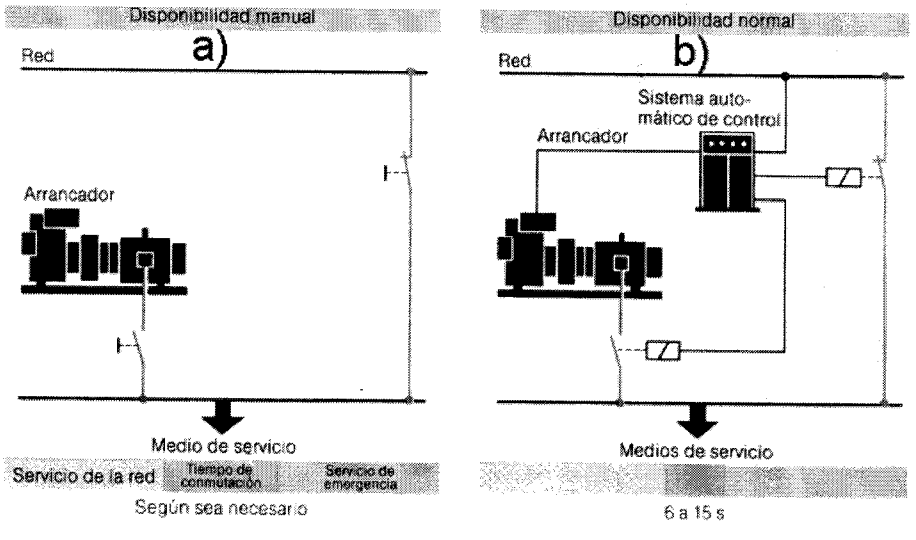


Figura 4. Tiempos de transferencia generador-red.

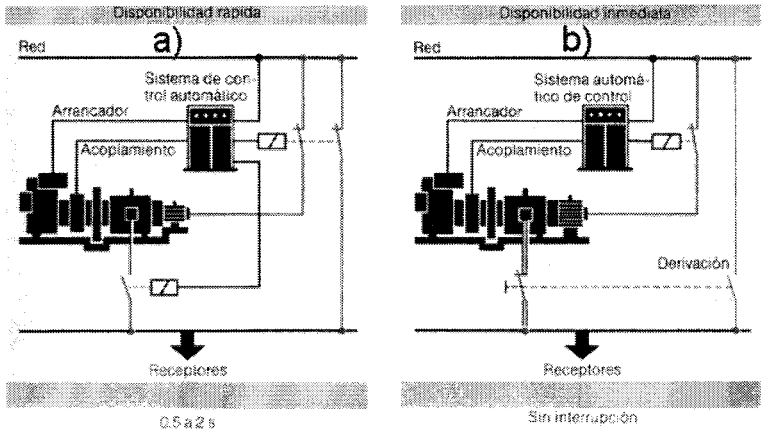


Figura 5. Tiempos de transferencia generador-red.

El tamaño aconsejado del recinto que aloje el grupo electrógeno aparece en la tabla 2.

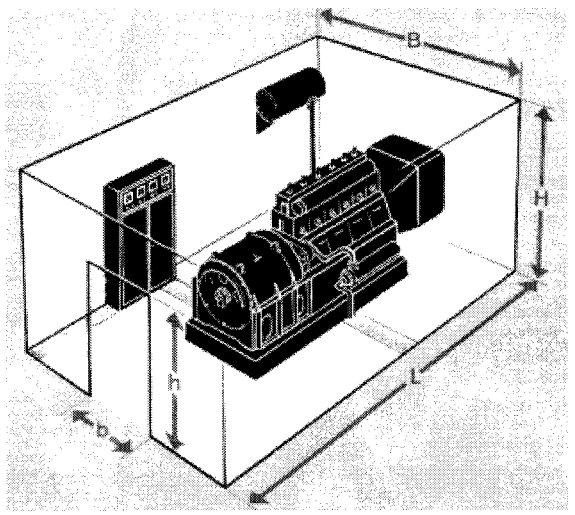


Figura 6. Dimensiones del recinto para alojar el grupo electrógeno.

Potencia del grupo	20 a 60 kVA	100 a 200 kVA	250 a 550 kVA	650 a 1500 kVA
L [m]	5.0	6.0	7.0	10.0
B [m]	4.0	4.5	5.0	5.0
H [m]	3.0	3.5	4.0	4.0
b [m]	1.5	1.5	2.2	2.2
h [m]	2.0	2.0	2.0	2.0

Tabla 2. Dimensiones del recinto del grupo electrógeno.

TEMA 14. INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN EDIFICIOS DESTINADOS PRINCIPALMENTE A VIVIENDAS

1.- INTRODUCCIÓN.

Las instalaciones eléctricas en edificios destinados principalmente a viviendas, ya sean en construcción vertical (pisos por planta) u horizontal (viviendas adosadas en urbanizaciones), son más rígidas, en el sentido de que vienen muy controladas y dirigidas por numerosas instrucciones del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, así por ejemplo se tienen:

- MIE BT 010. Previsión de cargas.
- MIE BT 011. Instalaciones de enlace. Esquemas. Acometidas.
- MIE BT 012. Instalaciones de enlace. Cajas generales de protección.
- MIE BT 013. Instalaciones de enlace. Línea repartidora.
- MIE BT 014. Instalaciones de enlace. Derivaciones individuales.
- MIE BT 015. Instalaciones de enlace. Contadores.
- MIE BT 016. Instalaciones de enlace. Dispositivos privados de mando y protección.
- MIE BT 022. Instalaciones interiores de viviendas. Grado de electrificación de las viviendas.
- MIE BT 023. Instalaciones interiores de viviendas. Prescripciones generales.
- MIE BT 024. Instalaciones interiores de viviendas. Ejecución de las instalaciones.

2.- INSTALACIONES DE ENLACE.

Se entiende por instalación de enlace aquella que une la red de distribución de la empresa suministradora con las instalaciones interiores o receptoras del abonado.

La instalación de enlace consta de: acometida, caja general de protección, línea repartidora y derivación individual.

La instalación de enlace y sus diferentes elementos deben cumplir las prescripciones indicadas en el REBT instrucciones MIE BT 011, 012, 013 14, 015 y 016.

El tipo de instalación de enlace viene determinado por el número de plantas y viviendas que tiene un edificio de manera que se pueden tener tres esquemas básicos:

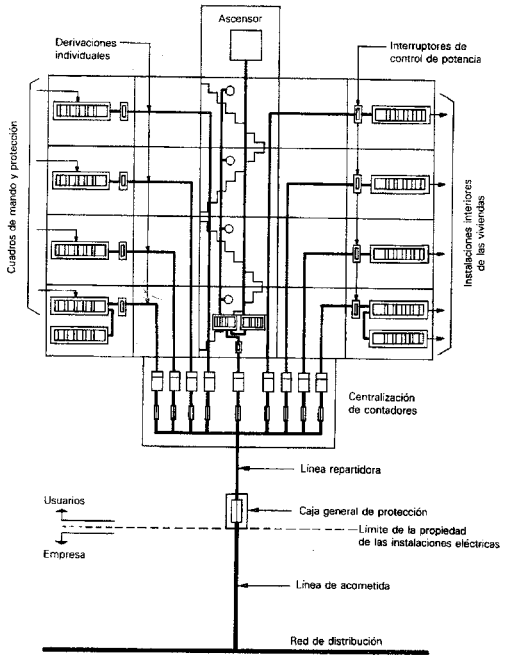


Figura 1. Instalación de enlace de un edificio.

- Instalación de enlace con contadores colocados individualmente (figura 3). Se utiliza fundamentalmente en edificios con muy pocas viviendas.
- Instalación de enlace con contadores concentrados en un sólo punto (figura 4). Se utiliza en edificios de hasta 12 plantas, con 48 viviendas como máximo.

- Instalación de enlace con contadores concentrados por plantas (figura 5). Se utilizan edificios de más de 12 plantas y con más de 48 viviendas. Cada concentración de contadores se tiene que realizar en grupos de 12 plantas como máximo o 48 viviendas como máximo también. En edificios con más de 14 viviendas por planta se colocará una concentración en cada planta.

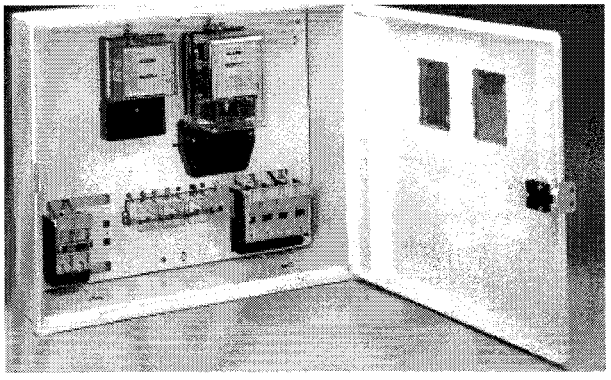


Figura 2. Cuadro de una instalación de enlace de un edificio individual.

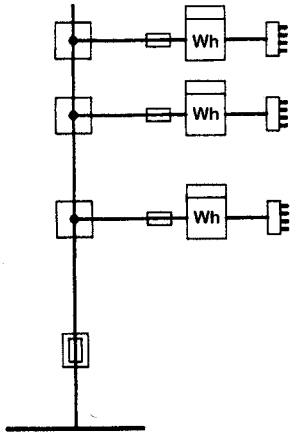


Figura 3. Instalación de enlace con contadores colocados individualmente.

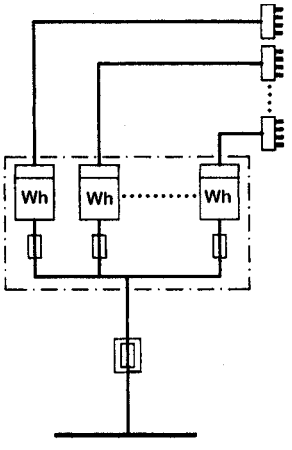


Figura 4. Instalación de enlace con contadores concentrados en un sólo punto.

En cada uno de los tres esquemas se tienen los siguientes elementos:

- Red de distribución. Propiedad de la compañía suministradora.
- Acometida. Ídem a instalar por el abonado.
- Caja general de protección.
- Línea repartidora.
- Caja de derivación.
- Centralización de contadores.
- Derivación individual.
- Fusible de seguridad.
- Contador de energía.
- Dispositivos privados de mando y protección.
- Cuadro general de protección.
- Instalación interior del abonado.

En los casos de un sólo abonado, la línea repartidora y la derivación individual se consideran como una sola línea que tiene funciones de derivación individual. Esta línea se protege mediante los fusibles de la caja general de protección que cumplen la función de fusibles de seguridad además de la propia.

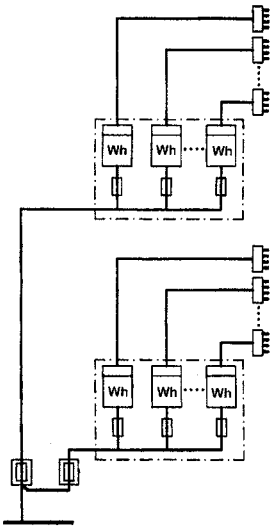


Figura 5. Instalación de enlace con contadores concentrados por plantas.

2.1.- Acometida.

Es la parte de la instalación de enlace comprendida entre la red de distribución y la caja general de protección. Normalmente se instala una acometida por cada 160 kW o fracción de esta potencia por edificio. También puede haber acometidas independientes para suministros cuyas características especiales así lo aconsejen, como es el caso de hospitales, grandes almacenes, etc..

2.1.1.- Acometida en alta tensión.

Se dispone a voluntad de la Compañía Distribuidora, de común acuerdo con la propiedad del edificio y, siempre que dicho edificio, local o agrupación de éstos, demande una previsión de potencia superior a 50 kVA, en cuyo caso, y según el artículo 17 del R.E.B.T., la propiedad del inmueble deberá reservar un local destinado al montaje de la instalación de un Centro de Transformación. Dicho local deberá ser de fácil acceso, se destinará exclusivamente a la finalidad prevista y no podrá utilizarse como depósito de materiales. La obligación del propietario prescribe, si transcurrido un año, la Empresa Suministradora de energía no ha llevado a cabo el montaje del centro.

La alimentación al centro podrá ser aérea o subterránea, lo cual condiciona fundamentalmente al local y su acometida.

La acometida aérea se hace partiendo, como es lógico, de una línea de distribución aérea, y se realiza a una celda de entrada a través de aisladores y pasa-muros de alta tensión. Esto es factible en centros de superficie, aunque al tener que guardar las distancias mínimas que obliga el Reglamento, el volumen de obra aumenta porque la construcción del centro debe ser más alta.

Cuando el centro es interior y la red de distribución es aérea, se convierte, a partir del último poste, en subterránea, o bien, si se parte de una línea de distribución de alta tensión subterránea, la acometida será subterránea. En estos casos, la red subterránea permite un volumen menor de obra civil. La acometida subterránea, se canaliza directamente hasta la celda de entrada, mediante el tendido de cables directamente enterrados o bien el tendido de cables enterrados y protegidos por tubulares.

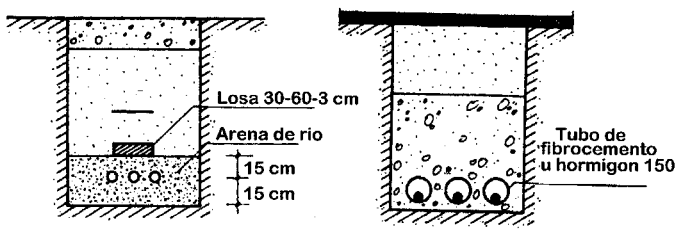


Figura 6. Tendido de cables en la acometida subterránea.

Las acometidas aéreas, son propias de zonas rurales o pequeños núcleos de población (aldeas, pueblos, villas, etc.), que son los lugares donde la red de distribución es aérea, ya que son zonas abiertas, donde los conductores aéreos no representan grandes dificultades; no sucede así en grandes ciudades, donde en todos los casos estas líneas de distribución son siempre subterráneas.

La línea de distribución urbana, de donde se toma para la acometida, puede ser la red aérea convencional (4 hilos separados), o bien de red trenzada (conductores trenzados formando un haz).

- **Acometida subterránea:**

Este tipo de acometida es la más racional para grandes poblaciones, donde las redes de distribución urbanas representan una gran tela de araña subterránea, que discurre por el subsuelo de las calles y vías principales y desde donde se derivan hasta penetrar en los edificios a la correspondiente Caja de Protección (figura 10).

Las tomas se realizan en las cajas de distribución urbana, que tienen dispuestas las Compañías y desde estas cajas, bajo tubo blindado, mínimo de 120 mm, parte la línea de acometida hasta la propiedad. Esta acometida es más segura y más duradera que la aérea al estar más protegida y resguardada y a este sistema deben tender las acometidas de todas las edificaciones actuales.

Sólamente habrá una acometida por edificio, a no ser que haya más de un suministro, cuyas características especiales aconsejen hacer acometidas independientes.

Se fijará, de común acuerdo entre el abonado y empresa, el punto de la acometida y el punto de emplazamiento de la Caja de Protección, que irá colocada en lugar de tránsito general (portal, hueco de escalera, etc.), de fácil y libre acceso.

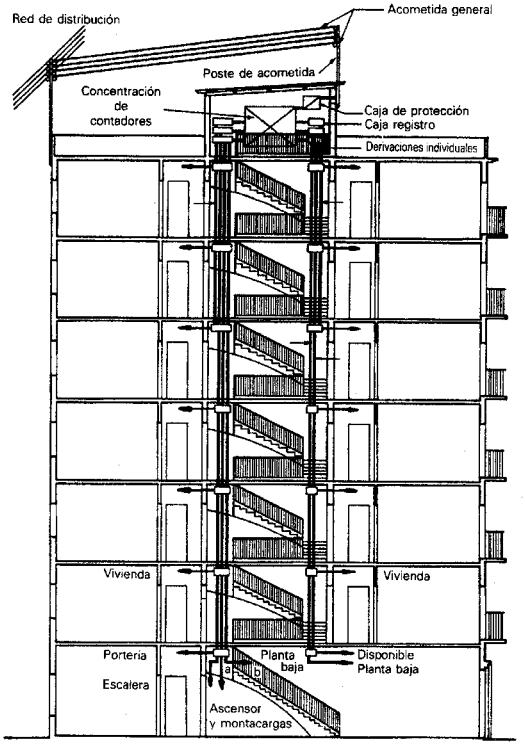


Figura 9. Acometida aérea de un edificio.

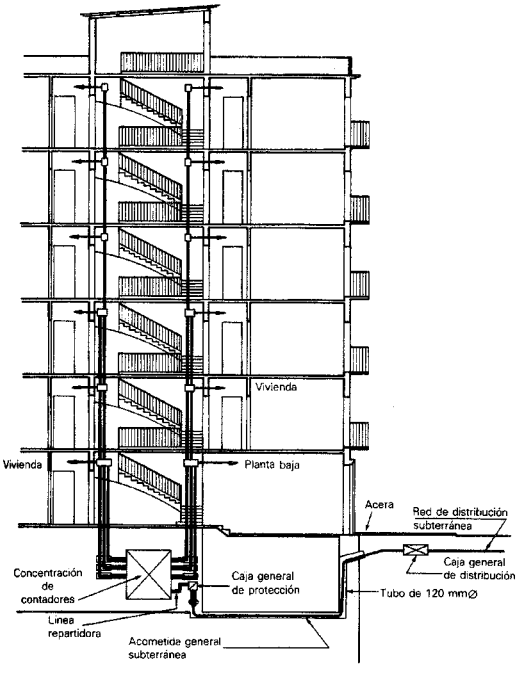


Figura 10. Acometida subterránea de un edificio.

2.2.- Caja general de protección.

Es la caja que aloja los elementos de protección de la línea. Marca el principio de la propiedad de las instalaciones eléctricas del abonado.

Características:

- Su emplazamiento se fijará, de común acuerdo entre la Compañía Distribuidora y la Propiedad, eligiendo, por lo general, la fachada del inmueble o lugares de uso común, de libre y fácil acceso, procurando su proximidad a la red de distribución urbana o al centro de transformación, y separada de las instalaciones de agua, gas, teléfono, etc..
- Las cajas cumplirán la recomendación UNESA (1403) y las normas particulares de la Empresa Suministradora.
- Las cajas serán precintables, alojando en su interior, cortocircuitos fusibles en fases, con poder de corte, por cada conductor, igual a la corriente del cortocircuito posible en el punto de su instalación por lo menos, y un borne de conexión para el neutro.
- Existirá una caja por cada línea repartidora independiente, y por lo general cada 160 kW o fracción de potencia.
- Se situará en la pared del portal, fachada o entradas de otros servicios comunes, y, siempre que se pueda, tendrá acceso directo desde la calle.
- Cuando la superficie total de los locales comerciales sea superior a 300 m^2 se establecerá para los mismos, una caja por cada 160 kW o fracción.

En la tabla 1 se dan las dimensiones de los nichos para alojar las Cajas de Protección y las figura 12 y 13 se muestran modelos de cajas.

NTE:

NUMERO DE CAJAS	INTENSIDAD NOMINAL [A]	ANCHO [m]	ALTO [cm]	PROFUNDAD [m]
1 CAJA	De 80 a 160	70	100	30
	De 250 a 400	70	140	30
2 CAJAS	De 80 a 160	140	100	30
	De 250 a 400	140	140	30

Tabla 1. Dimensiones de cajas de protección.

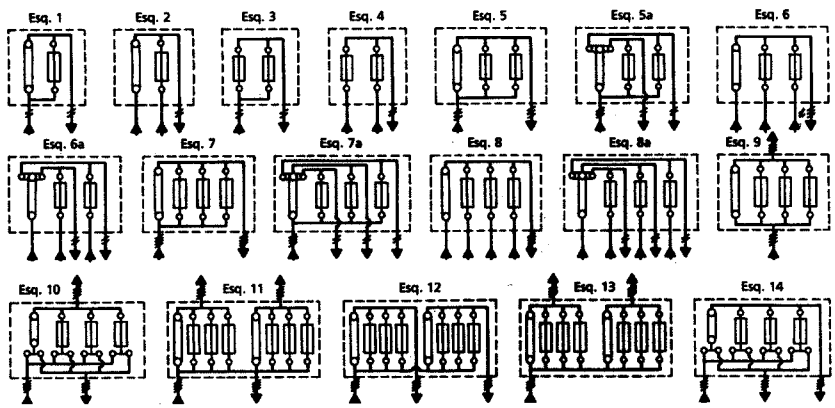


Figura 11. Esquemas de conexión.

Cuando se trata de acometidas en baja tensión de potencia elevada (superior a 320 kW), las cajas generales de protección se sustituyen por las denominadas B.T.V. (bases tripolares verticales).

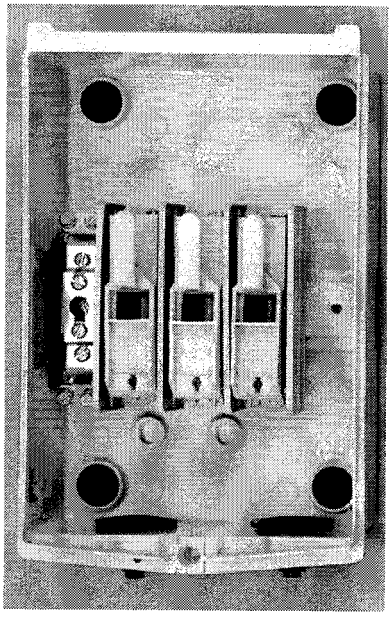


Figura 12. Caja general de protección de 40 A.

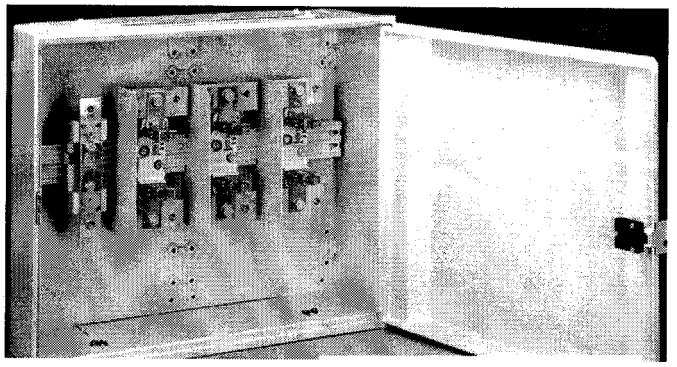


Figura 13. Caja general de protección de 630 A.

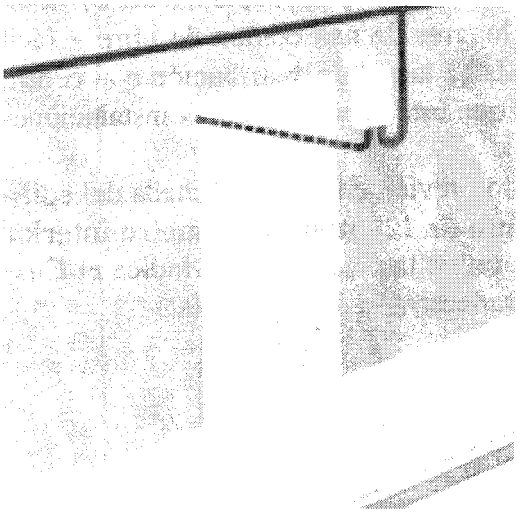


Figura 14. Caja general de protección sobre fachada.

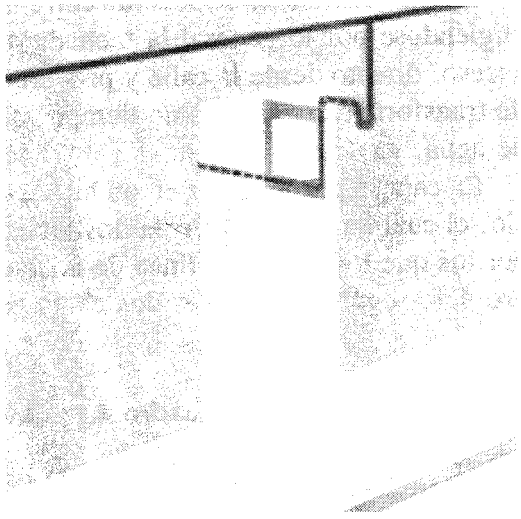


Figura 15. Caja general de protección dentro de arqueta en parel de portal.

2.3.- Línea repartidora.

Es la parte de la instalación que enlaza la caja general de protección con los contadores de energía consumida. Está pues vinculada a la disposición de los contadores, y según que éstos sean individuales o centralizados, así dependerá la magnitud de la misma,quedando

prácticamente anulada en las disposiciones actuales de centralización modular de contadores, incluyendo la caja de protección, donde queda substituida por un simple embarrado de conexiones.

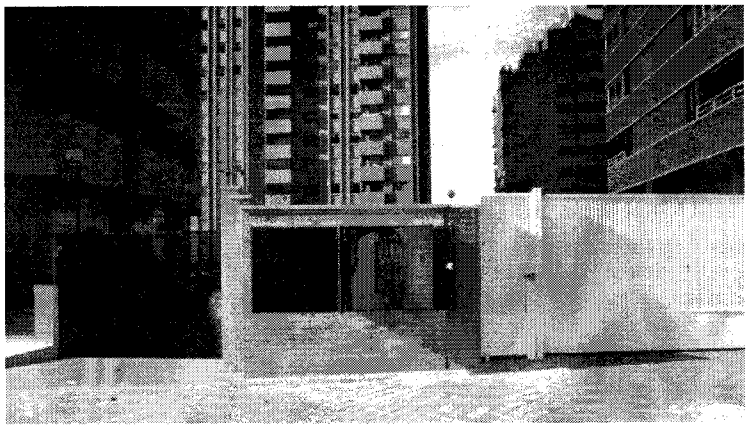


Figura 16. Ubicación del C.G.P. en la valla de cerramiento de un bloque.

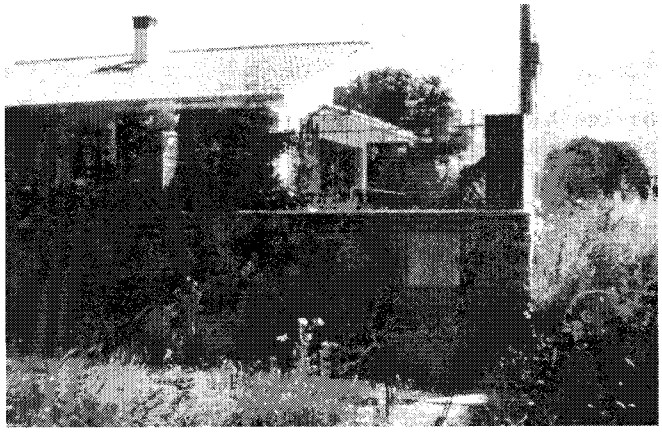


Figura 17. Ubicación del C.G.P. en el límite de una propiedad.

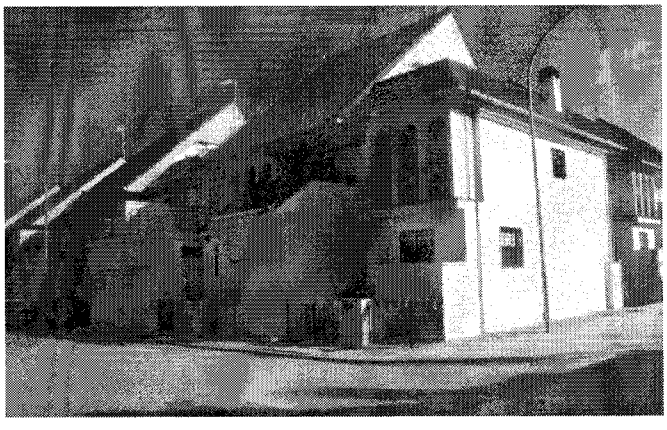


Figura 18. Ubicación del C.G.P. en viviendas adosadas.

Las líneas repartidoras pueden estar dispuestas, según el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, de las siguientes formas:

a) Mediante conductores aislados en el interior de tubos empotrados.
b) Mediante conductores aislados en el interior de tubos en montaje superficial.
c) Mediante canalizaciones prefabricadas.
d) Mediante conductores aislados con cubierta metálica en montaje superficial.

Características:

- Los conductores serán de cobre y estarán aislados para una tensión de 1.000 V.
- Los tubos que contengan a estas líneas repartidoras serán rígidos, incombustibles y de un diámetro nominal que permita ampliar la sección de los conductores inicialmente instalados en un 100%.
- En edificios de viviendas, la línea repartidora constará de 3 conductores de fase, un neutro y uno de protección (3F + N + P).
- En viviendas unifamiliares podrá estar constituida, en su forma más elemental, por un conductor de fase, un neutro y uno de protección (1F + N + P).

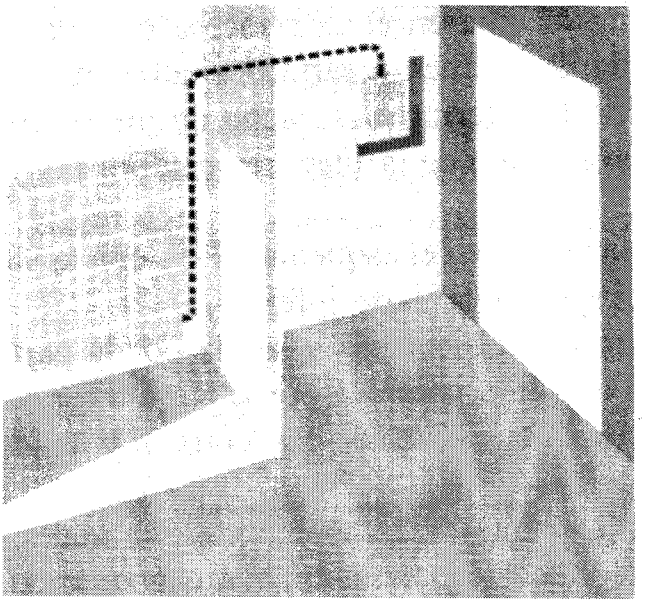


Figura 19. Línea repartidora

- La carga máxima a transportar por esta línea, es de 150 kW. Si se alimenta directamente desde un centro de transformación, podrá llegar a 240 kW. Si se sobrepasan estas potencias, hay que poner varias líneas repartidoras.
- Cuando en un edificio se instalan centralizaciones de contadores en plantas intermedias, se recomienda alojar las líneas repartidoras en el interior de una canaladura, preparada exclusivamente con este fin, en la caja de escalera, que tenga unas dimensiones de 30 x 30 cm, que carezca de cambios de dirección y esté cerrada, pero que sea practicable en todas las plantas.
- Las líneas repartidoras, destinadas a la conexión de contadores instalados en forma individual o concentrados por plantas y cuando la alimentación a las mismas se realice por su parte inferior, podrán estar constituida por tramos de diferentes secciones y composición.
- El número de conductores, en cada uno de los tramos, será el conveniente a fin de establecer un reparto, lo más equilibrado posible, de las cargas previsibles sobre los conductores de acometida.
- Cuando las líneas repartidoras sean alimentadas por su parte superior, deberán tener sección y composición constante en todo su recorrido.
- Cuando la superficie de locales comerciales sea superior a 300 m^2, se establecerán por el portal, independientemente de las líneas repartidoras de viviendas, otras para estos locales. (Sólo exigible por alguna Compañía de Distribución).

- Si la superficie de locales comerciales es inferior a 300 m^2, podrá tomar de las líneas repartidoras de viviendas. (Sólo exigible por alguna Compañía de Distribución).
- Si los locales comerciales demandan potencias superiores a 100 ó 125 W/m^2 se hará una acometida independiente desde la red general. (Sólo exigible por alguna Compañía de Distribución).

2.4.- Montaje de contadores.

Los contadores pueden ir montados en forma individual o concentrada.

De forma individual se colocan, bien dentro del local del abonado o fuera en zonas de servicio o comunes (descansillo de escaleras, pasillos, etc.). Si va colocado en el interior de la vivienda, se colocará en zonas próximas a la puerta de entrada, a una altura comprendida entre 1,50 y 1,80 m y accesible por todos sus lados, fijado sobre bases de material no inflamable y sujeto a muros o paramentos consistentes, (nunca a tabiques). En viviendas antiguas, se tolera su colocación en el hall, pasillos, cocina, etc., pero nunca en cuartos de baño, dormitorios, etc., y demás habitaciones de uso privado. En instalaciones de chalet o viviendas unifamiliares, se instalan en las obras de fábrica de las vallas o cercas, colocándose en el interior de hornacinas o armarios adecuados para su alojamiento, y a una altura mínima de 0,50 m. En instalaciones provisionales de obras, se podrán instalar sobre postes en el interior de cajas estancas.

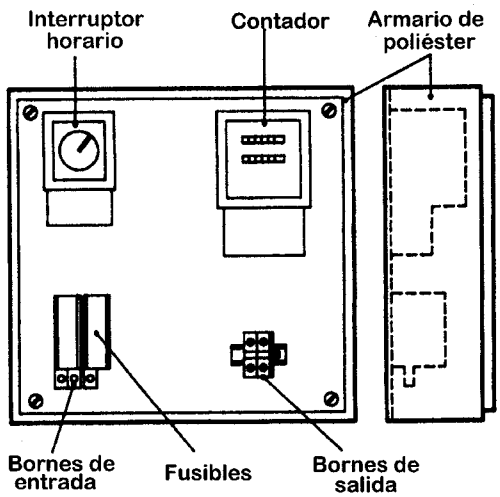
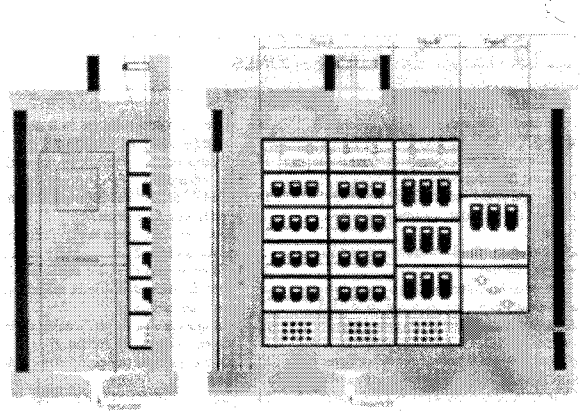


Figura 20. Equipo de medida de energía individual, monofásico, para interperie.

De forma centralizada es el sistema usual y preferido por todas las Compañías Distribuidoras para edificios de viviendas de nueva construcción.

Esta concentración se puede hacer por plantas, o bien para todos los abonados del edificio, agrupados en un sólo local incluyendo viviendas, locales comerciales y usos comunes del edificio. La concentración de contadores, se hará siempre de acuerdo entre la Propiedad y la Compañía Distribuidora siguiendo las normas particulares de estas últimas.


Figura 21. Centralización de contadores.

La disposición de la centralización se realiza, según se especifica en la figura 22, mediante unos sistemas modulares que alojan a cada unidad en el interior de elementos prefabricados con envolventes aislantes y transparentes en su frente, disponiéndose de la siguiente forma:

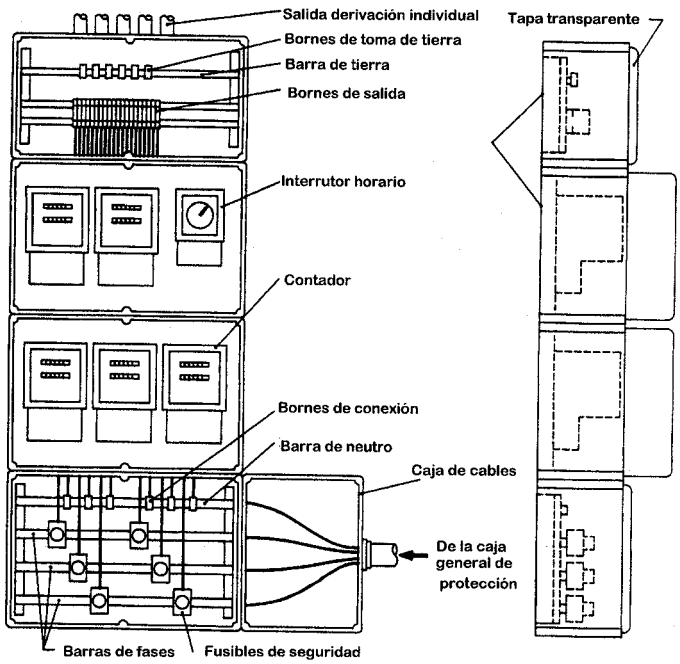


Figura 22. Centralización de contadores.

En primer lugar la caja general de protección con sus fusibles generales, a continuación, un embarrado general donde se colocan los fusibles de seguridad, que se dispondrán en cada uno de los hilos de fase o activos que van al contador, a continuación los módulos de medida en función del tipo de suministro y seguidamente los I.C.P. (Interruptores de Control de Potencia) disposición que exigen ciertas compañías Distribuidoras para controlar la potencia que tiene declarada cada abonado, terminando en otro embarrado general de protección en los correspondientes bornes de salida. El esquema eléctrico de esta disposición es de la figura 23.

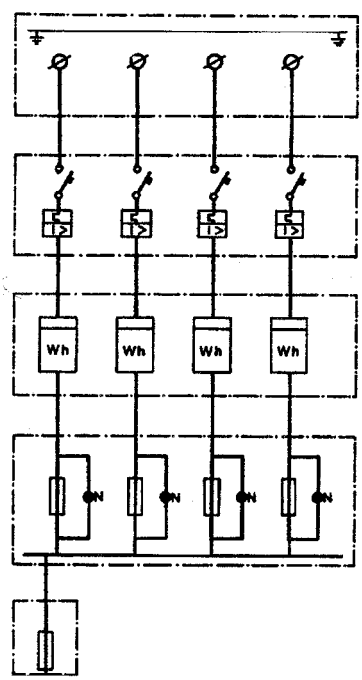


Figura 23. Centralización de contadores. Esquemas unifilar.

El local destinado a centralización de contadores cumplirá las siguientes normas:

- Será de fácil y libre acceso.
- No será húmedo y estará suficientemente ventilado.
- Tendrá sumideros de desagüe, si la cota del suelo es igual o inferior a la de los pasillos y locales colindantes.
- La puerta de acceso al local, de dimensiones normales, (mínimas de 1,90 x 0,66 m), abrirá hacia el exterior y su cierre estará normalizado por la Compañía Distribuidora.
- Sus dimensiones serán tales que permitan alojar las diversas centralizaciones de contadores.

- Entre el módulo más saliente y la pared o módulos opuestos, deberá respetarse un pasillo de 1.10 m. La altura mínima del local será de 2,30 m.
- No estará próximo a locales que presenten riesgo de incendio o produzcan vapores corrosivos.
- No será atravesado por conducciones de otras instalaciones que no sean eléctricas.
- Las paredes que delimitan el local no tendrán resistencia inferior a la de tabicón.

UNIDADES DE MEDIDAS MONOFÁSICAS EQUIVALENTES	ANCHURA LIBRE DE PARED EN [m] PAREDES OCUPADAS DEL LOCAL			ANCHO MÍNIMO [m]	ALTURA LIBRE [m]
	1	2	3		
Hasta 16	1,25	1,55	1,85	1,10	2,30
De 17 a 20	1,50	1,80	2,10	1,10	2,30
De 21 a 24	1,75	2,05	2,35	1,10	2,30
De 25 a 28	2,25	2,55	2,85	1,10	2,30
De 29 a 32	2,50	2,80	3,10	1,10	2,30
De 33 a 36	2,75	3,05	3,35	1,10	2,30
De 37 a 40	3,00	3,30	3,60	1,10	2,30
De 41 a 44	3,25	3,55	3,85	1,10	2,30
De 45 a 48	3,50	3,80	4,10	1,10	2,30

Tabla 2. Dimensiones mínimas de la sala de centralización de contadores.

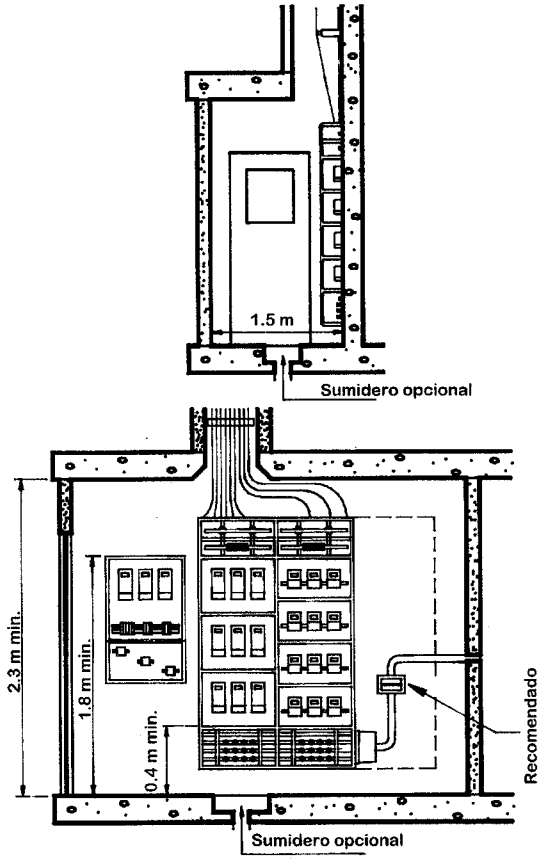


Figura 24. Sala de contadores.

2.5.- Derivaciones individuales.

Es la línea que enlaza el contador o contadores de cada abonado con los dispositivos privados de mando y protección, no permitiéndose el empleo de un neutro común para distintos abonados. Las derivaciones individuales podrán realizarse de las siguientes formas:

- Por conductores aislados, en el interior de tubos empotrados.
- Por conductores aislados, en el interior de tubos en montaje superficial.
- Por canalizaciones prefabricadas.
- Por conductores aislados con cubierta metálica en montaje superficial.

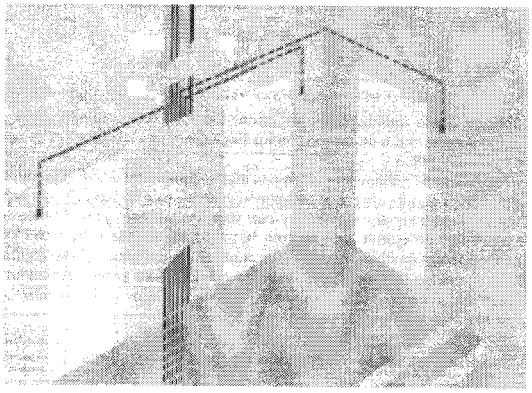


Figura 25. Derivaciones individuales.

En todos los casos, las derivaciones individuales deberán discurrir, siempre que sea posible, por lugares de uso común (caja de escalera, patinillos, etc.). Los tubos destinados a alojar las líneas de derivación individual, deberán tener un diámetro nominal que permita ampliar la sección de los conductores inicialmente instalados, en un 50 por 100, siendo el diámetro mínimo a instalar de 23 mm, en edificios de viviendas. Se recomienda alojar las derivaciones individuales en el interior de una canaladura, preparada para este único fin, en la caja de escalera.

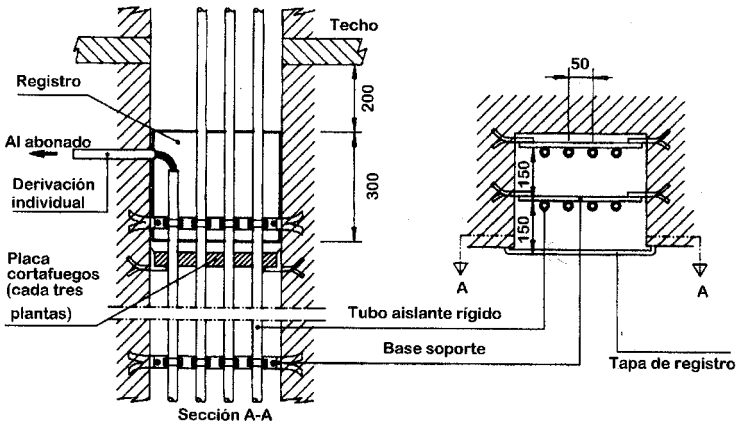


Figura 26. Sección longitudinal y transversal de una canalización para derivaciones individuales.

La derivación individual enlaza con la instalación interior de abonado a través del cuadro de distribución. Por el interior de los tubos de estas derivaciones, discurrirán, además de los conductores que forman la línea de distribución, los conductores principales de la línea de tierra.

La parte de la derivación que discurre desde la canaladura hasta el cuadro de distribución irá, por lo general, bajo tubo empotrado en los paramentos que atraviesa.

Para locales comerciales, se suelen reservan dos tubos (diámetro mínimo 29 mm) por cada 50 m^2 de superficie del local, siempre que la derivación no esté definida.

En la canaladura, por donde discurran las derivaciones individuales es preciso colocar una placa cortafuegos, por lo menos cada tres plantas, situándola en la parte inferior de los registros.

2.6.- Cuadro de distribución.

Es el que aloja todos los dispositivos de seguridad, de protección y de distribución de la instalación interior de la vivienda. Se colocará en el origen de la misma y lo más cerca posible del punto de alimentación. En este cuadro se instalará:

- Un interruptor general automático, de corte omnipolar, que tenga accionamiento manual y dispositivos de protección contra sobrecargas y cortocircuitos.
- Un interruptor diferencial para protección de contactos indirectos.
- Un borne de conexión de los conductores de protección.
- (P.I.A.) Pequeños interruptores automáticos (magnetotérmicos) para proteger cada uno de los circuitos independientes contra sobrecargas y cortocircuitos.

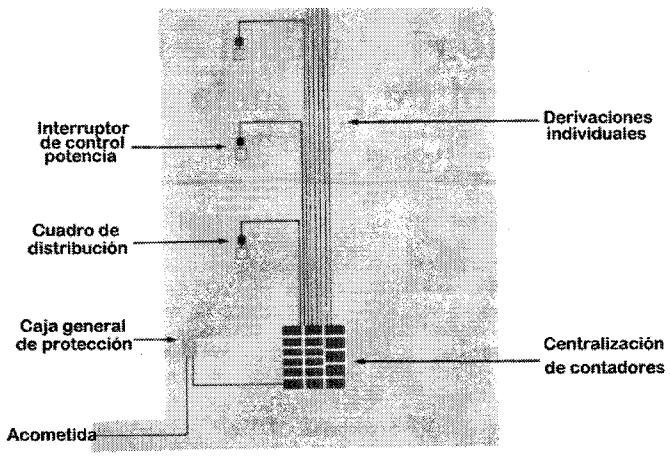


Figura 27. Canaladura para derivaciones individuales.

El interruptor general automático podrá ser substituido por el interruptor diferencial, como dispositivo general de mando, cuando en las instalaciones interiores no existan circuitos diferentes bajo tubos de protección comunes a ellos.

Los interruptores generales tendrán capacidad de corte suficiente para la intensidad de cortocircuito que puede producirse en el punto de su instalación y, en caso contrario, será preciso la instalación en el mismo cuadro de distribución de cortacircuitos fusibles adecuados.

Los P.I.A.s (Pequeños Interruptores Automáticos) tendrán unas características de interrupción, de acuerdo con las corrientes admisibles en los conductores del circuito que protegen.

El instalador colocará, sobre el cuadro de distribución, una placa metálica impresa en la que conste: su nombre o razón comercial, fecha en que se realizó la instalación y grado de electrificación.

Los Interruptores de Control de Potencia (I.C.P.s) se sitúan con arreglo al criterio de cada Compañía Distribuidora, siendo lo normal en un punto cercano a la puerta de entrada, antes del cuadro de distribución y alojado en una caja empotrada de 180 x 150 x 53 mm cómodamente accesible desde el suelo.

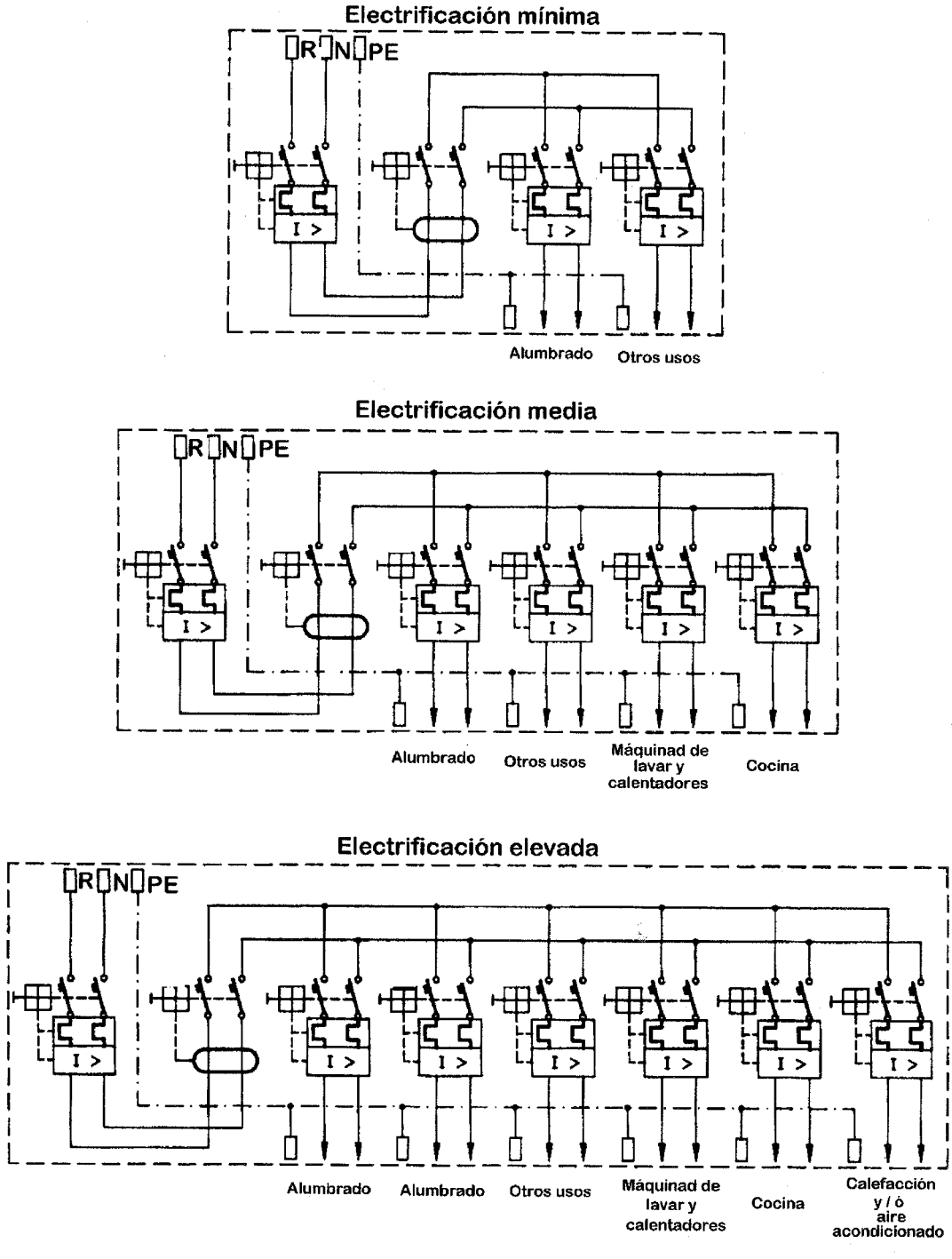


Figura 28. Cuadros de distribución del interior de una vivienda.

3.- INSTALACIÓN INTERIOR DE VIVIENDA.

Son las derivaciones individuales de abonado que, partiendo del cuadro general de distribución, enlazan con todos los receptores de la instalación, fundamentalmente, a través de puntos de fuerza y de iluminación.

3.1.- Características eléctricas de las instalaciones de interiores.

- Las tensiones de utilización, no serán superiores a 250 V con relación a tierra. (Sólamente cuando existan receptores que por sus características, así lo exijan, se podrán utiliza tensiones superiores a este valor).
- En todas las nuevas edificaciones, se dispondrá de una toma de tierra de protección.
- Los conductores utilizados en la instalación interior, serán rígidos o flexibles pero de cobre, con una tensión nominal de 750 V para los primeros y de 440 V para los segundos.
- Las secciones mínimas utilizadas serán las siguientes:
  - Circuito de alumbrado: 1 mm^2.
  - Circuito de alimentación de tomas de corriente en viviendas con grado de electrificación mínimo: 1,5 mm^2.
  - Circuito de alimentación de tomas de corriente viviendas con grado de electrificación medio y elevado: 2,5 mm^2.
  - Circuito de alimentación a máquina lavadora y calentador eléctrico de agua: 4 mm^2.
  - Circuito de alimentación a cocina, frigorífico y secador: 6 mm^2.
- Los conductores de protección serán de cobre de la sección adecuada sobre cálculo y con el mismo aislamiento que los conductores activos y discurriendo por la misma canalización.
- Se identificarán o bien por los colores de los aislamientos o por inscripciones sobre el mismo. Se reservan el color amarillo y verde para el de protección y generalmente el azul para el neutro.
- No se utilizará un mismo conductor neutro para varios circuitos.
- La conexión de los interruptores unipolares se hará siempre sobre el conductor de fase y nunca sobre el hilo neutro.
- Todo conductor debe poderse seccionar en cualquier punto de la instalación en que se derive, utilizando un dispositivo apropiado, tal como un borne de conexión, de forma que permita la separación completa de cada circuito, derivado del resto de la instalación.
- Las tomas de corriente, en una misma habitación, deben estar conectadas a la misma fase, a ser posible.
- En los cuartos de baño se respetarán el volumen de protección y el volumen de prohibición. (figura 29).
- En el volumen de prohibición, no se instalarán interruptores, tomas de corriente ni aparatos de

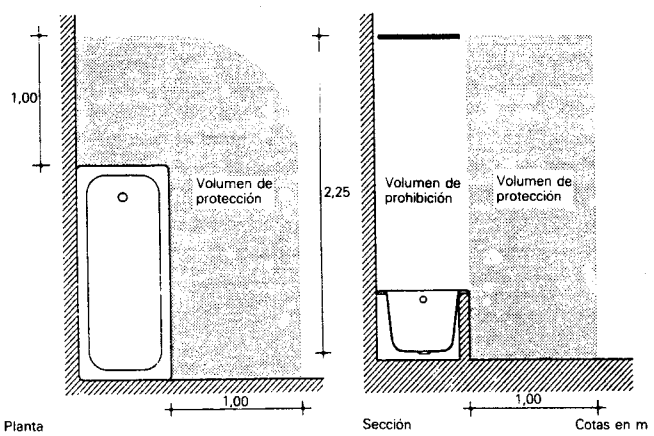


Figura 29. Volumen de prohibición en cuartos de baño.

iluminación. Se admiten por encima de este volumen, conductores de mando de sonería accionados por un cordón o cadena de material aislante no higroscópico.

- En el volumen de protección, no se instalarán interruptores pero podrán instalarse tomas de corriente de seguridad, aparatos de alumbrado de instalación fija, preferentemente de la clase II de aislamiento.
- Se admite también la instalación, en el volumen de protección, de radiadores eléctricos de calefacción con elementos de caldeo protegidos, siempre que su instalación sea fija, estén conectados a tierra y se haya establecido una protección exclusiva para estos radiadores a base de interruptores diferenciales de alta sensibilidad, estando el interruptor de maniobra fuera del volumen de protección.

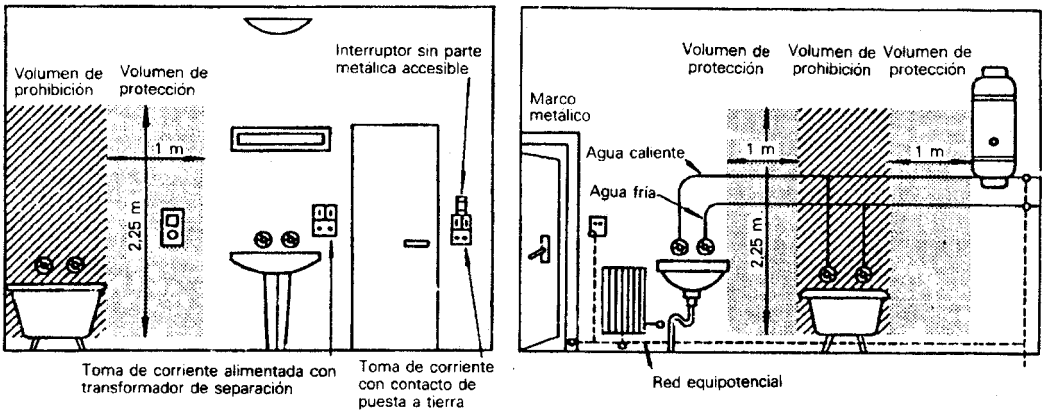


Figura 30. Red equipotencial.

- Nunca se realizarán empalmes en el interior de los tubos.
- Los empalmes entre conductores se realizarán en las cajas, utilizando regletas de bornes o conectores.
- Las instalaciones se realizarán de alguna de las siguientes formas:
  a) Conductores aislados, bajo tubo en montaje empotrado o superficial.
  b) Conductores aislados, bajo molduras o rodapiés.
  c) Conductores aislados, en el interior de huecos de la construcción.
  d) Conductores aislados instalados directamente bajo enlucidos. (Sólo para viviendas con un grado de electrificación mínimo).

a) Conductores aislados bajo tubo protector.

Podrá ir en montaje superficial o empotrado. Cada tubo debe proteger, por lo general, circuitos diferentes. Si por un mismo tubo discurren circuitos diferentes, se cumplirán las siguientes condiciones:

- Todos los conductores estarán aislados para la máxima tensión de servicio.
- Todos los circuitos partirán de un mismo mecanismo general de mando.
- Cada circuito estará protegido, por separado, contra sobreintensidades.

Las conexiones entre conductores se harán en el interior de cajas apropiadas, donde se realizarán utilizando bornes de conexión regletas; no permitiéndose, en ningún caso, la unión de conductores por simple retorcimiento o enrollamiento de los mismos.

b) Conductores aislados bajo molduras o rodapiés.

Estas canalizaciones están constituidas por conductores alojados en ranuras bajo molduras. Sólo se permite en locales secos y cumplirán las siguientes condiciones:

- Las ranuras tendrán dimensiones suficientes para alojar los conductores.
- En un misma ranura sólo se alojarán conductores pertenecientes al mismo circuito.
- En los cambios de dirección, los ángulos de las ranuras serán obtusos.
- Las molduras no presentarán discontinuidad en la longitud de protección de los conductores.
- En caso de usar rodapiés ranurado, el conductor más bajo estará a 5 cm sobre el suelo.
- En los cruces con otras canalizaciones no eléctricas, se dispondrá un tubo rígido empotrado que sobresalga a ambos lados del cruce.
- La separación entre las canalizaciones que se crucen, será, como mínimo, de 3 cm.
- Las conexiones y derivaciones se harán con tornillo o sistemas equivalentes.
- Las molduras tendrán su cubierta al aire, sin recubrir con papeles ni telas.

c) Conductores aislados en el interior de huecos de la construcción.

La sección de los huecos será, como mínimo, igual a cuatro veces la ocupada por los conductores o tubos que alberga. La dimensión más pequeña del hueco deberá ser de 20 mm. Los huecos tendrán paredes resistentes, superficie interior sin asperezas, sin cambios de dirección y con registros. Los puntos de unión se elegirán procurando que, en caso de que se suelten los bornes de un conductor, éste no se suelte totalmente, (sobre todo en verticales). Se cuidará mucho la imposibilidad de penetración de agua en el hueco.

d) Conductores aislados, directamente empotrados bajo enlucidos.

Sólo se permite en viviendas con un grado de electrificación mínima. Los conductores serán de tipo especial construídos para este fin, con tensión nominal no inferior a 750 V. La cubierta presentará una o varias hendiduras en sentido longitudinal, para permitir la separación de los conductores en las curvas. Los conductores discurrirán a 10 cm, como mínimo, de los cercos de ventana o puerta. Los conductores se apoyarán firmemente en toda su extensión sujetándolos con clavos, grapas o bandas de escayola o yeso a distancias de unos 25 a 30 cm. No se permiten los empalmes de unión ni en las cajas de derivación, sino mediante regletas con tornillos a presión. La cobertura del enlucido por encima del conductor será, como mínimo, de 4 mm. Nunca se colocarán sobre los suelos, pero sí dentro de bovedillas.

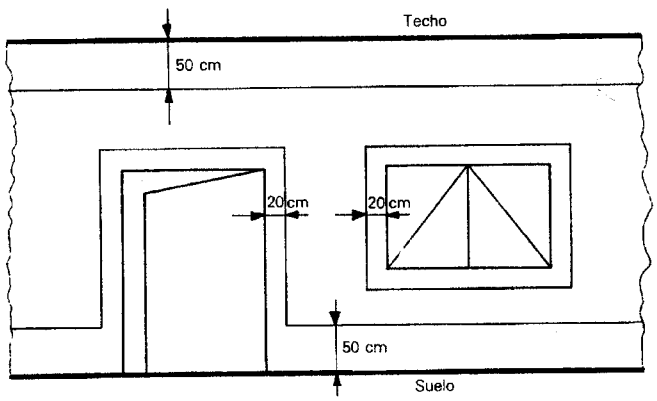


Figura 31. Espacio para tubos protectores empotrados.

3.2.- Desarrollo e indicaciones constructivas.

El proceso de una ejecución racional, supuesta una instalación convencional empotrada, es el siguiente:

1° Se elige y se marca "in situ" el lugar exacto donde van a ir instalados los receptores, (a veces materializado por un porta-receptor y otras veces materializado por una toma de corriente) y seguidamente los mecanismos de accionamiento, con los emplazamientos adecuados dejando los márgenes de seguridad en paramentos y la localización más cómoda para su manipulación.
2° Se señalan y se trazan las rozas por donde han de pasar las líneas generales y las líneas auxiliares que enlazan receptores y mecanismos, disponiendo, así mismo los emplazamientos de las cajas de derivación y empalme que exige cada caso, buscando en lo posible, las distancias más cortas. (Se evitarán las rozas que comprometan las características resistentes de muros o paredes, como por ejemplo las horizontales).
3° Seguidamente, se practica la apertura de las rozas marcadas y de los huecos de cajas y mecanismos. (Modernamente se dispone de maquinaria auxiliar muy adecuada, como el sistema de fresas eléctricas, que permiten avances rápidos de estos trabajos).
4° Una vez abiertas las rozas, se introducen los tubos protectores y las cajas de derivación y de mecanismos, procurando que los cambios de dirección sean con ángulos muy abiertos y las curvas con radios amplios y secciones uniformes, cubriendo posteriormente los mismos con mortero de yeso.
5° Una vez bien fijados los tubos y cajas se introducen los "guías" entre caja y caja que han de servir para el paso de los conductores, los cuales se introducen todos a la vez en cada tramo, (entre cajas).
6° A continuación se empalman los conductores y se conectan a los mecanismos portarreceptores y tomas de corriente.

Es innecesario advertir que este proceso es el que se sigue en los casos de instalación bajo tubo y empotrados, pero que no corresponde siempre al proceso desarrollado en toda la instalación que permite otras soluciones, como tubos al aire, sin empotrar, conductores a través de huecos de la construcción, bajo molduras, rodapiés, etc..

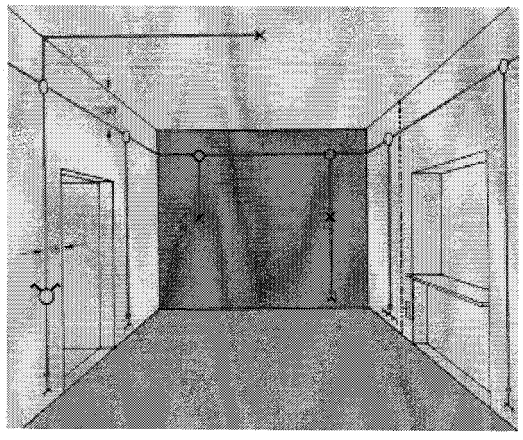


Figura 32. Ejemplo de tendido con cajas de derivación.

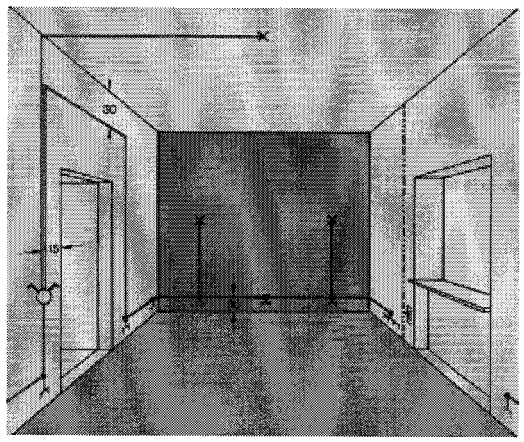


Figura 33. Ejemplos de tendido con cajas de derivación para aparatos.

3.3.- Situación de mecanismos.

Es muy importante, el fijar en planos de alzado, la situación exacta de los mecanismos y puntos de luz y enchufe, ya que frecuentemente, partiendo exclusivamente de los planos de instalación en planta, se deja a la arbitrariedad del instalador la situación de estos elementos, lo que a veces termina en una mala colocación de los mismos, que se sufre de una forma continua siempre que se utilice la instalación. A este respecto, es importante el conocer de antemano la disposición adecuada del mobiliario que lleva cada habitación y que requieren un emplazamiento fijo de determinados puntos. En cuanto a la altura de situación de los mecanismos, éstos se deben disponer en el lugar más cómodo para su accionamiento, dando solamente a título informativo las cotas que se indican en las figuras 35 y 36. Es recomendable disponer una toma de corriente para cada receptor, y evitar en la medida de lo posible la siempre poco recomendable de "salida múltiple" de una misma base de enchufe, para el servicio de varios receptores simultáneamente. Así es recomendable seguir las siguientes pautas:

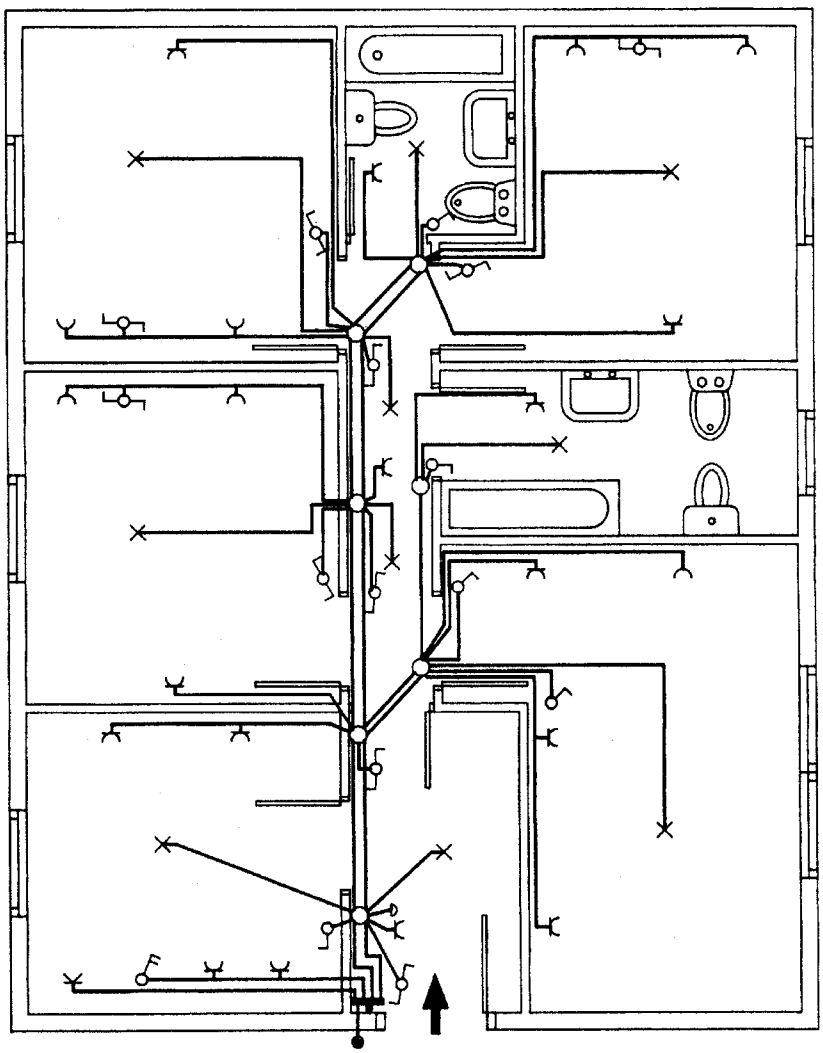


Figura 34. Situación de dispositivos.

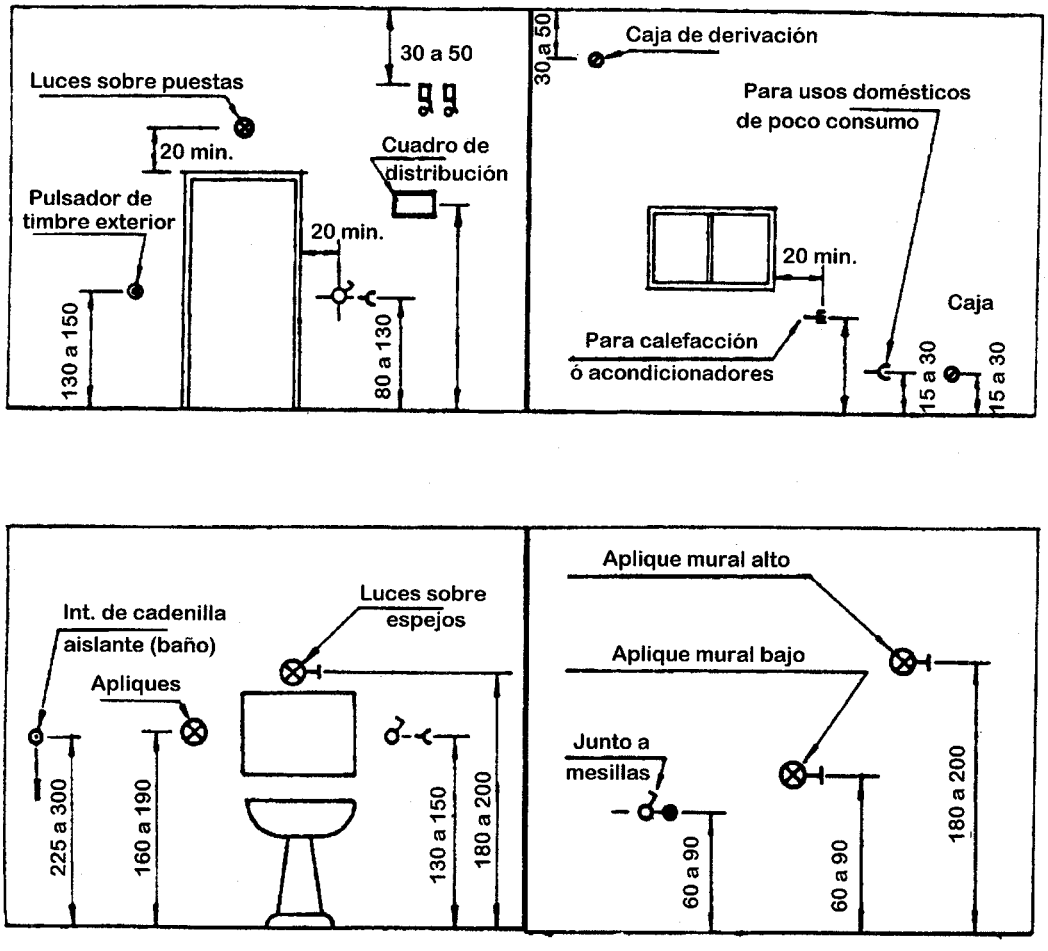


Figura 35. Situación de dispositivos.

- Las cajas de derivación se situarán en la pared a unos 30 cm del techo.
- Las cajas para bases de enchufe se situarán en la pared a 20 cm del suelo.
- Los interruptores, conmutadores y pulsadores se situarán en la pared a una distancia entre 110 cm y 120 cm desde el suelo, y a 20 cm del borde del tabique o pared.
- El cuadro de dispositivos privados de mando y protección y la caja del ICP se situarán entre 180 cm y 200 cm del suelo.
- En la cocina, y dada la cantidad de tomas de corriente que hay que instalar, es recomendable situar éstas a una **distancia** determinada **desde el suelo,** queestá en función de las características dimensionales de los muebles y electrodomésticos, que suelen tener unas medidas normalizadas. Las distancias recomendadas desde el suelo son:

  - Toma de corriente de la cocina: 20 cm.
  - Toma de corriente de lavavajillas, frigorífico, lavadora, secadora, etc., entre 30 y 40 cm.
  - Tomas de corriente para pequeños electrodomésticos: 110 cm.
  - Tomas de corriente para alumbrado de muebles de cocina: 133 cm.
  - Toma de corriente para extractor de humos: 160-180 cm.

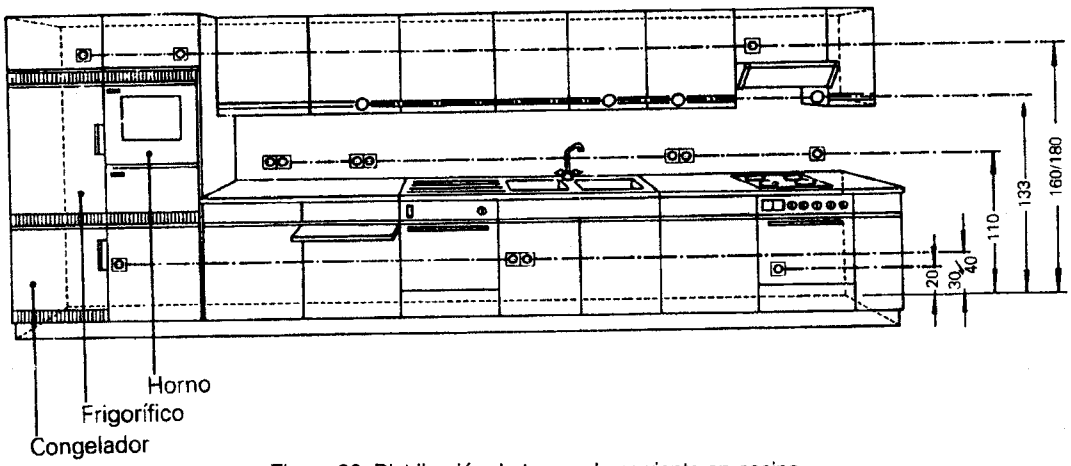


Figura 36. Distribución de tomas de corriente en cocina.

Es también importante destacar aquí, la necesidad de que las características eléctricas de los mecanismos de los receptores de cada instalación estén de acuerdo con los consumos de los receptores y con el nivel de electrificación, debiendo destacar estas características sobre las puramente estéticas y ornamentales, que a veces hacen olvidar las anteriores.

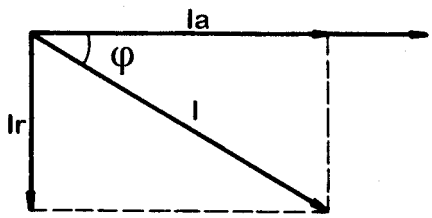
TEMA 15. COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA EN UNA INSTALACIÓN DE B.T.

1.- INTRODUCCIÓN.

Todos los equipos de las instalaciones eléctricas necesitan energía activa (kWh), que siempre se tendrá que comprar a la compañía suministradora. Muchos equipos necesitan para su funcionamiento energía reactiva. Se puede comprar totalmente esta energía reactiva a la compañía suministradora, que naturalmente tendrá que producirla en sus centrales y transportarla por sus redes de transporte, o bien producirla en la propia instalación, mediante baterías de condensadores, que es bastante sencillo, y resultará mucho más económico en muchos casos.

En la mayoría de las instalaciones eléctricas, la intensidad consumida queda desfasada, normalmente en retraso, respecto a la tensión aplicada, un ángulo φ. La corriente puede descomponerse en dos componentes:

- Componente activa Ia, en fase con la tensión aplicada.
- Componente reactiva Ir, retrasada 90° respecto de la tensión aplicada.



Intensidad de carga

Diagrama de potencia

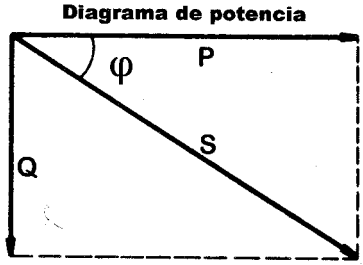


Figura 1. Componentes de intensidad y potencia.

La corriente total I es la suma geométrica de estas dos componentes y vale:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \qquad (1)$$

Según vemos en la figura 1. Se cumplen, además, las siguientes relaciones:

$$I_a = I\cos\varphi$$
$$I_r = I\operatorname{sen}\varphi \qquad (2)$$

Con la potencia consumida se puede realizar una composición idéntica (figura 1).

- **Potencia activa P:**

Es la potencia en kW absorbida por la carga. Es proporcional a la componente activa de la corriente y vale:

$$P = \sqrt{3}U\, I_a = \sqrt{3}UI\cos\varphi \text{ en una carga trifásica}$$
$$P = U\, I_a = UI\cos\varphi \text{ en una carga monofásica} \qquad (3)$$

- **Potencia reactiva Q:**

  Se llama así a una potencia que algunos equipos eléctricos (motores, transformadores, lámparas fluorescentes, etc.), necesitan consumir para su funcionamiento. Es proporcional a la componente reactiva de la corriente Ir y vale en kVAr:

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{3}U\, I_r = \sqrt{3}UI\operatorname{sen}\varphi \text{ en una carga trifásica} \\ Q &= U\, I_r = UI\operatorname{sen}\varphi \text{ en una carga monofásica} \end{aligned} \qquad (4)$$

- **Potencia aparente total S:**

  Es la suma geométrica de las dos anteriores y vale en kVA:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{P^2 + Q^2} \\ S &= \sqrt{3}U\, I \text{ en una carga trifásica} \\ S &= U\, I \text{ en una carga monofásica} \end{aligned} \qquad (5)$$

- **Factor de potencia (cos φ):**

  Es el coseno del ángulo existente entre la potencia activa P y la aparente total S. Se obtiene dividiendo la potencia activa entre la potencia aparente.

$$\text{Factor de potencia} = \cos\varphi = \frac{P}{Q} \qquad (6)$$

2.- EFECTOS DE LA POTENCIA REACTIVA EN LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS.

Debido a la necesidad de potencia reactiva de las cargas, vemos que éstas tienen que absorber una intensidad I mayor que la que sería necesaria para obtener la potencia activa (componente activa I_a). Si la potencia reactiva se suministra desde los centros de generación, ésta tendrá que circular por los mismos equipos que la potencia activa, y todas las líneas de transporte y distribución, transformadores y otros equipos deberán ser calculados con arreglo a la suma geométrica de la potencia activa y de la potencia reactiva, es decir, con arreglo a la potencia aparente, que al ser mayor que la potencia activa necesaria produce:

- Unos costes mayores de instalación al ser mayor S que P.
- Un aumento de las pérdidas en toda la red, pues las pérdidas son proporcionales a I^2 y no a I_a^2, e I es mayor que I_a.

Ahora bien, esta potencia reactiva que necesitan las cargas, se puede generar mediante condensadores estáticos en los mismos puntos de consumo. De esta forma, el sistema de transporte y distribución no tiene que soportar la circulación de potencia reactiva y se evitarán en gran medida los dos inconvenientes mencionados en el párrafo anterior. El siguiente ejemplo aclarará estos conceptos.

Sea un motor de 400 kW con un factor de potencia cos φ = 0,65. Este motor está alimentado a través de una línea de transporte por un generador con suscorrespondientes

transformadores, elevador y reductor, respectivamente. En estas condiciones, el motor necesitará una potencia aparente y una potencia reactiva Q:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{400}{0.65} = 615 \text{ kVA}$$
$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{615^2 - 400^2} = 467 \text{ kVAr} \qquad (7)$$

Si esta potencia reactiva Q = 467 kVAr se suministra desde el generador (figura 2a), todos los equipos del sistema (generador, línea, transformadores), deberán ser capaces de transportar no sólo la potencia activa del motor P = 400 kW, sino también la reactiva antes indicada, o lo que es lo mismo, una potencia aparente S = 615 kVA, valor para el que deberán diseñarse.

Si por el contrario (figura 2b) se suministrase, mediante una batería de condensadores de 467 kVAr situado junto al motor, la potencia reactiva que necesita éste no tendría que ser producida por el generador, ni circular por líneas y transformadores. Sólo circularía por el sistema de transporte la potencia activa de 400 kW. Por tanto, se diseñarían los equipos (generador, transformadores, líneas), para una potencia aparente igual a la potencia activa S = P = 400 kVA. En este segundo caso se consiguen, evidentemente, unos menores costes de instalación en todo el sistema de transporte y generación.

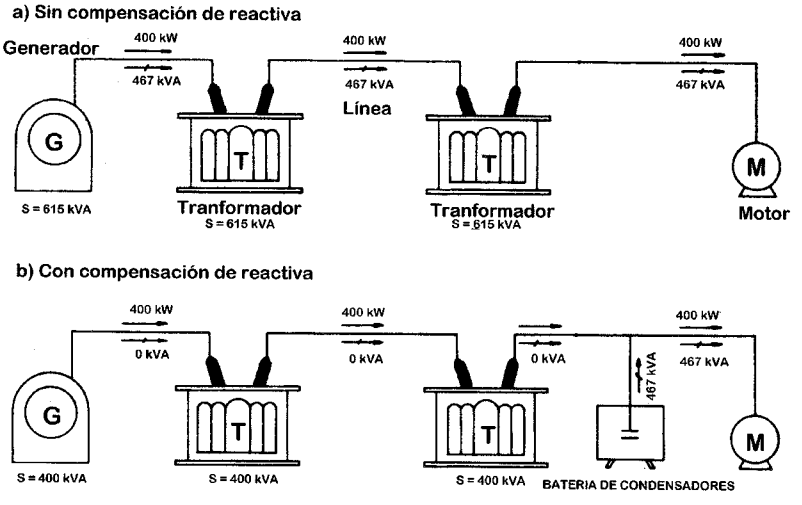


Figura 2. Circulación de potencia reactiva en el sistema eléctrico.

3.- RECARGO EN LAS TARIFAS POR ENERGÍA REACTIVA.

Como hemos visto en el apartado anterior, si la energía reactiva que las cargas necesitan no es generada en los centros de consumo, es necesario producirla en las centrales de generación. Debe recorrer todo el sistema de transporte y distribución hasta llegar al consumidor, produciendo:

- Aumento en los costes de instalación.
- Aumento de las pérdidas.

Simplificando, y volviendo a las figuras 1 y 2, podríamos decir que la compañía distribuidora, para entregar y vender una potencia activa P, deberá producir y transportar una potencia aparente S que es mayor (lo mismo podría decirse con las intensidades activa I_a y total I), lo cual produciría un aumento de sus costes.

Por estos motivos se establecen unos recargos porcentuales sobre el coste de la electricidad en función del factor de potencia, cos , al que la compañía suministra la energía eléctrica a un abonado. De esta forma, un abonado que tenga consumo de energía reactiva, si la toma totalmente de la red, el cos será bajo y pagará un alto recargo; si la produce él mismo en su instalación, ya no tendrá que tomarla totalmente de la red; el cos será alto y pagará un bajo recargo, o no lo pagará, según los casos.

- **Cálculo del recargo:**

Las expresiones que dan estos recargos kr (%) son:

- Para tarifas de alumbrado B1 y B2:

$$kr\,(\%) = 100 \times (0{,}95 - \cos\varphi) \qquad (8)$$

No se aplicarán bonificaciones para cos mayores de 0,95.

- Para tarifas de fuerza y especiales:

$$kr\,(\%) = \frac{17}{\cos^2\varphi} - 21 \qquad (9)$$

Cuando kr es negativo (cos φ > 0,90) se producen bonificaciones. En ambos casos este coeficiente se aplicará a la suma de los términos de potencia y de energía.

El factor de potencia cos φ se calcula, en general mediante la fórmula:

$$\cos\varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} \qquad (10)$$

donde:

Wa: Cantidad registrada en el contador de energía activa expresado en kWh.
Wr: Cantidad registrada en el contador de energía reactiva expresado en kVArh.

salvo:

1. En instalaciones de menos de 50 kW instalados en que no haya contador de energía reactiva, el cos φ se asigna según las características de la instalación.

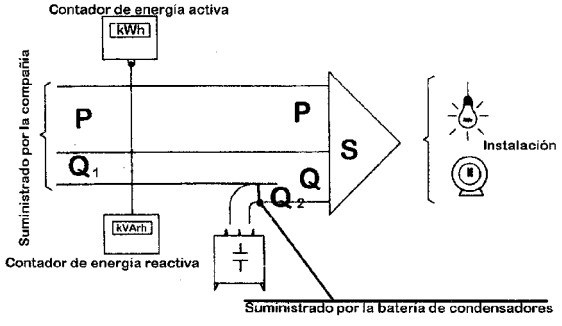
2. En instalaciones de más de 100 kW instalados, en que haya instalados maxímetros de potencia activa y reactiva. En este caso Wa y Wr son los valores máximos indicados por dichos maxímetros en el período de facturación.

4.- VENTAJAS TÉCNICO-ECONÓMICAS OBTENIDAS CON EL USO DE LOS CONDENSADORES PARA PRODUCIR ENERGÍA REACTIVA. CÁLCULO DE LA POTENCIA REACTIVA NECESARIA.

Las ventajas obtenidas pueden resumirse en:

- Reducción en el coste de la energía eléctrica.
- Posibilidad de aumento en la potencia instalada.
- Mejora de los niveles de tensión en la red.
- Reducción de las pérdidas eléctricas en la instalación.

Se ha analizado en el apartado anterior los recargos que las compañías distribuidoras imponen cuando suministran la energía eléctrica con factores de potencia bajos, es decir, cos φ, bajos.



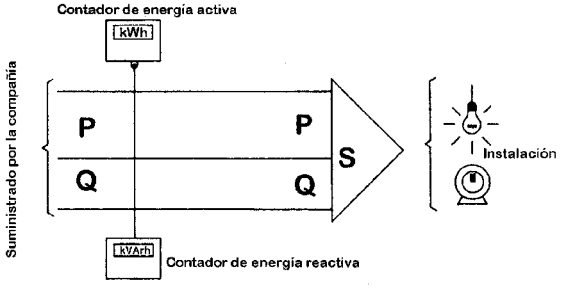


Figura 3. Suministro de energía eléctrica a una instalación.

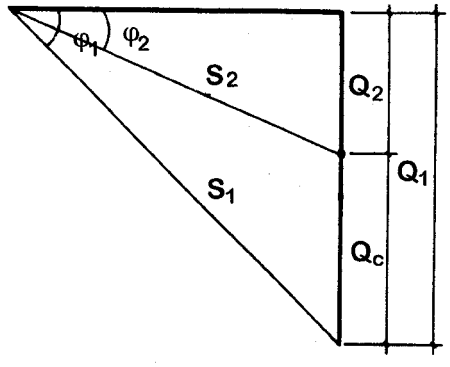


Figura 4. Mejora del factor de potencia.

Se va a calcular la potencia reactiva necesaria en un equipo o instalación, para aumentar el factor de potencia. Nuestro objetivo es seguir teniendo la misma potencia activa para nuestra instalación, pero lograr un cos φ alto en la acometida, es decir, evitar los recargos por exceso de consumo de potencia reactiva de la red.

Sea una instalación o un equipo, que consume una potencia activa P con un determinado factor de potencia cos φ_1. Para esta situación (figura 4), tenemos una potencia aparente S_1 y una potencia reactiva sacada íntegramente de la red Q_1. Queremos llegar a un factor de potencia cos φ_2, tal y como se indica en la figura 4, con S_2 y Q_2 consumidos de la red. Luego tendremos que producir con los condensadores una potencia reactiva:

$$Qc = Q_1 - Q_2 \qquad (11)$$

En ambos casos la potencia activa P es la misma. De la figura 4 tenemos:

$$\text{tag}\varphi_1 = \frac{Q_1}{P} \qquad (12)$$

y en la situación final:

$$\text{tag}\varphi_2 = \frac{Q_2}{P} \qquad (13)$$

Por tanto, la potencia Q_c de los condensadores tendrá que ser:

$$Qc = Q_1 - Q_2 = P[\text{tag}\varphi_1 - \text{tag}\varphi_2] \qquad (14)$$

Existen cuadros y gráficos que facilitan el cálculo rápido de los kVAr necesarios para elevar el factor de potencia, desde un valor conocido a un valor deseado. Damos la figura 5 en el que se encuentran los valores ($tg\varphi_1$ - $tg\varphi_2$). Se obtiene la potencia reactiva en kVAr necesaria por unidad de potencia activa en kW. Para hallar la potencia reactiva total en kVAr, es suficiente multiplicar estos valores por el número de kW que represente la potencia activa.

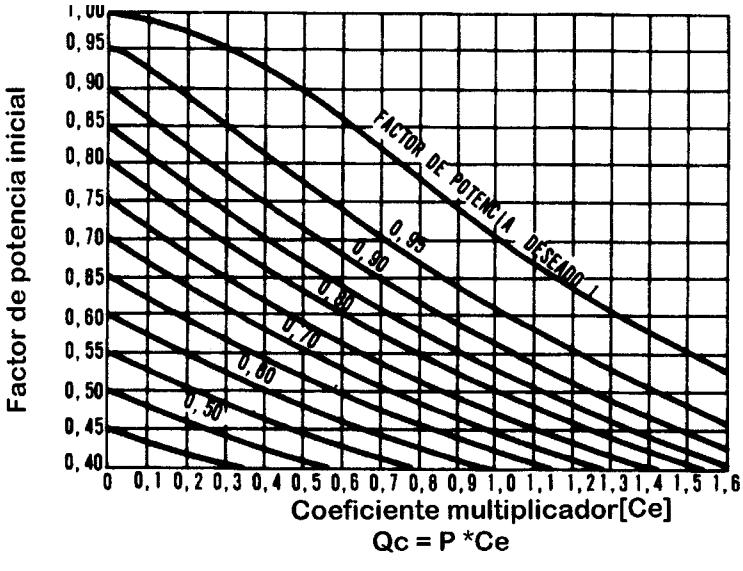


Figura 5. Diagrama para el cálculo de la potencia reactiva.

5.- FORMAS DE COMPENSAR LA ENERGÍA REACTIVA.

Existen tres alternativas técnicamente admisibles para la compensación de la potencia reactiva en una instalación:

- Compensación individual.
- Compensación general (baterías de condensadores).
- Compensación mixta.

La compensación individual es técnicamente la solución idónea por cuanto el condensador al conectarse a bornes del receptor, descarga la red y la propia línea de alimentación a éste. Al mismo tiempo, no exige la posibilidad de sobrecompensación, por cuanto el condensador trabaja mientras lo hace el receptor. Sin embargo, este sistema tiene sus limitaciones prácticas en cuanto se trata de compensar un gran número de receptores de pequeña potencia, presentando al mismo tiempo el inconveniente de un coste superior al de la compensación centralizada. Por estasrazones la compensación individual queda reservada a receptores de gran potencia y/o cuando hay un número limitado de éstos. En los demás casos, que se supone la gran mayoría se recurre a la compensación centralizada automática.

5.1.- Compensación individual.

Usando este método, obtenemos una compensación única sobre el receptor a compensar (motor, transformador, etc.).

Esta compensación consiste en la conexión de un condensador o grupo de condensadores a cada lugar de consumo. Al producirse la anulación de la corriente reactiva justo en el receptor, obtenemos una notable mejora en la sección de conductor de la instalación pudiendo conectar otras cargas al cuadro general de distribución o simplemente lo mejoraremos.

Este tipo de compensación se realiza en instalaciones donde los receptores están muy **identificados y existen pocos**, obteniendo una descarga del centro de transformación, con el consiguiente beneficio en potencia disponible (kW). Esta corrección se puede efectuar en motores o transformadores.

5.1.1.- Motores.

Los motores trifásicos más frecuentemente utilizados son los motores asíncronos, los cuales consumen en vacío casi sólamente potencia reactiva.

Salvo en motores de alta tensión, se puede observar, consultando catálogos de distintos fabricantes, que para motores de potencia media, (hasta 500 CV), el factor de potencia de estos motores es inferior a 0,9. Al aumentar la potencia del motor, así como su velocidad nominal, el cos φ aumenta, pero no llega a ser superior a 0,95.

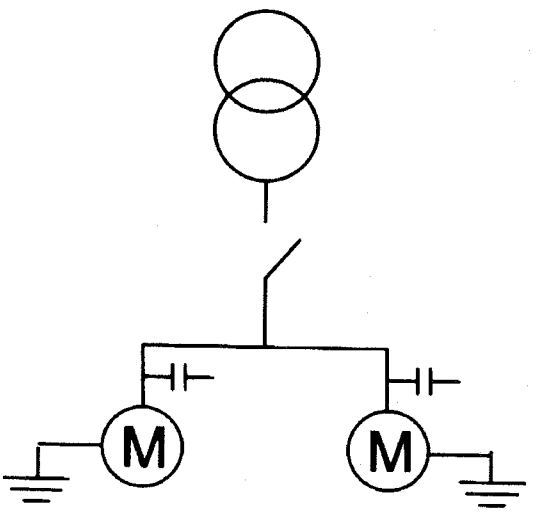


Figura 6. Compensación individual de un motor.

Por tanto, en algunos casos puede interesar compensar individualmente un motor, especialmente en casos de motores con largo tiempo de conexión, motores de gran potencia, o bien en aquellos cuyos cos φ sea muy bajo. En estos casos, figura 6, el condensador se sitúa directamente junto al motor y se conecta y se desconecta con éste. Con esta forma de compensación se descarga, además, la línea de alimentación al motor. En vacío, los motores asíncronos consumen casi exclusivamente potencia reactiva, por tanto, la potencia de la batería de condensadores elegidos debe de ser inferior que la absorbida en vacío por el motor, para evitar autoexcitaciones que pudieran producirse después de la desconexión, produciéndose sobretensiones inadmisibles que dañasen los devanados del motor. Para evitar esta autoexticación de los devanados no deberá sobrepasar el 90% de los valores recomendados para funcionamiento en vacío.

La potencia necesaria de los condensadores para la corrección de los motores viene dada en función del estado de carga y de la velocidad nominal del motor. En la tabla1 se podrán obtener los kVAr necesarios para la compensación en función de los kW o C.V. y r.p.m. del receptor.

Si es cierto, que esta tabla es válida para motores con un devanado sin modificar por una reparación, pues un motor rebobinado tiene un cos inferior al que el fabricante indica en la placa de características.

VALORES INDICATIVOS DE LA POTENCIA REACTIVA ABSORVIDA PARA											
Potencia nominal del motor		3.000 r.p.m.		1.500 r.p.m.		1.000 r.p.m.		750 r.p.m.		500 r.p.m.	
kW	CV	En vacío	A plena carga	En vacío	A plena carga	En vacío	A plena carga	En vacío	A plena carga	En vacío	A plena carga
0,18	1/4	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6
0,37	1/2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,7	0,9
0,55	3/4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6	0,8	0,7	0,7	0,9
0,75	1	0,5	0,6	0,5	0,7	0,6	0,8	0,7	0,9	0,8	1
1,1	1,5	0,7	0,9	0,7	1	0,9	1,2	1	1,3	1,1	1,4
1,5	2	0,8	1	1	1,2	1,1	1,4	1,2	1,6	1,3	1,8
2,2	3	1,1	1,4	1,2	1,5	1,4	1,8	1,7	2,2	2	2,4
3	4	1,5	1,8	1,6	2	1,8	2,4	2,3	3	2,5	3,2
4	5,5	1,8	2,6	2	2,6	2,2	2,9	2,7	3,5	2,9	3,8
5,5	7,5	2,2	2,9	2,4	3,3	2,7	3,6	3,2	4,3	4	5,2
7,5	10	3,4	4,4	4,8	4,8	4,1	5,4	4,6	6,1	5,5	7,2
11	15	5	6,5	5,5	7,2	6	8	7	9	7,5	10
15	20	6,5	8,5	7	9,5	8	10	9	12	10	13
18,5	25	8	11	9	12	10	13	11	15	12	16
22	30	10	12,5	11	13,5	12	15	13	16	16	18
30	40	14	18	15	20	17	22	20	25	22	28
37	50	18	24	20	27	22	30	26	34	29	39
45	60	19	28	21	31	24	34	28	38	31	43
75	75	22	34	25	37	28	41	32	46	36	52
75	100	28	45	32	49	37	54	41	60	45	68
90	125	34	54	39	59	44	65	48	72	54	83
110	150	40	64	46	70	52	76	58	85	63	98
132	180	45	72	53	80	60	87	67	97	75	110
160	220	54	86	64	96	72	103	81	116	91	132
200	270	66	103	77	115	87	125	97	140	110	160
250	340	75	115	85	125	95	137	105	150	120	175

Tabla 1. Potencia reactiva necesaria para la compensación de un motor.

En la compensación individual de motores es importante tener en cuenta el tipo de arranque.

- **Arranque directo:**

Es necesario realizar la compensación a través del contactor del motor y no directo a bornas (figura 7) con resistencias de descarga rápida, pues la influencia de descarga del condensador es muy importante.

- **Arranque estrella-triángulo:**

Hay que tener la precaución de montar un condensador con contactor "tipo protegido", pues en los arrancadores manuales, al pasar de estrella a triángulo el condensador se queda sin tensión, y cuando éste vuelve a conectarse se producen **puntas de corrientes** muy altas por encontrarse en desfase con la red, con los consiguientes problemas.

En los arrancadores automáticos por contactores, este problema no se suscita, ya que el condensador no se queda sin tensión durante la transición.

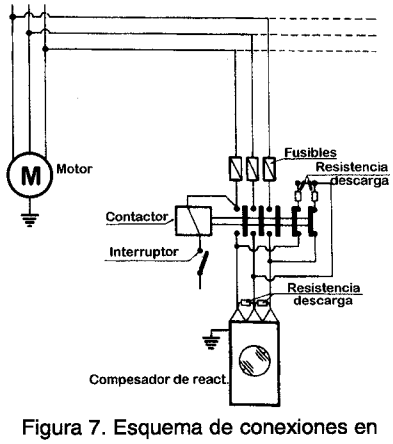


Figura 7. Esquema de conexiones en un arranque directo.

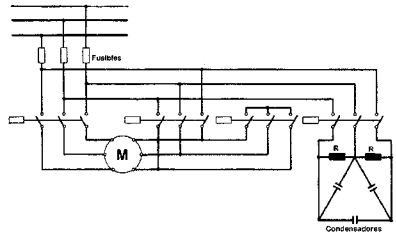


Figura 8. Esquema de conexiones en un arranque estrella-triángulo.

Otra solución comúnmente utilizada es la compensación con condensadores de 6 terminales conectado a bornes de motor. Al desconectar el contactor estrella se inicia la descarga del condensador, aunque no puede completarse debido a la tensión residual del motor a causa de la rotación. Por tanto, al pasar a triángulo se produce cierta oposición de fases y en consecuencia corrientes de conexión relativamente elevadas. Por otra parte debe ajustarse de nuevo la regulación del relé térmico a consecuencia de la corriente del condensador.

En la figura 9 se muestra posibles disposiciones de condensador junto a motor trifásico.

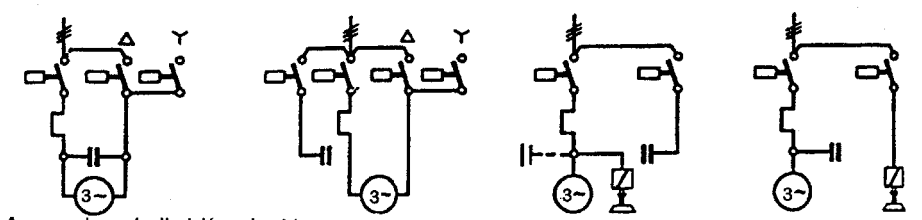


Figura 9. Esquema de conexiones condensador y motor.

5.1.2.- Transformadores.

Los transformadores no hacen de suministradores de Energía Reactiva, más de la que necesiten los receptores conectados a su secundario, pero él mismo absorbe para su propio consumo.

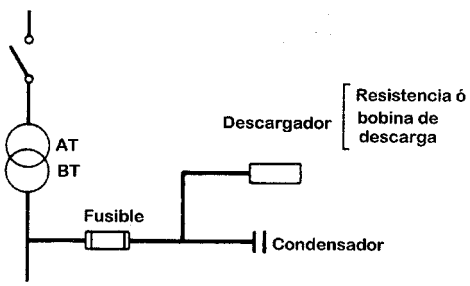


Figura 10. Compensación permanente de la potencia reactiva de un transformador.

Los transformadores necesitan una energía del 3 al 5% de su potencia nominal en potencia de magnetización. Para la **compensación individual** (figura 10) se toma como base el consumo en vacío, se puede admitir en potencia del condensador el 5% de la potencia nominal del transformador, sin que haya que temer con ello elevaciones de tensión.

Los transformadores de soldadura se compensan con el 50% y los transformadores rectificadores de soldadura con el 100% de sus potencias aparentes.

En transformadores de potencia se conectan los condensadores en el secundario (lado de baja tensión), en los transformadores de soldadura se compensa en el primario.

POTENCIA NOMINAL DEL TRANSFORMADOR EN kVA	POTENCIA DEL CONDENSADOR EN kVA. PARA LAS TENSIONES		
	5/10kV	15/20kV	25/30kV
25	2	2,5	3
50	3,5	5	6
75	5	6	7
100	6	8	10
160	10	12,5	15
250	15	18	22
315	18	20	24
400	20	22,5	28
630	28	32,5	40
800	36	42	49
1000	45	52	62

Tabla 2. Compensación de energía reactiva de transformadores.

En la tabla 2 se muestra la potencia de condensadores para la compensación de energía reactiva de los transformadores. Estos condensadores se conectan a través de fusibles, y con resistencias o bobinas de choque para la descarga de los condensadores, para evitar riesgos al personal en el caso de fusión de los fusibles.

5.1.3.- Otros elementos.

Existen otros muchos receptores no citados que absorben energía reactiva. Por su importancia y extensión en la industria cabe destacar la soldadura de resistencia y de arco. En ambos casos el bajo factor de potencia es debido a la elevada reactancia de dispersión del transformador de alimentación.

Para la soldadura de resistencia monofásica (a puntos, de testa, etc.) el factor de potencia está comprendido entre 0.6 y 0.8 para materiales férricos y entre 0.3 y 0.5 para los no férricos.

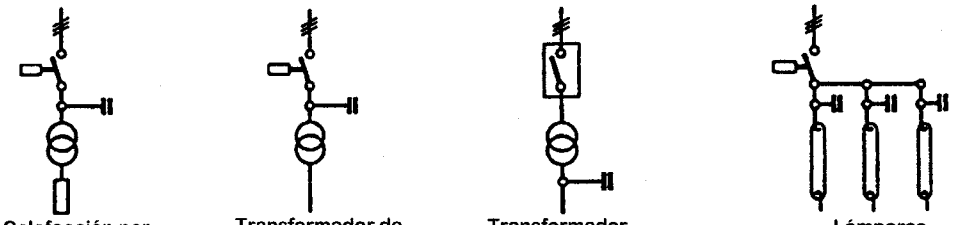


Figura 11. Otros elementos eléctricos con compensación de energía reactiva.

En la soldadora de arco monofásica el factor de potencia se sitúa entre el 0.3 y el 0.5. Debido a que el servicio de este tipo de soldadura se caracteriza por largos periodos de funcionamiento en vacío, sera suficiente con conectar en bornes una potencia de condensador de aproximadamente el 30% de la del transformador. Los hornos de inducción para fusión con frecuencias de 50 a 1000 Hz tienen un factor de potencia que oscila de 0.1 a 0.5 y por su importancia y por la forma muy particular de efectuar la corrección, son objeto de estudio específicos. También es muy particular el caso de los hornos de arco.

5.2.- Compensación general.

A partir de las normativas existentes dentro del "Reglamento de electrotécnico de baja tensión" actualmente en vigor, en el apartado 18 de la instrucción MIE BT 031, se indica:

"Las instalaciones que suministren energía a receptores de los que resulte un factor de potencia inferior a 1, podrán ser compensadas, pero sin que en ningún momento la energía absorbida por la red pueda ser capacitiva".

En el caso de grandes instalaciones eléctricas, con un gran número de consumidores de potencias diferentes y de conexión variable, si se hiciera compensación individual siempre habría una gran parte de los condensadores instalados sin utilizar. Por este motivo se utilizan grandes baterías de condensadores, reunidas en un solo punto, con una unidad de regulación que en cada momento conecta o desconecta de manera automática los condensadores necesarios, para adaptarse a la demanda total de potencia reactiva que existe en cada momento. Así se puede mantener el factor de potencia (dentro de ciertos límites) constante y con un valor bastante elevado (figura 12).

Los trabajos de mantenimiento son menos costosos, ya que se realizan en un solo punto. La potencia total de condensadores necesaria es menor por las razones que hemos expuesto en el párrafo anterior. No obstante, este método no permite ampliar la potencia instalada, sin modificar la instalación, pues la potencia reactiva suministrada por esta unidad central se distribuye por todos los circuitos de la instalación. No hay reducción de la corriente reactiva en las líneas internas. No se podrá utilizar este sistema cuando las líneas vayan sobrecargadas.

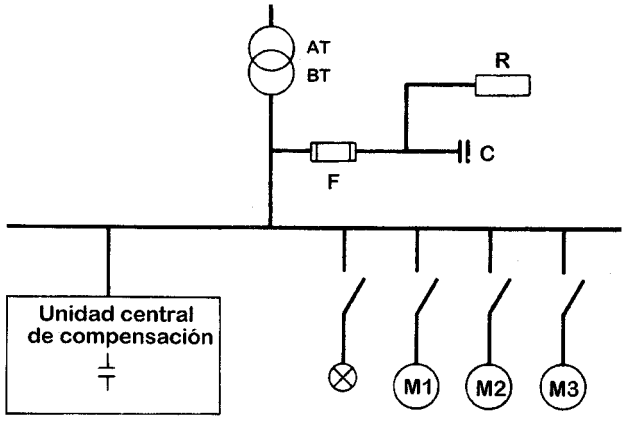


Figura 12. Esquema de conexión de baterías de condensadores autorreguladas en la compensación general.

Por tanto, no hay reducción de pérdidas internas en la instalación. Sólo se descargan de corriente reactiva las líneas de alimentación externa, consiguiendo, por tanto, una reducción en el coste de la energía eléctrica.

Los componentes esenciales de una instalación de este tipo son:

- Condensadores.
- Regulador de potencia reactiva. Mide a través de transformadores de intensidad y tensión, el consumo de potencia reactiva en la acometida, y da las órdenes oportunas de conexión o desconexión a los contactores de los condensadores.
- Fusibles.
- Dispositivos de descarga de los condensadores. Para evitar riesgos de descarga al personal una vez desconectados los condensadores. El condensador queda cargado al desconectarse y entre sus bornas existe la tensión de alimentación, que puede representar en ocasiones un peligro grave. Los elementos de descarga (resistencias o bobinas de choque) han de ser capaces de reducir la tensión nominal a 50 V en 5 minutos para los condensadores de tensión superior a 600 V, y en un minuto para los de tensión inferior.
- Contactores. Para la maniobra de conexión y desconexión de los condensadores.

La potencia reactiva total necesaria se calcula según se expuso anteriormente, es decir, se calculará la potencia reactiva necesaria para pasar de un factor de potencia medio cos φ_1 a otro cos φ_2 más elevado, en una instalación que exige una potencia activa media P. A los valores obtenidos se les añadirá de un 10 % a un 20 %, para poder amortiguar los valores de punta y crear una reserva para ampliaciones posteriores. Después se elegirá el número y la potencia de cada etapa de regulación.

Se debe considerar también, si la potencia de compensación se ha de cubrir totalmente a base de una unidad central con regulación automática, o bien si algunos equipos, como por ejemplo: transformadores o algún motor, se compensan individualmente, y el resto mediante la unidad central de regulación automática.

En general a los equipos de regulación es necesario exigirle:

- Contactores adaptados a corte de corrientes capacitivas.
- Fusibles de alto poder de corte.
- Impedancias limitadoras de intensidad.
- Resistencias de descarga rápidas (acopladas a los contactores).
- Reactancias de filtros de rechazo para armónicos en el caso de que fuera necesario.

Las baterías equipadas con el regulador automático de energía reactiva permiten la conexión de escalones de igual o distinto potencial, según las necesidades de utilización. La conexión o desconexión de escalones está controlada por un microprocesador que chequea la corriente (inductiva o capacitiva) que circula en cada momento por la red.

En general, la relación de escalonamiento de los condensadores de una batería automática son básicamente sistemas:

- Relación 1.1.1. En este caso todos los escalones son de igual potencia. La potencia total de la batería se divide entre el número de escalones que tiene el regulador automático.
- Relación 1.2.2. En este caso, la potencia de los condensadores siguientes al condensador situado en primer escalón, es el doble. Con este sistema, y siempre a través del regulador automático entrarán los condensadores según la necesidad, sin que el primer escalón actúe innecesariamente. De esta manera se evita el desgaste prematuro del primer condensador.
- Relación 1.2.4. En este caso, la potencia de los condensadores siguientes al condensador situado en el primer escalón es el doble de la potencia, y el tercer escalón el cuádruple que el primer actuando igual que el sistema anterior.

Los escalones pueden conectarse de forma circular para permitir un desgaste uniforme de los contactores.

5.3.- Compensación mixta.

En algunas instalaciones se suele proceder a la compensación mixta del factor de potencia, que consiste en corregir el coseno de forma individual en algunos motores y, además, instalar una batería autorregulada para el resto de los receptores. Este método tiene la ventaja de que la batería corrige también el residuo no compensado por los condensadores en los motores.

Algunos ejemplos son:

- Instalaciones con suministro en media y alta tensión.
- Grandes instalaciones con motores muy grandes definidos y muchos receptores de menor potencia.
- Usos comunes de edificios singulares compensando individualmente los ascensores.

6.- COMPENSACIÓN AUTOMÁTICA DEL FACTOR DE POTENCIA.

Los reguladores de energía reactiva controlados por microprocesador; conectan o desconectan de forma automatica los condensadores para la corrección del factor de potencia, de acuerdo con la corriente inductiva o capacitiva que circula por la red. De sus características cabe destacar:

- Distintos programas desconexión:
  - 1:1:1: ... potencia iguales por escalón.
  - 1:2:2: ... 1er escalón de potencia mitad de los restantes.
- Conexión circular de escalones. Son para permitir un desgaste uniforme de contactores.
- Desconexión por falta de tensión, evitando que al regular la alimentación pueda aparecer una tensión residual en los condensadores.
- Ajuste "C/k", que evita el fenómeno de "penduleo". La conexión (desconexión) de un escalón se produce cuando la demanda (sobrecompensación) supera el 70% del valor de ésta.
- El display permite visualizar el cos φ así como la indicación de anomalías.
- Posibilidad de mando manual.

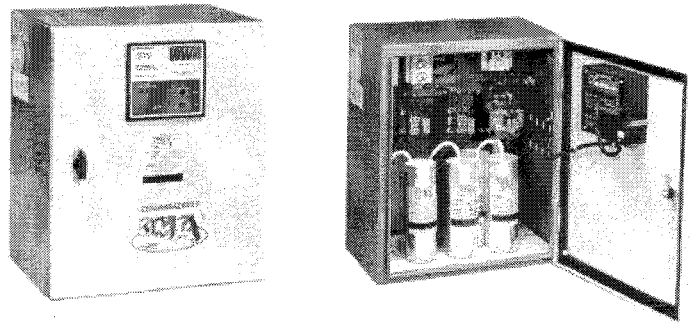


Figura 13. Compensador de energía reactiva.

7.- APARAMENTA DE MANDO, CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONADO.

De la aparamenta utilizada para condensadores el elemento más importante es el contactor. El dimensionado del contactor se ve afectado por la forma de realizar la compensación ya sea individual o fija o bien centralizada automáticamente. Esto es debido a que hay dos factores decisivos en la elección del contactor:

a) La intensidad y tensión nominal del condensador. Atendiendo a estos factores deberá elegirse un contactor cuya intensidad nominal sea $\geq 1{,}43 I_Q$ a la tensión de servicio del condensador Q si se trata de un condensador fijo que no esté sometido a frecuentes maniobras, y siempre que no existan otros condensadores en paralelo, este requisito puede ser suficiente para la elección del contactor. En cualquier caso siempre deberá consultarse los datos del fabricante al respecto.

b) La corriente de conexión del condensador es el segundo factor crítico en la elección del contactor. Este valor deberá ser inferior al indicado por el fabricante de contactores como valor máximo de la corriente de conexión para maniobra de condensadores. Este aspecto deberá tenerse especialmente en cuenta en el caso de condensadores conectados con otros en paralelo.

Un buen número de fabricantes indican en sus catálogos la máxima potencia de mando de sus contactores, según se trate de maniobra de condensadores fijos o formando parte de los escalones en baterías automáticas, existiendo, por tanto, otras unidades en paralelo. Por lo general se indica al mismo tiempo el valor máximo de la corriente de conexión.

Si resultara necesario limitar la corriente de conexión del condensador la mejor forma consiste en formar, con el propio cable de conexión al condensador, una bobina al aire.

- **Proceso de conexión de condensadores:**

Al conectarse un condensador a la red se producen picos de corriente muy elevados. Su valor depende de las características de la red y de si existen o no otros condensadores en paralelo. Según CEI 831 estas puntas de corriente pueden calcularse por:

a) Conexión de un condensador aislado

$$I'_Q \approx In\sqrt{\frac{2Scc}{Q}} \qquad (15)$$

b) Conexión de un condensador con otros en paralelo

$$I'_Q \approx \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{X_C X_L}} \qquad (16)$$

siendo:

$$X_C = 3U^2\left[\frac{1}{Q} + \frac{1}{Q'}\right]10^{-6}$$

donde:

- I'_Q: Valor de pico de la corriente de conexión (A).
- In: Corriente nominal del condensador (A).
- Scc: Potencia de cortocircuito en bornes del condensador.
- Q: Potencia del condensador (kVAr).
- U: Tensión simple (V).
- X_C: Reactancia capacitiva en serie por fase (Ω).
- X_L: Reactancia inductiva por fase entre condensadores (Ω).
- Q: Potencia del condensador conectado en paralelo con Q (kVAr).

Los fusibles de protección de los condensadores deberán aguantar las corrientes de choque en la conexión de éstos, por lo que sus valores deberán estar comprendidos entre 1,6 y 2 veces la intensidad nominal del condensador. Su característica puede ser del tipo gL.

Los interruptores automáticos y cables, deberán dimensionarse a 1,43 veces la intensidad nominal del condensador.

TEMA 16. INSTALACIÓN DE TIERRA DE UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA

1.- DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS INSTALACIONES DE TIERRA.

1.1.- Función de la puesta a tierra.

El cometido de la puesta a tierra en una instalación eléctrica es el de permitir la disipación hacia el terreno de las corrientes que se pudieran producir en la instalación, ya sean corrientes de defecto o las debidas a posibles descargas atmosféricas.

En el diseño de la puesta a tierra se pretende que el punto que se une a tierra se mantenga a un potencial nulo. Se verá que esto es completamente irrealizable debido a las características físicas de los componentes para ejecutar las instalaciones y sobre todo, por las propias peculiaridades del terreno. La puesta a tierra se emplea para prevenir la aparición de diferencias de potencial excesivas entre estructuras metálicas y tierra. Con un sistema de tierras se pretende conseguir:

- Seguridad para las personas y protección de las instalaciones: Limitando las diferencias de potencial excesivas entre estructuras metálicas y tierra, bien sea durante la aparición de un defecto, o en condiciones de servicio, facilitando un camino de baja impedancia a la corriente de defecto, y favoreciendo, en consecuencia, un funcionamiento rápido de los dispositivos de protección. La circulación de las intensidades mencionadas por la instalación de puesta a tierra puede originar la aparición de diferencias de potencial entre ciertos puntos, por ejemplo, entre la instalación de puesta a tierra y el terreno que la rodea o entre dos puntos del mismo, por lo que el diseño de la instalación compromete a ajustar estos valores a límites no perjudiciales para personas y material.

- Mejora de la calidad del servicio: Limitando las sobretensiones internas (de maniobra, transitorias y temporales) que puedan aparecer en la red eléctrica con determinadas condiciones de explotación.

Se debe hacer un especial énfasis en que la seguridad de las personas es lo que verdaderamente preocupa y se constituye en el fin principal de la instalación de puesta a tierra, aunque no se debe olvidar la importancia de los otros objetivos.

Los principales problemas que se presentan, aparte de otras consideraciones, en una puesta a tierra son los siguientes:

- El suelo es un conductor mediocre, muy poco homogéneo y cuyas características son siempre mal conocidas y cambiantes con las condiciones ambientales.

- La seguridad de las personas hace intervenir cuestiones de probabilidad de contacto que no se pueden poner fácilmente en una ecuación.

1.2.- Definiciones.

- **Instalación de tierra general:**
  Es la instalación de tierra resultante de la interconexión de todas las puestas a tierra de protección y de servicio de una instalación.
- **Instalaciones de tierra independientes:**
  Dos instalaciones de tierra se consideran independientes entre sí cuando tienen electrodos de tierra separados y, cuando durante el paso de corriente a tierra por una de ellas, la otra no adquiere, respecto a una tierra de referencia, una tensión mayor a 50 V.
- **Corriente de defecto a tierra:**
  Es la intensidad de corriente que en caso de un sólo punto de defecto a tierra, se deriva por el citado punto desde el circuito averiado a tierra o a partes conectadas a tierra.
- **Corriente de puesta a tierra:**
  Es la intensidad de corriente total que se deriva a tierra a través de la puesta a tierra.
- **Resistencia de tierra:**
  Es la resistencia entre un conductor puesto a tierra y un punto de potencial cero.
- **Tensión de puesta a tierra:**
  Tensión que aparece a causa de un defecto de aislamiento entre una masa y tierra.
- **Tensión de paso (MIE RAT 01):**
  Es la parte de la tensión de puesta a tierra que puede ser puenteada por un ser humano entre dos pies, considerando el paso de una longitud de 1 m.
- **Tensión de paso aplicada:**
  Es la parte de la tensión de paso que resulta directamente aplicada entre los pies de un hombre, teniendo en cuenta todas las resistencias que intervienen en el circuito y estimándose la del cuerpo humano en 1000 Ω.
- **Tensión de contacto (MIE RAT 01):**
  Es la fracción de la tensión de la puesta a tierra que puede ser puenteada por una persona entre la mano y el pie (considerando 1 m), o entre ambas manos.
- **Tensión de contacto aplicada**:
  Es la parte de la tensión de contacto que resulta directamente aplicada entre dos puntos del cuerpo humano. Considerando todas las resistencias que intervienen en el circuito y estimándose la del cuerpo humano en 1000 Ω.
- **Tensión a tierra transferida:**
  Es la tensión de paso o de contacto que puede aparecer en un lugar cualquiera, transmitida por un elemento metálico desde una instalación de tierra lejana o próxima.

1.3.- Partes que comprenden las puestas a tierra.

Todo sistema de puesta a tierra constará de las siguientes partes:

- Tomas de tierra.
- Líneas principales de tierra.
- Derivaciones de las líneas principales de tierra.
- Conductores de protección.

El conjunto de conductores, así como sus derivaciones y empalmes, que forman las diferentes partes de las puestas a tierra, constituye el circuito de puesta a tierra.

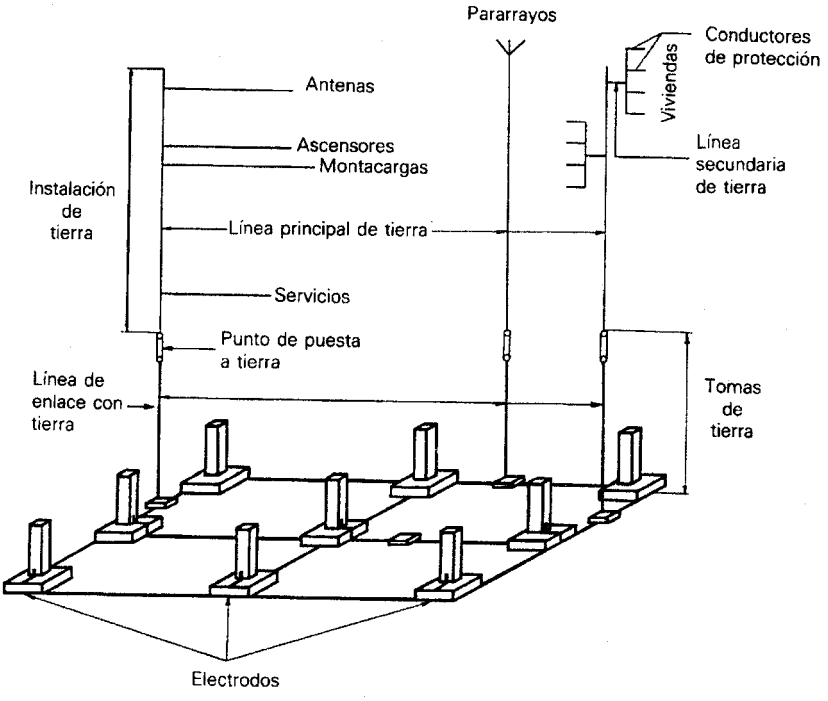


Figura 1. Representación esquemática de un circuito de puesta a tierra.

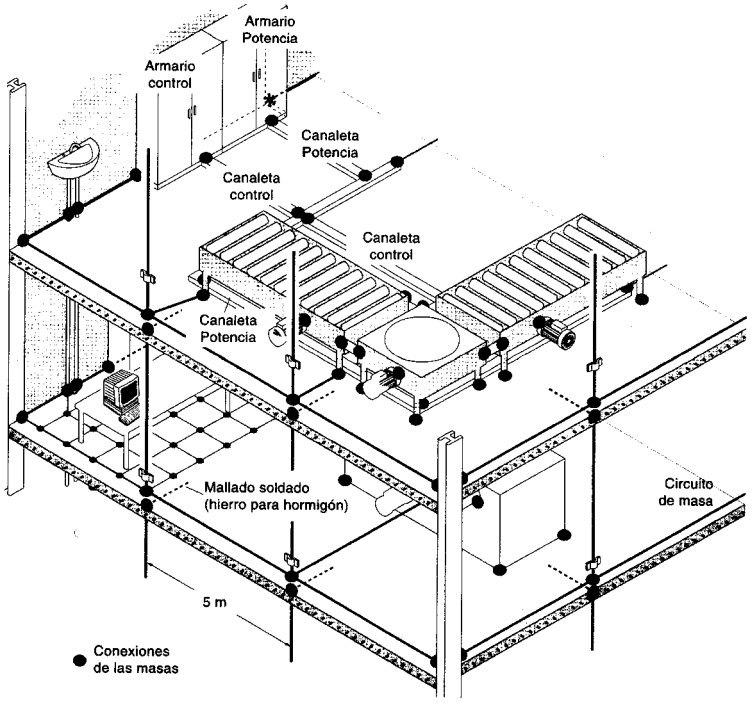


Figura 2. Elementos que se conectan a un circuito de puesta a tierra.

- **Tomas de tierra:**

Las tomas de tierra estarán constituidas por los elementos siguientes:

- Electrodo: Es una masa metálica, permanentemente en buen contacto con el terreno, para facilitar el paso a éste de las corrientes de defecto que puedan presentarte o la carga eléctrica que tenga o pueda tener.
- Línea de enlace con tierra: Está formada por los conductores que unen el electrodo o conjunto de electrodos con el punto de puesta a tierra.
- Punto de puesta a tierra: Es un punto situado fuera del suelo que sirve de unión entre la línea de enlace con tierra y la línea principal de tierra.

Las instalaciones que lo precisen, dispondrán de un número suficiente de puntos de puesta a tierra, convenientemente distribuidos, que estarán conectados al mismo electrodo o conjunto de electrodos. El punto de puesta a tierra estará constituido por un dispositivo de conexión (regleta, placa, borne, etc.) que permita la unión entre los conductores de las líneas de enlace y principal de tierra, de forma que pueda, mediante útiles apropiados, separarse éstas, con el fin de poder realizar la medida de la resistencia de tierra.

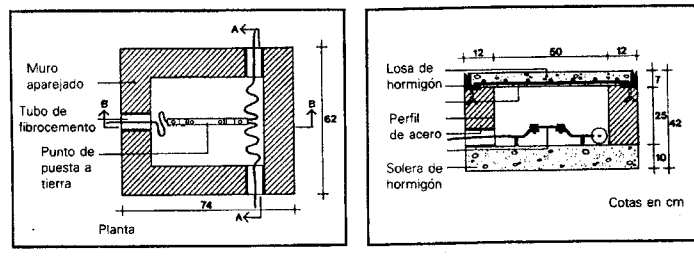


Figura 3. Punto de puesta a tierra. Arqueta de conexión.

- **Líneas principales de tierra:**

Las líneas principales de tierra estarán formadas por conductores que partirán del punto de puesta a tierra y a las cuales estarán conectadas las derivaciones necesarias para la puesta a tierra de las masas generalmente a través de los conductores de protección.

- **Derivaciones de las líneas principales de tierra:**

Las derivaciones de las líneas de tierra estarán constituidas por conductores que unirán la línea principal de tierra con los conductores do protección o directamente con las masas.

- **Conductores de protección:**

Los conductores de protección sirven para unir eléctricamente las masas de una instalación a ciertos elementos con el fin de asegurar la protección contra los contactos indirectos.

En el circuito de puesta a tierra, los conductores de protección unirán las masas a la línea principal de tierra.

En otros casos reciben igualmente el nombre de conductores de protección, aquellos conductores que unen las masas:

- al neutro de la red;
- a otras masas;
- a elementos metálicos distintos de las masas;
- a un relé de protección.

1.4.- Electrodos de tierra. Naturaleza, constitución, dimensiones y condiciones de instalación.

Los electrodos pueden ser artificiales o naturales. Se entiende por electrodos artificiales los establecidos con el exclusivo objeto de obtener la puesta a tierra, y por electrodos naturales las masas metálicas que puedan existir enterradas.

Para las puestas a tierra se emplearán principalmente electrodos artificiales. Los electrodos artificiales podrán estar constituidos por:

- Electrodos simples constituidos por barras, tubos, placas, cables, pletinas u otros perfiles.
- Anillos o mallas metálicas constituidas por elementos indicados anteriormente o por combinaciones de ellos.

Los electrodos serán de metales inalterables a la humedad y a la acción química del terreno, tales como el cobre, el hierro galvanizado, hierro sin galvanizar con protección catódica o fundición de hierro.

Constitución de electrodos artificiales:

- **Placas enterradas:**

Las placas de cobre tendrán un espesor mínimo de 2 mm y las de hierro galvanizado de 25 mm. Se colocarán en el terreno en posición vertical y en el caso en que seanecesaria la colocación de varias placas, se separaran unos 3 m unas de otras. La resistencia del electrodo de tierra (Rt) viene dada por la fórmula:

$$Rt = \frac{0.8\rho}{P} \qquad (1)$$

donde:

ρ: resistividad del terreno;
P: perímetro de la placa.

- **Picas verticales:**

Las picas verticales podrán estar constituidas por:

- Tubo de acero galvanizado de 25 mm de diámetro exterior como mínimo.
- Perfiles de acero dulce galvanizado de 60 mm de lado, como mínimo.
- Barras de cobre o de acero de 14 mm de diámetro como mínimo.

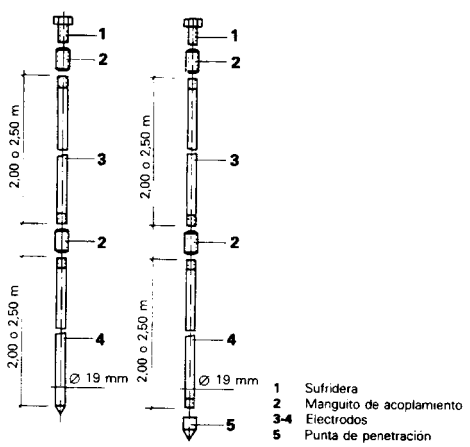


Figura 4. Elementos de una pica.

La resistencia del electrodo de tierra (Rt) viene dada por la fórmula:

$$Rt = \frac{\rho}{L} \qquad (2)$$

donde:

L: longitud de la pica.

- **Conductores enterrados:**

Estos conductores pueden ser:

- Conductores o cables de cobre desnudo de 35 mm² de sección como mínimo.
- Pletinas de cobre de, como mínimo, 35 mm² de sección y 2 mm de espesor.
- Pletinas de acero dulce galvanizado de, como mínimo, 100 mm² de sección y 3 mm de espesor.
- Cables de acero galvanizado de 95 mm² de sección, como mínimo.
- Alambres de acero de, como mínimo 20 mm² de sección, cubiertos con una capa de cobre de 6 mm² como mínimo.

La resistencia del electrodo de tierra (Rt) viene dada por la fórmula:

$$Rt = \frac{2\rho}{L} \qquad (3)$$

donde:

L: longitud del conductor.

Constitución de electrodos naturales:

- Una red extensa de conducciones metálicas enterradas, siempre que la continuidad en estas conducciones quede perfectamente asegurada y otra serie de condicionantes.
- La cubierta de plomo de los cables de una red eléctrica de baja tensión enterrada bajo ciertas condiciones.
- Los pilares metálicos de los edificios, si están interconectados.

1.5.- Resistencia de tierra.

La MIE BT 030 señala que el electrodo se dimensionará de forma que su resistencia de tierra, en cualquier circunstancia previsible, no sea superior al valor especificado para ella en cada caso. Este valor de resistencia de tierra será tal que cualquier masa no pueda dar lugar a tensiones de contacto superiores a:

- 24 V en locales o emplazamientos conductores.
- 50 V en los demás casos.

Los factores que influyen en el valor de la resistencia de tierra son, por un lado la resistividad del terreno y por otro la forma y dimensiones del electrodo.

1.6.- Resistividad del terreno (ρ).

La resistividad del terreno es un factor que depende fundamentalmente de la naturaleza del terreno (salinidad [figura 7], estratigrafía [figura 8], etc.), la temperatura [figura 6], la humedad [figura 9]. Equivale a la resistencia que presenta al paso de la corriente un cubo de 1 metro de arista (figura 5).

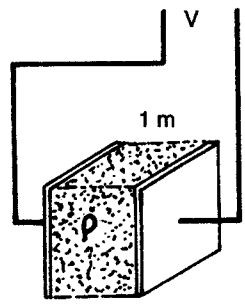


Figura 5. Resistencia de un cubo de 1 m de arista.

La MIE BT 039 en su tabla I nos presenta la resistividad del terreno ρ [Ω*m] para terrenos de diferentes naturalezas.

NATURALEZA DEL TERRENO	VALOR MEDIO DE LA RESISTIVIDAD ρ [Ω*m]
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terraplenes cultivables poco fértiles, terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables	3000
Agua de mar	1
Arena arcillosa, grava y arena gruesa húmeda	$5*0^2$
Areniscas, guijarros de río, piedra triturada	10^7
Arena fina y guijarros secos	10^3
Arcillas ferrosas	10
Arcillas secas	30
Barro arenoso	$1.5*10^2$
Carbón	10^5 a 10^6
Cuarzo	10^9
Exquisitos grafíticos	5
Grafitos	0.0001
Granitos antiguos	1.5 a $2*10^3$
Granitos compactos, gres	10^6 a 10^7
Grava y arena gruesa	10^2 a 10^3
Guijarros de río y cascajo de piedra triturada	$5*10^3$
Margas y humus secos	10^2
Margas, turbas y humus secos	10^2
Margas, arcillas y humus húmedos	10
Minerales conductores	0.01
Rocas compactas, cemento ordinario	10^6
Rocas madres, basaltos y granitos antiguos	10^4
Soluciones salinas	0.1
Suelos calcáreos y rocas aluvionarias	$4*10^2$
Terrenos rocosos y calizas	$3*10^3$
Tierra arenosa con humedad	$2*10^2$
Yeso seco	$2*10^3$

Tabla 1. Resistividad de diferentes terrenos.

Para terrenos secos, la resistividad aumenta en grandes proporciones, por lo que la puesta a tierra debe hacerse en lugares lo más húmedos posibles. También se tiene que para temperaturas inferiores o próximas a 0 ºC, la resistividad aumenta mucho, esto hace que a la hora de realizar una toma de tierra, se entierre el electrodo suficientemente.

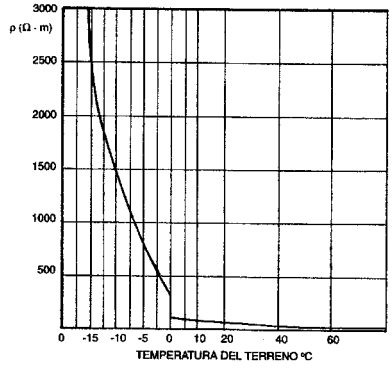


Figura 6. Resistividad del terreno en función de la temperatura.

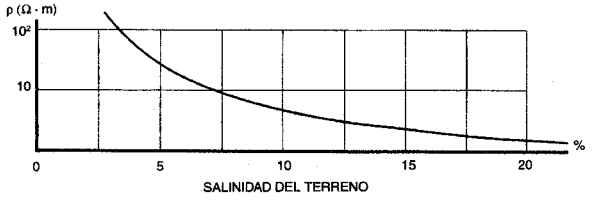


Figura 7. Resistividad del terreno en función de la salinidad.

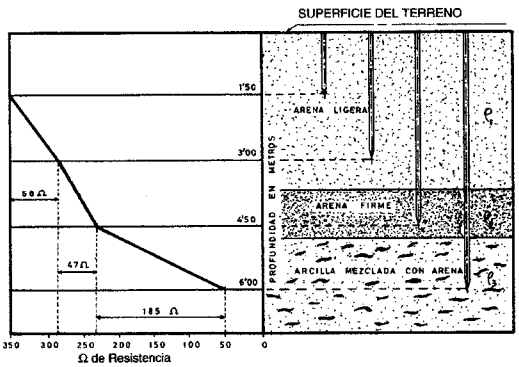


Figura 8. Resistividad del terreno en función de la estratigrafía.

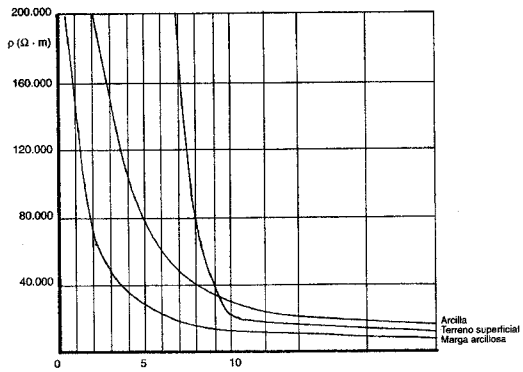


Figura 9. Resistividad del terreno en función de la humedad.

1.7.- Tipos de instalaciones de puesta a tierra.

En el sistema de puesta a tierra se pueden distinguir las tierras de protección y las tierras de servicio. Esta clasificación obedece a los distintos elementos que ha de conectarse a cada una de ellas de este modo:

- A las tierras de ***protección*** se conectarán las masas metálicas que normalmente no están sometidas a tensión, pero que puedan estarlo en caso de avería y además se conectan los limitadores de tensión.
- En la tierra de ***servicio*** se conectará el neutro del transformador de potencia, los circuitos de baja tensión de los transformadores de medida, los limitadores, descargadores para eliminación de sobretensiones o descargas atmosféricas y los elementos de derivación a tierra de los seccionadores de puesta a tierra.

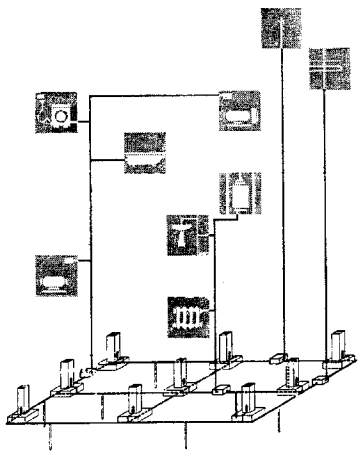


Figura 10. Elementos que se conectan a las tierras de protección.

1.8.- Separación de los sistemas de puesta a tierra.

1.8.1.- Tierras de protección y servicio en la alta tensión.

En la figura 11 se muestra en (a) una instalación con sistemas de puesta a tierra separados, mientras que en (b) están interconectados, constituyendo un sistema de tierras general.

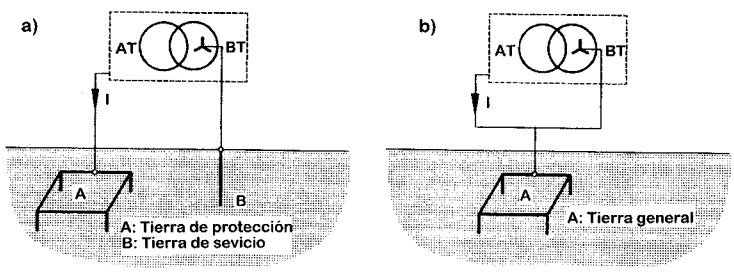


Figura 11. Sistema de tierras separadas o único.

La circulación de corriente por la red de puesta a tierra, como consecuencia de un defecto de aislamiento en la instalación, origina una elevación de potencial en ella que, para un valor determinado de la corriente de defecto, depende del valor de su resistencia de tierra. En esas condiciones, en caso de falta en el circuito de alta tensión, el electrodo de puesta a tierra adquirirá un potencial absoluto $Uo = R_t * Id$. Esta tensión puede alcanzar para intensidades de defecto de 300 A (valores frecuentes facilitados por compañías suminstradoras) y buena puesta a tierra ($Rt = 13\Omega$) valores de 4000 V. Si la tierra de servicio estuviera unida a la tierra de protección esta tensión se transferiría al neutro de transformador por lo cual habría que exigir niveles de aislamiento superiores a 4000 V para la instalación de baja tensión. Si los niveles deaislamiento son inferiores al valor anterior, es necesario la separación de los sistemas de puesta a tierra.

Para garantizar que el neutro de baja tensión no alcance tensiones elevadas que puedan afectar a las instalaciones de los usuarios, con el consiguiente peligro para personas y material, es necesario conectarlo a una tierra particular, que guarde una separación conveniente con respecto a la tierra general (figura 12). La máxima diferencia de potencial que puede aparecer entre el neutro de baja tensión y una tierra lejana, no afectada, debe situarse por debajo de los 1000 V. Este valor nos permite estar de acuerdo con lo indicado en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión en su Instrucción MIE BT 017, que fija, como tensión de ensayo para las instalaciones interiores, 2U+1000 (V), durante 1 minuto (siendo U la tensión máxima de servicio), con un mínimo de 1500 V. Se recoge esta cifra también en la MIE BT 031 como tensión de ensayo, a mantener durante 1 minuto, en los receptores.

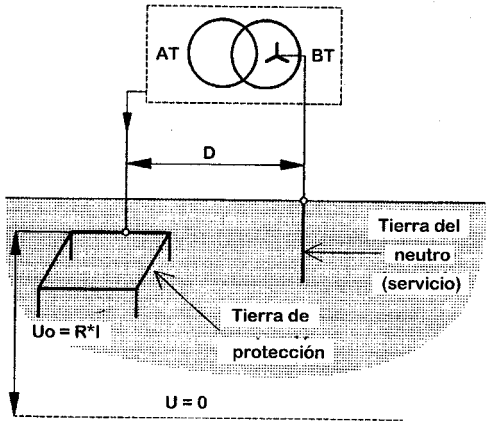


Figura 12. Separación entre electrodos de tierra.

Para que la tensión inducida sobre el electrodo de puesta a tierra del neutro (figura 12) no supere el mencionado valor al producirse un defecto a tierra, deberá situarse el electrodo de este último a una distancia D las tierras de protección.

1.8.2.- Tierras de protección en la baja tensión.

Si el centro de transformación está situado junto a un edificio destinado a otros usos (sala de control), además de existir una separación entre la tierra de protección y servicio en la alta tensión, debe de existir una separación entre la toma de tierra de las masas de la instalación de utilización en baja tensión y la de las masas del centro de transformación. Ello viene indicado en la Instrucción MIE BT 039, del REBT.

2.- NECESIDAD DE UNA BUENA TOMA DE TIERRA.

La instalación de una mala tierra es más peligrosa que el no establecer esta comunicación, por cuanto el hilo de conexión a tierra constituye un nuevo elemento peligroso si la parte de la instalación unido a él se pone en contacto más o menos rígido con un conductor cuya

diferencia de potencial con relación a tierra sea elevada. Si la resistencia de un electrodo de tierra es muy pequeña, por ejemplo, inferior a 1 Ω, un conductor puesto en contacto con dicho electrodo puede considerarse prácticamente al mismo potencial que el de tierra (para corrientes de defecto típicas) y, una persona, aunque pise directamente sobre el suelo, sufre una descarga despreciable al ponerse también en contacto con el conductor. Sin embargo, si la resistencia es elevada, el potencial de dicho conductor puede ser muy diferente al de la tierra, porque si existe una corriente a través de él y de la toma, su diferencia de potencial respecto de aquélla es igual al producto de la intensidad de dicha corriente multiplicada por la mencionada resistencia, y una persona en las referidas condiciones, corre un grave riesgo.

Para reducir dicha resistencia, se emplean los electrodos de tierra, formados por planchas metálicas, preferentemente de cobre (aunque a veces se usan también de hierro galvanizado) enterrados a la profundidad suficiente para asegurar una humedad permanente del terreno. No obstante, el terreno no siempre es adecuado a este fin y,para obtener un mejor contacto, se rodea el electrodo de tierra de una capa de carbón de encina o de cock y de otra de tierra vegetal y verter en el terreno, de tiempo en tiempo, agua ligeramente salada.

3.- POTENCIALES CREADOS SOBRE EL TERRENO POR EL PASO DE UNA INTENSIDAD DE DEFECTO.

La resistencia de una conexión a tierra (Rt) se descompone en (figura 13):

- La resistencia de los electrodos metálicos (Rm), la cual de ordinario es tan pequeña, que puede despreciarse.
- La resistencia de tránsito (Rtr) entre los electrodos y la tierra húmeda.
- La resistencia de la propia tierra (Re).

Esta última constituye un conductor electrolítico, de manera que las mediciones sólo pueden realizarse con corriente alterna con el objeto de evitar el error debido a la polarización.

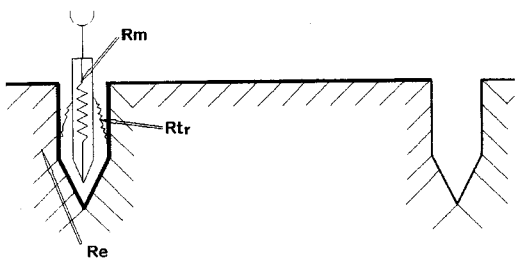


Figura 13. Componentes de resistencia en una conexión a tierra.

3.1.- Distribución de corrientes.

Si colocamos dos electrodos de tierra (figura 14) distantes entre sí una decena de metros, la resistencia entre los puntos "A" y "B" reside, principalmente en los contactos de "p" y "p' " con tierra, y en la parte del terreno próxima a estos contactos. La resistencia de la mayor parte del trayecto comprendidos entre ambas placas es muy pequeña porque la sección atravesada por una corriente "I" que pasa de la una a la otra aumenta considerablemente al separarse de dichos contactos.

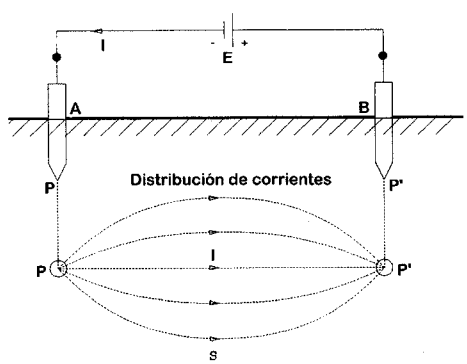


Figura 14. Distribución de corrientes entre dos electrodos.

El paso de una posible corriente de defecto a tierra, en el caso teórico de una pica enterrada en el terreno, se efectuará a través de las resistencias de contacto, que podemos suponer constituidas por múltiples resistencias serie formadas, cada una de ella, por los diferentes volúmenes que constituyen el volumen envolvente de la pica. A partir de una cierta distancia, el número de resistencias elementales que podemos considerar se constituyen en paralelo (figura 15), aumentando, por el consiguiente aumento de la sección envolvente de la pica, tendiendo a infinito, constituyendo una resistencia despreciable de valor casi nulo y prácticamente despreciable. La envolvente de lospuntos a partir de los cuales podemos considerar que el valor de la resistencia no aumenta, constituye el límite de la zona de influencia de la pica. Se forma, alrededor de cada pica de toma de tierra y a partir del límite mencionado una zona de influencia, generalmente de constitución geométrica irregular (figura 16) dependiente de las características del terreno.

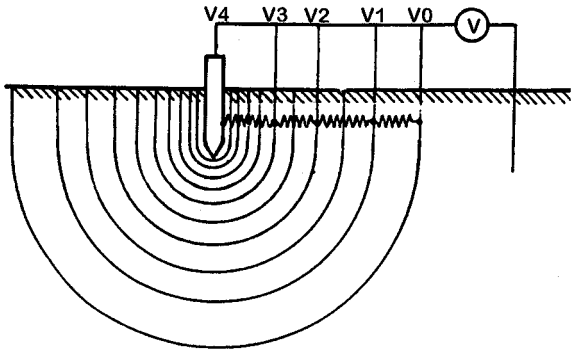


Figura 15. Distribución de potenciales para una corriente de fuga en una pica.

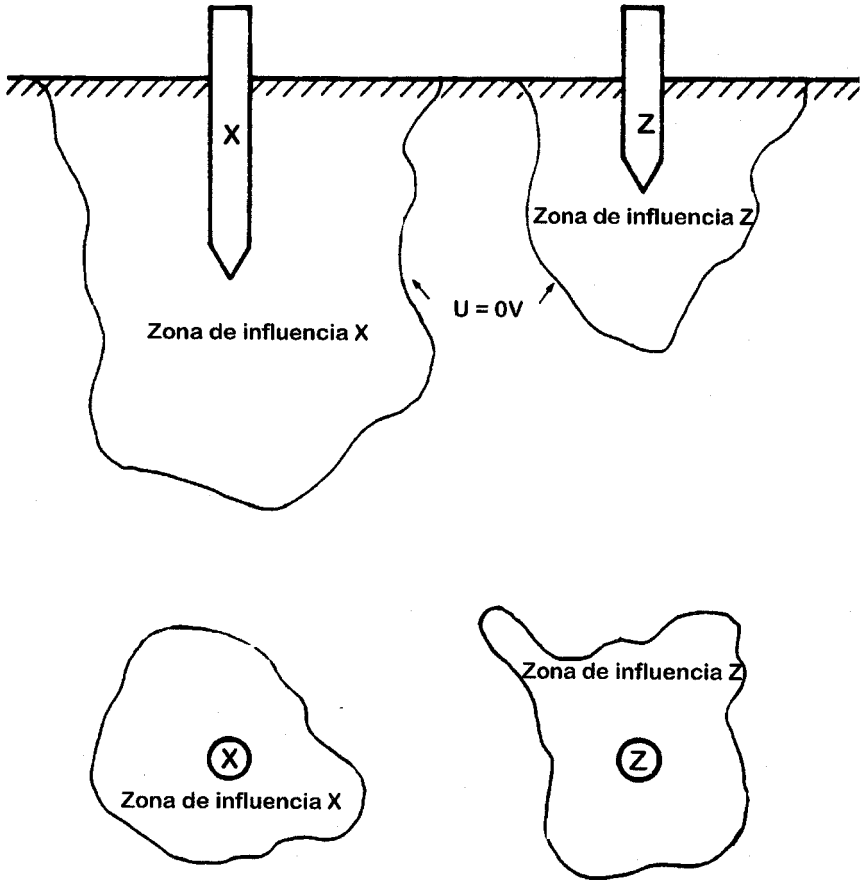


Figura 16. Zona de influencia de los electrodos de tierra.

3.2.- Distribución potencial.

Supongamos (figura 17) que entre los electrodos Ra y Rb circula una corriente alterna "I" a través de tierra, y que se mide con un voltímetro de resistencia óhmica elevada las tensiones Va y Vb entre los electrodos y la tierra auxiliar "A". Se obtiene así la curva de distribución de tensiones que se reproduce en la parte baja de la figura 17. Como se puede apreciar, en las proximidades de los electrodos se observa una rápida variación de la tensión, mientras en la región comprendida entre los codos C y D, la tensión permanece aproximadamente constante.

La forma de la curva que refleja los potenciales adquiridos por los distintos puntos de la superficie del terreno depende, aparte de la profundidad de enterramiento del electrodo, de los siguientes factores:

- Características del electrodo.
- Resistividad del terreno.
- Valor de la intensidad de defecto.

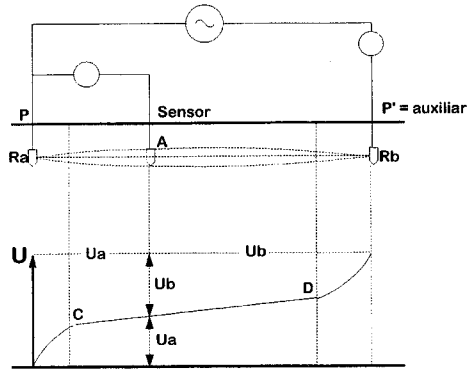


Figura 17. Distribución de tensiones entre dos electrodos.

Sin embargo, para puntos alejados del sistema de tierras, las curvas tienden a unificarse para todos los tipos de electrodos. Por eso, a partir de una determinada distancia, puede considerarse que los potenciales adquiridos por los puntos del terreno dependen solamente de los valores de la intensidad de defecto y de la resistividad.

3.3.- Tensión de contacto y tensión de paso.

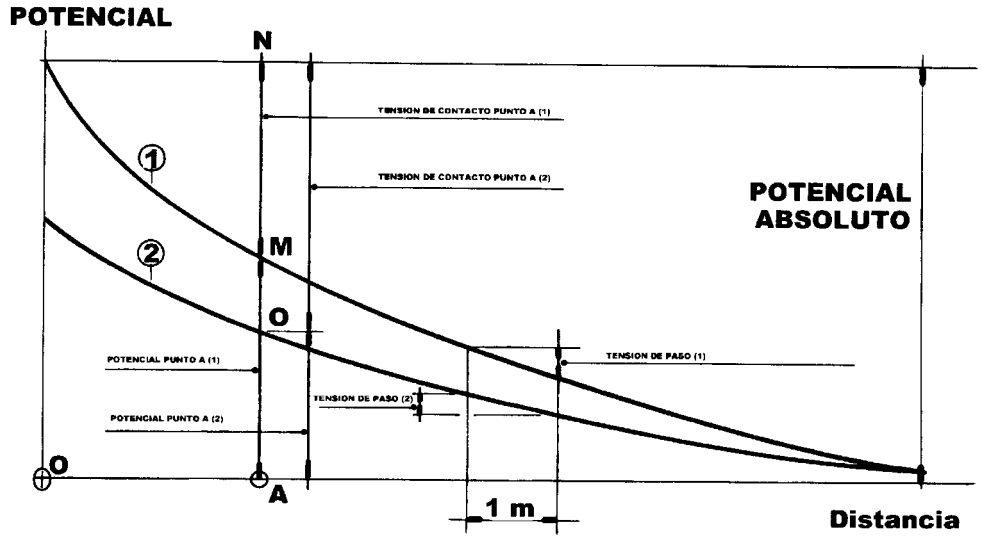
Si una persona situada en un punto del terreno que se encuentra a una distancia A de un electrodo, toca con la mano una masa conectada a dicho electrodo en el momento de circular una intensidad de defecto, dicha mano estará sometida a un potencial que será el potencial absoluto del electrodo, mientras que sus pies estarán sometidos al potencial creado en el punto A por el paso de la intensidad de defecto. Es decir, que dicha persona puenteará entre su mano y sus pies una parte del potencial absoluto del electrodo. Esta diferencia de potenciales a que queda sometida la persona que establece el contacto, es lo que se denomina ***tensión de contacto*** y viene representada en la figura 18 por el segmento MN para el caso del electrodo con la cabeza enterrada a ras del suelo, y por el NO para el caso en que la cabeza de la pica esté enterrada a una profundidad h.

Hemos de indicar que se ha supuesto el mismo potencial absoluto para ambos casos por razones de simplificación, aún cuando teóricamente las diferencias en la disposición den lugar a resistencias de electrodos e intensidades de defecto algo diferentes.

MIE RAT 13 establece como distancia máxima para poder efectuar el contacto con una masa puesta a tierra, la de un metro.

Si una persona pisa al andar puntos del terreno que, como consecuencia del paso de una intensidad de defecto, se encuentran a distinto potencial, quedará sometido entre sus dos pies a una diferencia de potenciales que, para puntos situados a un metro de distancia entre

sí, constituyen la denominada ***tensión de paso***, cuya representación puede verse en la figura 18.



① Pica con cabeza enterrada a ras de suelo
② Pica con cabeza enterrada a una profundidad h

Figura 18. Tensión de paso y tensión de contacto.

Observando la figura 18, es fácil ver que al aumentar la profundidad de enterramiento de la cabeza del electrodo, aumentan los valores de las tensiones de contacto, y disminuyen los de las tensiones de paso. En la práctica son normalmente estos valores los que nos hacen adoptar una determinada profundidad mínima de las cabezas de los electrodos.

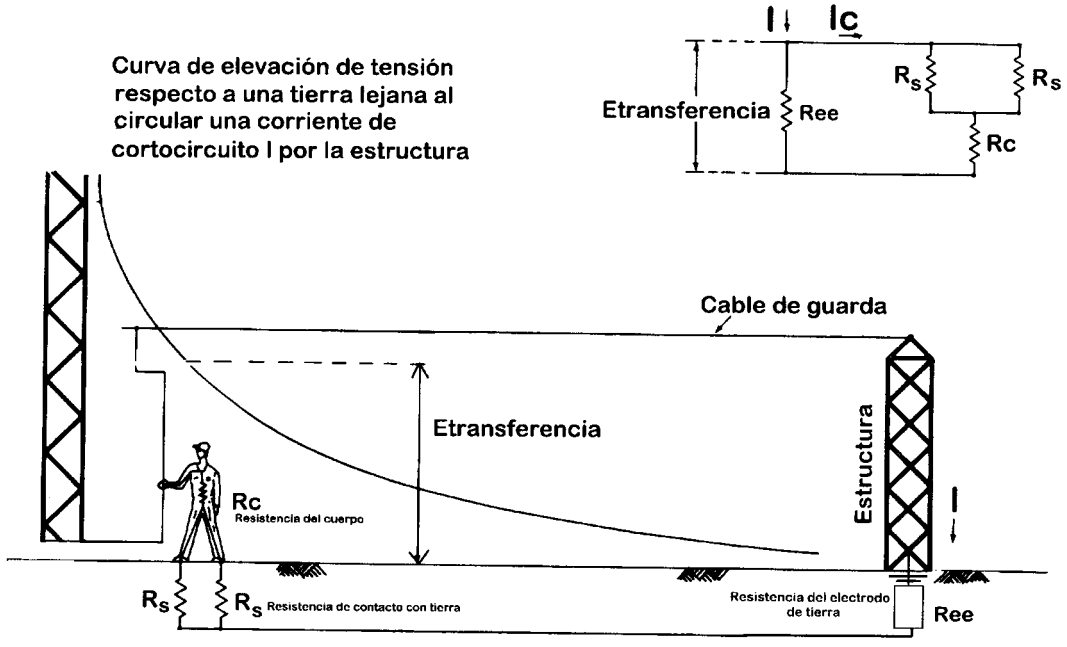


Figura 19. Tensión transferida.

3.4.- Tensión de contacto y de paso aplicada. Valores máximos reglamentarios.

Cuando una persona establece un contacto, en el momento de circular una intensidad de defecto, hemos visto que queda sometida entre su mano y sus pies a la diferencia de potenciales que se denomina tensión de contacto. La intensidad que se deriva a través del individuo en las condiciones consideradas, dependerá del valor de la tensión de contacto, y de la resistencia ofrecida al paso de la corriente, que a su vez será función:

- De la resistencia del cuerpo humano, que el Reglamento fija en 1.000 Ω.
- De la resistencia que se presenta en la pisada de los pies sobre el terreno, que el Reglamento establece para cada pie en $3\rho_s$, siendo ρ_s la resistividad superficial del terreno. La resistencia así definida está basada en asimilar cada pie a un electrodo en forma de placa de 200 centímetro cuadrados de superficie, ejerciendo sobre el suelo una fuerza mínima de 250 N.

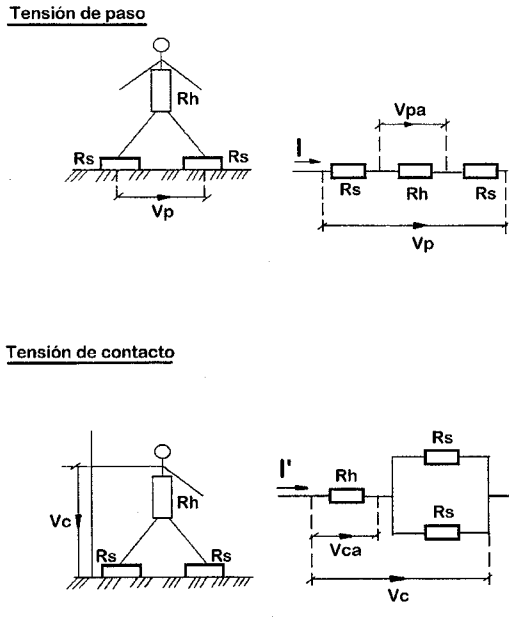


Figura 20. Esquema y circuito eléctrico equivalente de una persona en el cálculo de las tensiones de paso y contacto aplicadas.

La intensidad que se deriva a través de la persona produce una caída de tensión total igual a la tensión de contacto, y se divide en dos partes:

- Tensión que aparece entre la mano y la planta de los pies del individuo.
- Caída de tensión producida como consecuencia de la resistencia de la pisada al paso de la corriente.

La tensión a que nos hemos referido en primer lugar es denominada por el Reglamento tensión de contacto aplicada, estableciendose para valores máximos de la misma los deducidos de la ecuación:

$$Vca = \frac{K}{t^n} \qquad (4)$$

siendo:

K = 72 y n = 1 para tiempos inferiores a 0,9 s.

K = 78,5 y n = 0,18 para tiempos comprendidos entre 0,9 y 3 s.

t: es el tiempo de duración de la falta expresado en segundos, siendo su valor fijado por las Empresas suministradoras en función de las características y regulación de los relés de protección contra defectos a tierra en las salidas de las líneas de la Subestación. En el caso particular de la Compañía Sevillana de Electricidad S.A. el tiempo t de desconexión está fijado en 1 s.

A partir del esquema de la figura 20, la relación entre tensión de contacto (Vc) y tensión de contacto aplicada (Vca) viene dada por:

$$Vc = Vca\left[1+\frac{1.5\rho_s}{1000}\right] \qquad (5)$$

luego el cumplimiento de las condiciones reglamentarias queda condicionado a que:

$$Vc \leq \frac{K}{t^n}\left[1+\frac{1.5\rho_s}{1000}\right] \qquad (6)$$

Para el caso de las tensiones de paso, procederemos de la misma forma. No obstante, hemos de considerar las resistencias de las pisadas aplicadas en serie y no en paralelo, figura 20, de donde se deduce que la relación entre la tensión de paso (Vp) y la tensión de paso aplicada (Vpa) viene dada por:

$$Vp = Vpa\left[1+\frac{6\rho_s}{1000}\right] \qquad (7)$$

cuyo valor máximo queda fijado por el Reglamento por la ecuación:

$$Vp \leq \frac{10K}{t^n}\left[1+\frac{6\rho_s}{1000}\right] \qquad (8)$$

4.- PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA INSTALACIÓN DE TIERRA EN UN C.T. DE TERCERA CATEGORÍA.

Las prescripciones generales que deben cumplir los electrodos de puesta a tierra, para garantizar la seguridad de las personas e instalaciones, se resumen, en:

- Limitación de la resistencia de puesta a tierra (Rt) de protección: El valor máximo de Rt debe permitir que la intensidad de defecto (Id) supere el valor mínimo deactuación de las protecciones y que la sobretensión que aparece, en caso de anomalía, (Vd= Rt*Id) no sea perjudicial para la instalación de baja tensión del centro de transformación.
- Definición de una configuración geométrica del electrodo de puesta a tierra. Su diseño será tal, que los gradientes de tensión que aparecen en el terreno en caso de defecto, no sean superiores a las tensiones que pueda soportar una persona cuando acceda simultáneamente, a puntos separados afectados por la anomalía.

Para cumplir con las condiciones de seguridad requeridas, se seguirá el procedimiento de cálculo indicado en el apartado 2.1 de la MIE RAT. 13:

1) Investigación de las características del terreno.
2) Determinación de las corrientes máximas de puesta a tierra y del tiempo máximo de eliminación del defecto.
3) Diseño preliminar de la instalación de tierra.
4) Cálculo de la resistencia del sistema de puesta a tierra.

5) Cálculo de las tensiones de paso en el exterior de la instalación.
6) Cálculo de las tensiones de paso y contacto en el interior de la instalación.
7) Comprobación que las tensiones de paso y contacto calculadas en 5) y 6) sean inferiores a los valores máximos admisibles.
8) Investigación de las tensiones transferibles al exterior. Separación entre los electrodos de tierra de protección (masas) y de servicio (neutro B.T.).
9) Corrección y ajuste del diseño inicial.

- **1) Investigación de las características del terreno:**

Para instalaciones de tercera categoría y de intensidad de cortocircuito a tierra inferior o igual a 16 kA, el apartado 4.1 de la MIE RAT 13 admite la posibilidad de estimar la resistividad del terreno o de medirla. No obstante se recomienda efectuar la medición.

- **2) Determinación de las corrientes máximas de puesta a tierra y del tiempo de eliminación del defecto:**

  - ***Corrientes máximas de puesta a tierra*:**

En instalaciones eléctricas de alta tensión de tercera categoría, los parámetros de la red que definen la corriente de puesta a tierra, como son la resistencia y reactancia de las líneas, son muy variables.

El aspecto más importante que debe tenerse presente en el cálculo de la corriente máxima de puesta a tierra es el tratamiento del neutro de la red. Normalmente, en las redes de alta tensión de tercera categoría, las variantes son las siguientes:

- Neutro aislado.
- Neutro unido a tierra.
  - Directamente.
  - Mediante impedancia.

El neutro unido directamente a tierra es una variante de la conexión mediante impedancia, dado que la conexión a tierra siempre presenta una resistencia de cierto valor, por reducido que éste sea.

- ***Neutro aislado:***

Excepto en aquellos casos en los que el proyectista justifique otros valores, para el cálculo de la corriente máxima a tierra en una red con neutro aislado, se aplicará la siguiente expresión:

$$Id = \frac{\sqrt{3}U[wCaLa + wCcLc]}{\sqrt{1+(wCaLa + wCcLc)^2(3Rt)^2}} \qquad (9)$$

siendo:

Id: Intensidad máxima de defecto a tierra en el centro considerado.
U: Tensión compuesta de servicio de la red.
Ca: Capacidad homopolar de la línea aérea.

La: Longitud total de las líneas aéreas de alta tensión subsidiarias de la misma transformación AT/AT.
Cc: Capacidad homopolar de los cables subterráneos.
Lc: Longitud total de los cables subterráneos de alta tensión subsidiarios de la misma transformación AT/AT.
Rt: Resistencia de la puesta a tierra de protección del centro.
w: Pulsación de la corriente.

- ***Neutro a tierra:***

Para el cálculo debe aplicarse, salvo justificación, la siguiente expresión:

$$Id = \frac{U}{\sqrt{3}\sqrt{(Rn + Rt)^2 + Xn^2}} \qquad (10)$$

siendo:

Id: Intensidad máxima de defecto a tierra, en el centro considerado.
U: Tensión compuesta de servicio de la red.
Rn: Resistencia de la puesta a tierra del neutro de la red.
Rt: Resistencia de la puesta a tierra de protección del centro.
Xn: Reactancia de la puesta a tierra del neutro de la red.
Los valores de Rn y Xn son característicos de cada red.

- ***Tiempos máximos de eliminación del defecto:***

Cuando se produce un defecto a tierra, éste se elimina mediante la apertura de un elemento de corte que actúa por la orden que le transmite un dispositivo que controla la intensidad de defecto.

- **3) Diseño preliminar de la instalación de tierra:**

El diseño preliminar de la instalación de puesta a tierra se realizará basándose en alguna de las configuraciones tipo del método de UNESA, por ejemplo, que esté de acuerdo con la forma y dimensiones del centro de transformación. Sobre esta configuración base pueden tantearse diversas variantes, según el número de picas que se considere, su longitud y la profundidad de enterramiento. Para cada variante, deberá calcularse la resistencia de puesta a tierra y las correspondientes tensiones de paso y contacto.

- **4,5,6) Cálculo de la resistencia de puesta a tierra y de las tensiones de paso y contacto:**

La resistencia de puesta a tierra es la que existe entre el electrodo y un punto lejano del terreno a potencial cero. Para determinar esta resistencia será preciso conocer la diferencia de potencial entre estos dos puntos (tensión de defecto) y al dividir esta tensión por la intensidad que disipa el electrodo, se obtendrá el correspondiente valor de la resistencia. Para determinar las tensiones de paso y contacto, según las definiciones del MIE RAT, es preciso conocer la distribución de potenciales sobre el terreno en las proximidades del electrodo. Así pues, para determinar la resistencia de puesta a tierra y las tensiones de paso y contacto, debe analizarse la distribución de potenciales que provoca la disipación de corriente a través del electrodo en estudio.

Cuadrado de 3.0 m * 3.0 m

Sección conductor = 50 mm^2
Diámetro picas = 14 mm
Lp =longitud de pica en m

Profundidad = 0.5 m

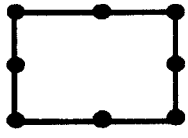
CONFIGURACION	L_p (m)	RESISTENCIA K_r	TENSION DE PASO K_p	TENSION DE CONTACTO EXT $K_c = K_{p(acc)}$	CODIGO DE LA CONFIGURACION
Sin picas	-	0.155	0.0332	0.0996	30-30/5/00
4 picas 	2	0.110	0.0258	0.0563	30-30/5/42
	4	0.086	0.0193	0.0386	30-30/5/44
	6	0.071	0.0154	0.0290	30-30/5/46
	8	0.061	0.0127	0.0231	30-30/5/48
8 picas 	2	0.095	0.0222	0.0440	30-30/5/82
	4	0.072	0.0155	0.0271	30-30/5/84
	6	0.058	0.0118	0.0191	30-30/5/86
	8	0.050	0.0095	0.0146	30-30/5/88

Tabla2. Parámetros característicos de electrodos de puesta a tierra en el método UNESA.

Para determinar la distribución de potenciales se puede usar el método Howe por ejemplo. Este método requiere el empleo de programas de ordenador para electrodos de tierra que no sean muy sencillos. Para facilitar la presentación de resultados el método de UNESA han confeccionado una serie de tablas (tabla 2) en las que, para diferentes geometrías de electrodos se especifican los siguientes parámetros, expresados en los valores "unitarios" indicados:

- Resistencia de puesta a tierra: Kr [Ω/Ω*m]
- Tensión de paso máxima: Kp [V/(Ω*m*A)]
- Tensión de contacto exterior máxima: Kc [V/(Ω*m*A)]

Multiplicando Kr por ρ (resistividad del terreno) se obtiene la resistencia de puesta a tierra.

Multiplicando Kp y Kc por ρ y por Id se obtienen, respectivamente, la tensión de paso máxima y de la tensión de contacto exterior máxima, para cada configuración tipo de electrodo.

$$Rt = Kr * \rho$$
$$V'_P = Kp * \rho * Id \qquad (11)$$
$$V'_C = Kc * \rho * Id$$

- **7) Comprobación que las tenciones de paso y contacto calculadas sean inferiores a los valores máximos admisibles:**

Seguridad de las personas
Tensión máxima calculada < Tensión máxima admisible en la instalación de paso en el exterior < de paso (Vp) de paso en el interior < de paso (Vp) de contacto en el interior < de contacto (Vc) Si no se cumple alguna de estas condiciones, el proyectista deberá justificar las medidas adicionales de seguridad adoptadas para no superar las tensiones admisibles.
Protección del material
Nivel de aislamiento del equipo de B.T. del C.T. a frecuencia industrial >Tensión de defecto $V_{BT} > Rt^* Id$ Se deberá definir el valor de V_{BT}, y si no se cumple la relación, deberá utilizarse un transformador de separación de circuitos.
Limitación de la corriente de defecto
Intensidad de defecto > Intensidad de arranque de las protecciones

Tabla 3. Comprobación del electrodo de tierra adoptado.

7a Medidas adicionales de seguridad para las tensiones de contacto:

Entre las medidas aceptadas, independientemente de otras que el proyectista justifique, se podrá:

- Disponer suelos o pavimentos que aíslen suficientemente de tierra las zonas peligrosas.
- Establecer conexiones equipotenciales entre la zona de acceso para el personal de servicio y todos los elementos conductores accesibles desde la misma.

- **8) Investigación de las tensiones transferidas al exterior:**

Una vez diseñado el electrodo deberá verificare que no puedan transmitirse tensiones al exterior. En concreto, deberá estudiarse la posible transferencia a través de la puesta a tierra del neutro y determinará las características eléctricas de este último.

8a Separación de los sistemas de puesta a tierra de protección (masas) y de servicio (neutro):

Para garantizar que el sistema de puesta a tierra de servicio no alcance tensiones elevadas que puedan afectar a las instalaciones de los usuarios, en el momento en que

se esté disipando un defecto por el sistema de tierra de protección, debe establecerse una separación entre los electrodos más próximos de ambos sistemas, la cual, será función de la resistividad del terreno y de la intensidad de defecto.

La máxima diferencia de potencial que puede aparecer entre el neutro de B.T. y una tierra lejana no afectada, no debe ser superior a 1000 V.

- **9) Corrección y ajuste del diseño inicial:**

En el caso que el diseño inicial incumpla alguno de los condicionantes anteriormente indicados, deberá escogerse otra variante de electrodo tipo y repetir el proceso. Aumentando la longitud total de electrodo horizontal, el número de picas o su longitud, disminuirá la Rt, y en consecuencia los valores de V'p y V'c. También pueden aplicarse otras medidas, tales como disponer pavimentos suficientemente aislantes o establecer conexiones equipotenciales.

TEMA 17. CUADROS ELÉCTRICOS EN UNA INSTALACIÓN DE B.T.

1.- INTRODUCCIÓN.

La complejidad de las líneas eléctricas encargadas de llevar la energía a todos los receptores de una instalación, con diversidad total de emplazamientos, potencias, misiones, grados de protección, de señalización, control etc., hace que existan una serie de puntos de bifurcación de líneas de donde parten otras, para cumplir cada una de ellas una misión concreta; pues bien, la simple lógica del sistema, implica la necesidad de que en esos puntos de bifurcación, se instalen todos los elementos necesarios para el correcto servicio de esas líneas, aparatos de maniobra, control, protección, etc. que de por sí, constituyen los cuadros.

Es difícil hacer una clasificación racional de los cuadros eléctricos, ya que ésta puede ser por su importancia dentro de la instalación (cuadros generales, cuadros secundarios, etc.), o bien suele ser por la misión que cumplen (cuadros de maniobra, de control, cuadros de distribución, de mando, etc., o también por su emplazamiento (cuadros de distribución de viviendas, cuadros provisionales de obra, cuadros de alumbrado, etc) incluso, a veces, también los cuadros se clasifican por las características constructivas (cuadros de chapa de acero, cuadros de doble aislamiento, cuadros antideflagrantes, abiertos, cerrados, modulares, etc.).

De todas estas clasificaciones, al margen de las características intrínsecas de los cuadros, la más racional desde un punto de vista eléctrico es la de su misión y así los vamos a clasificar para su estudio: cuadros de control de funcionamiento, cuadros de protección de líneas, cuadros de maniobra de circuitos, etc.).

2.- ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN LOS CUADROS.

Los elementos eléctricos fundamentales que constituyen los cuadros los podemos agrupar en los siguientes conjuntos:

- Aparatos de mando y maniobra (fundamentalmente interruptores automáticos y contactores).
- Aparatos de medida (amperímetros, voltímetros, watímetros, frecuencímetros, fasímetros, contadores, ohmímetros, polímetros, etc.).
- Aparatos de protección y control.
- Aparatos de señalización.
- Aparatos de conexión.

Es evidente, que según la misión de cada cuadro así será el equipamiento necesario para su instalación y no siempre llevará todos los elementos mencionados anteriormente, sin embargo, podemos decir que hay unos principios generales de diseño que son válidos para todos los tipos y para su realización se precisa el conocimiento previo de los siguientes datos:

- Tensión de servicio del cuadro.
- Potencia prevista de los circuitos a que dé servicio.
- Sección, clase y número de los conductores de entrada y salida de cuadro.

- Tipo de protección existente delante de la entrada.
- Corriente presunta de cortocircuito.
- Condiciones ambientales de su emplazamiento.
- Dimensiones admisibles de su emplazamiento.
- Posibilidad de ampliación.

3.- SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN PARA GRANDES EDIFICACIONES.

La alimentación de energía a los consumidores se puede hacer fundamentalmente como:

- **"Distribuciones por puntos"** (figura 1) existen cuadros eléctricos y distribuciones desde los que, partiendo de un distribuidor "puntual", se alimenta de energía eléctrica a los consumidores alejados a través de cables y líneas radiales. Los aparatos de maniobra, protección y medida necesarios se agrupan de forma centralizada en el cuadro eléctrico o en la distribución.

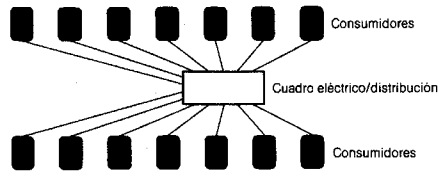


Figura 1. Distribución por puntos.

- **"Distribuciones lineales"** (figura 2) se lleva la energía eléctrica a través de largas barras colectoras blindadas, de hasta 400 A aproximadamente, hasta la proximidad inmediata de los consumidores. Los consumidores están conectados a las barras colectoras a través de cajas de salida con fusibles y tramos cortos de líneas o cables. Las distribuciones lineales (distribuciones de barras con salidas de tamaño y situación variables) abastecen puestos de trabajo, máquinas etc., en centros fabriles y laboratorios de gran extensión. Las salidas pueden disponerse prácticamente en cualquier lugar de la traza de las barras colectoras, por lo que las distribuciones lineales son especialmente apropiadas para consumidores que se cambian frecuentemente de lugar. Además, se emplean en edificios de gran altura en forma de líneas ascendentes, alimentándose así las distribuciones de las distintas plantas.

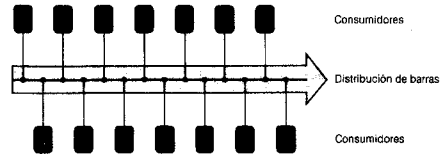


Figura 2. Distribución líneal.

3.1.- Alimentación vertical.

Los grandes edificios modernos, además de una gran potencia de iluminación, requieren una alimentación de energía eléctrica para un numeroso grupo de instalaciones, como por ejemplo, climatización integral, elevación de la presión del agua, ascensores, etc..

En el caso de grandes edificios altos es frecuente que en las plantas superiores existan aparatos de elevado consumo de energía, por ejemplo, máquinas motrices o equipos convertidores para ascensores, partes del equipo de climatización y cocinas eléctricas. Como lo que se pretende es disponer de la alta tensión lo más cerca posible de los puntos de mayor carga en estos casos suelen emplazarse también transformadores en el ático e incluso, en caso necesario, adicionalmente en una planta a una altura intermedia. Tales soluciones pueden permitirse empleando transformadores secos, cuyo aislamiento está considerado como no inflamable, y aparatos de maniobra sin aceite o con escaso contenido en aceite (figura 3).

El tipo de sistema depende de las dimensiones del edificio, de la longitud de las líneas de alimentación y de la carga. Se distinguen dos tipos: alimentación vertical (líneas ascendentes) y alimentación horizontal (alimentación dentro de cada planta).

La disposición de las líneas de alimentación principal se determina en función del tamaño y de la forma del edificio, así como de su distribución. En edificios de planta alargada pueden disponerse varias líneas principales a determinadas distancias, que dividen el edificio en distintas secciones de alimentación (figura 4).

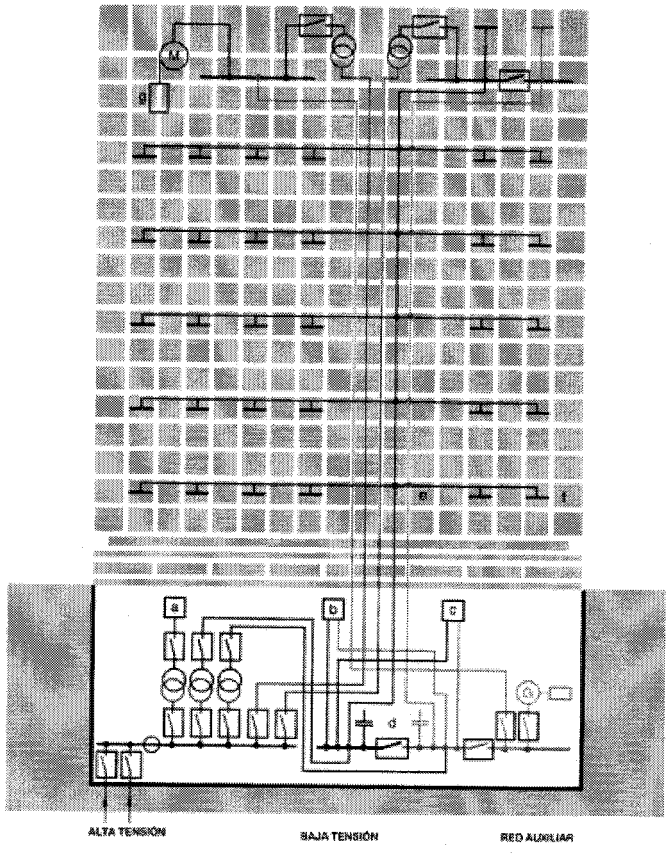


Figura 3. Esquema de alimentación eléctrica a un edificio de gran altura.

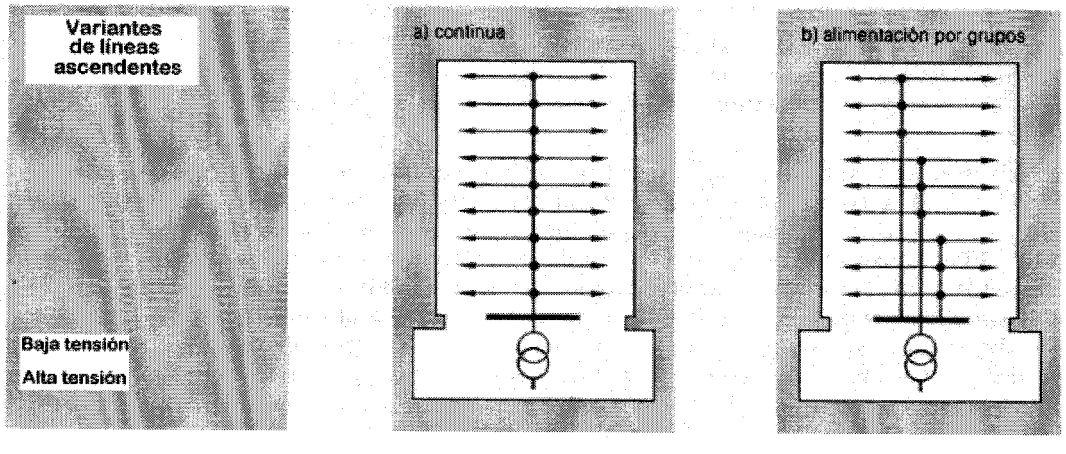


Figura 4. Alimentación vertical.

	a) CONTINUA	b) ALIMENTACIÓN POR GRUPOS
Aplicación:	En caso de que no se exija gran seguridad en la alimentación.	Cuando con líneas de subida según variante "a", se requieran grandes secciones.
Ventajas:	Las diferentes cargas en las distintas plantas se compensan. Exigen pequeños cuadros eléctricos de baja tensión. Constitución sencilla.	Montaje más sencillo que en "a", por ser la sección de los conductores más pequeña. En caso de avería en una línea ascendente, quedarían afectadas solamente las plantas de uno de los grupos de alimentación.
Inconvenientes:	La más baja seguridad de alimentación de todas las variantes representadas, "a" hasta "e", pues en caso de avería quedan afectadas todas las plantas. Conductores de secciones grandes, lo que hace más costoso el montaje.	Las diferentes cargas en cada planta se compensan solamente dentro de cada grupo. Exige mayores cuadros eléctricos de baja tensión y un número mayor de salidas que en el caso "a".

	c) ALIMENTACIÓN INDIVIDUAL	d) EN ANILLO	e) ALIMENTACIÓN DOBLE
Aplicación:	En caso de diverso uso de las plantas, por ejemplo, en alquileres con contadores situados en un punto central, por ejemplo, en la planta baja.	En grandes edificios, por ejemplo, en rascacielos.	En rascacielos , en especial, cuando existan centros de carga en las plantas superiores, por ejemplo, instalaciones elevadoras, cocinas.
Ventajas:	Secciones de los conductores más pequeñas que en los casos "a" y "b" por lo que el montaje es más sencillo. En caso de avería queda afectada la planta correspondiente.	Gran seguridad de alimentación. Dimensionando adecuadamente las líneas de subida y realizando interconexiones transversales en "d" (por ejemplo, interruptor de acoplamiento de control remoto) entre ambas líneas de subida, en caso de avería puede mantenerse el sistema en funcionamiento, desconectando únicamente la parte averiada. Comparando con los tipos "a" y "b", la sección de los conductores de subida es más pequeña, o es admisible una mayor carga. En comparación con los casos "b" y "c" se requiere un cuadro eléctrico de baja tensión más reducido con escasas salidas. Gracias a estas ventajas se ha impuesto en la alimentación vertical el sistema de líneas ascendentes en anillo y el de doble alimentación.	
Inconvenientes:	No se compensan las diferentes cargas de las distintas plantas. Por lo tanto, las líneas ascendentes deben dimensionarse para las carga máximas de cada planta. Antieconómico por la gran acumulación de líneas ascendentes, gran caja para alojar estas líneas, cuadro eléctrico de baja tensión de gran tamaño con numerosas salidas de montaje costoso.		

Tabla 1. Aplicación, ventajas e inconvenientes de los sistemas de alimentación vertical.

En grandes edificios altos lo más conveniente es prever una o varias cajas para alojar de forma aislada las líneas de subida y las derivaciones de las plantas.

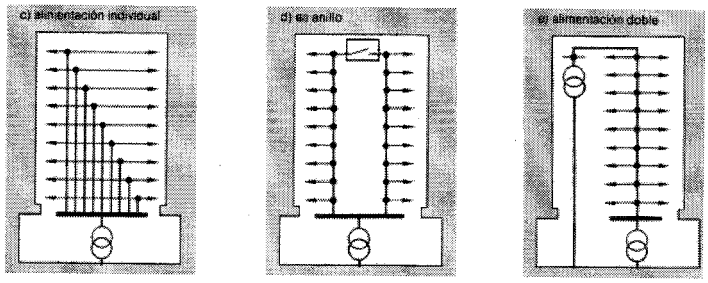


Figura 5. Alimentación vertical.

Se consigue una buena disposición de las líneas ascendentes haciéndolas pasar por los recintos destinados a las distribuciones de planta, necesarias en cada una de ellas. La distribución puede entonces conectarse directamente al sistema de líneas de subida.

En edificios de gran altura y/o con gran consumo de energía es necesario frecuentemente prever cables paralelos.

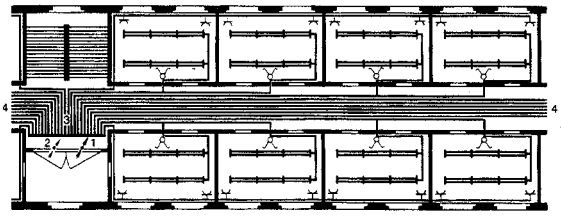
En lugar de cables o líneas de gran sección, difíciles de montar, se emplean frecuentemente distribuciones de barras. Preferentemente deberían utilizarse ejecuciones con intensidades nominales normalizadas.

3.2.- Alimentación horizontal.

La transición de alimentación vertical a la horizontal se efectúa en las distribuciones de planta. El tamaño de dichas distribuciones depende, en lo esencial, de la finalidad y el tamaño, disposición y uso que se dé a los distintos recintos a alimentar. Decisivo para el dimensionamiento es, además, el que se trate de un edificio de nueva construcción o de la modernización de un edificio antigüo, y la posibilidad de que se tengan que montar junto a la parte de baja tensión de la distribución equipos de telecomunicación como son, por ejemplo, centralitas telefónicas.

3.2.1.- Distribución centralizada.

Para poder garantizar la necesaria seguridad de alimentación debe mantenerse pequeña la superficie útil correspondiente a cada circuito. De este modo resulta un elevado número de circuitos y, por lo tanto, mayor número de órganos de protección contra sobreintensidades y aparatos de maniobra. La disposición centralizada de las distribuciones conduce a una confusa aglomeración de cables y a que éstos sean de longitudes indeseables, que dificultan la localización de averías e incrementan la caída de tensión (figura 6).



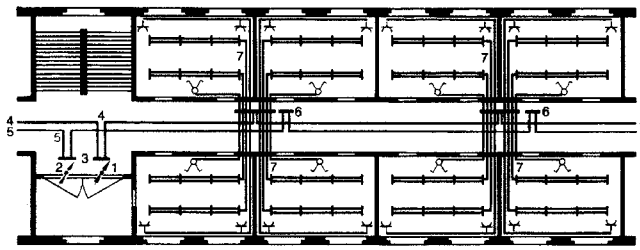
1 Línea ascendente general
2 Línea ascendente de la red auxiliar
3 Distribución de planta
4 Circuitos de carga

Figura 6. Ejemplo de una distribución centralizada.

3.2.2.- Distribución descentralizada.

Para grandes edificios es usual hoy en día la utilización de una forma de distribución descentralizada, según la cual, partiendo de la distribución de planta, se alimentan varias subdistribuciones pequeñas, repartidas por los pasillos (figura 7). De este modo resulta un trazado claro y sencillo de las líneas, así como subdistribuciones más pequeñas por el menor número de órganos de protección contra sobreintensidades ahora necesarios. Las ventajas que ofrece esta forma de distribución con subdistribuciones son las siguientes:

- Derivaciones de corta longitud.
- Localización sencilla de averías.
- Desconexión de solamente una pequeña parte de la instalación en caso de avería.



1 Línea ascendente general
2 Línea ascendente de la red auxiliar
3 Distribución de planta
4 Acometida general a las subdistribuciones
5 Acometida de la red auxiliar a las subdistribuciones
6 Subdistribución
7 Circuitos de carga

Figura 7. Ejemplo de una distribución descentralizada.

La distribución descentralizada permite, además, una adaptación sencilla de la alimentación horizontal a las variaciones de la repartición de espacio o disposición de muebles, por la siguiente razón: cada subdistribución lleva una regleta de bornes a la que se conectan todas las líneas (enchufes, interruptores y acometidas a los aparatos de alumbrado y similares). De este modo puede llevarse la línea a los distintos recintos sin necesidad de cajas de derivación. En caso de que fueran precisas modificaciones puede procederse a la resignación de interruptores o pulsadores para los distintos aparatos de alumbrado mediante sencillas manipulaciones de conexión y desconexión en las subdistribuciones. Con una correcta planificación ajustada a esta técnica resulta, además, un montaje racionalizado.

3.3.- Líneas de servicios generales.

Son las líneas encargadas de suministrar energía eléctrica a todos los servicios generales comunes del edificio. Estas líneas son de dos tipos:

- Líneas de alumbrado.
- Líneas de fuerza motriz.

- **Líneas de alumbrado:**

Suelen ser por lo general, las siguientes:

- Líneas para alumbrado de zonas comunes del edificio, que funcionan con un temporizador (escaleras, portal, garajes, etc.).
- Líneas para alumbrado de zonas comunes que no funcionan con temporizador (cuartos de basura, trasteros, cuartos de instalaciones, etc.).
- Líneas auxiliares para instalaciones de interfornía, megafonía, antena colectiva, portero eléctrico, etc..
  Estas líneas partirán de un mismo equipo de medida y estarán protegidas con interruptores automáticos independientes, para cada una de ellas.

- **Líneas de fuerza motriz:**

Suelen ser por lo general, las siguientes:

- Una línea por cada ascensor o montacargas.
- Una línea para cuarto de calderas de calefacción.
- Una línea por cada 46 kW o fracción de potencia destinada a otros usos.
- Línea independiente si existen máquinas con potencia igual o superior a 46 kW.
- Líneas independientes para cada local comercial.
- Líneas independientes para casos muy específicos (calefacción, ventilación, piscinas, comunitarias, etc.).

4.- ESQUEMAS DE CUADROS DE DISTRIBUCIONES GENERALES.

Los cuadros generales de distribución, corresponden al sistema en árbol representado en la figura 8 donde partiendo de una entrada única (circuito principal), el circuito se va ramificando en circuitos secundarios, terciarios, etc., hasta dar salida al n° total de circuitos independientes que en cada caso se precisen (27 en el ejemplo). Cada conjunto de circuitos puede ser accionado, además de por el interruptor individual de circuito, por un interruptor general, que va agrupando a un determinado número de ellos y así sucesivamente hasta llegar al interruptor general del circuito principal.

En este tipo de cuadros, se van complementando selectivamente los elementos de protección, disponiéndose por lo general aparatos de medida en ellos, tal y como se observa en un cuadro de este tipo en la figura 9 en el que se indican, además de todos los elementos de medida mando y protección del cuadro, la disposición unifilar del esquema general completo y la vista exterior del cuadro.

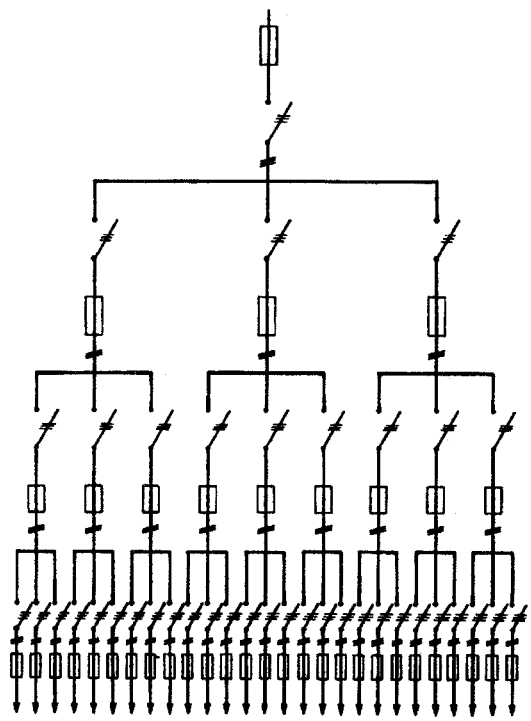


Figura 8. Sistema en forma de árbol.

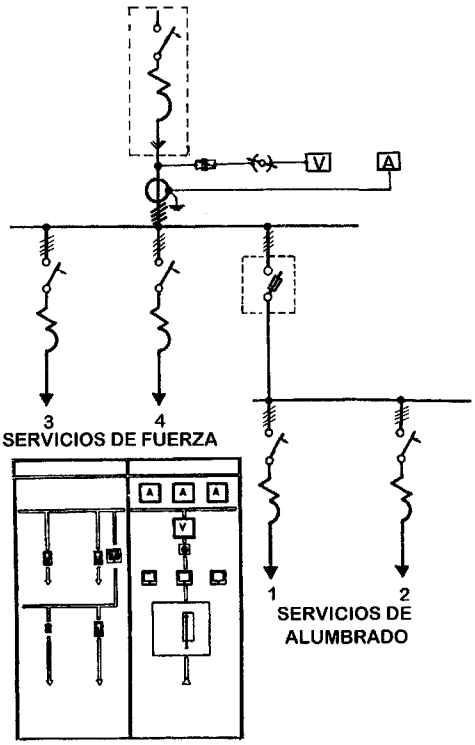


Figura 9. Cuadro de distribución general y esquema unifilar.

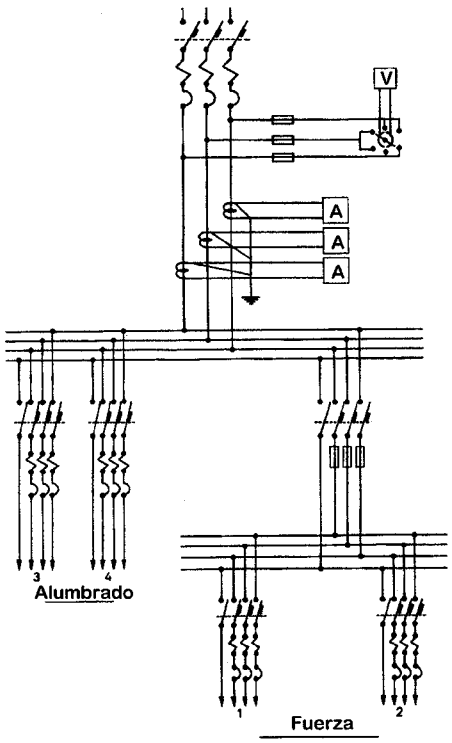


Figura 10. Esquema eléctrico de un cuadro de distribución general.

5.- ESQUEMAS DE CUADROS DE ALUMBRADO.

Los cuadros destinados al mando y protección de circuitos de alumbrado, se caracterizan por el elevado número de interruptores que en ellos se instalan por regla general, ya que de lo que se trata es de independizar circuitos de alumbrado, que puedan ser mandados por áreas, zonas o bloques de iluminación allí donde el capítulo de alumbrado tenga importancia suficiente.

No hay que olvidar, que los cuadros de alumbrado realizan el control, desde un punto estratégico, de las intensidades de iluminación de una zona o un local, generalmente siempre conmutado desde algún otro punto y a, veces, con independencia del mando puntual del propio punto de luz, con lo cual son en realidad una selectividad en cascada del mando del propio punto de luz, abarcando en orden creciente cada vez mayor número de ellos.

En iluminación con tubos fluorescentes, son muy frecuentes las centralizaciones de reactancias y cebadores, ya que éstas representan una gran ventaja a la hora del mantenimiento y reposición de elementos.

6.- ESQUEMAS DE CUADROS DE FUERZA.

Los cuadros de fuerza, son fundamentalmente para mando de líneas de fuerza a las que generalmente van conectados motores.

Ya de por sí, el simple accionamiento individual de un motor trifásico, precisa un pequeño cuadro de mando y protección, en el que se concentren los elementos de maniobra, control, señalización y protección de cada motor, el cual puede ser simple o múltiple, abarcando la distribución de varios motores.

Los motores trifásicos de inducción, tienen un estator, formado por tres devanados o bobinas, a cada cual le llega la corriente de cada una de las tres fases que constituyen el sistema trifásico. Las tres bobinas, que constituyen el estator, forman un conjunto que representa tres principios y tres finales de bobina, con lo cual la placa de bornes de un motor trifásico, tiene seis bornes correspondientes a los tres principios y tres finales de cada bobina.

Estas bobinas se pueden conectar de dos formas: en estrella y en triángulo, por lo cual, estos motores tienen una posibilidad de trabajar a dos tensiones según estén conectadas sus bobinas.

Los cuadros simples de conexión fija de un motor trifásico lo tenemos en la figura 11 donde se dispone una entrada de línea, una protección (cortocircuitos fusibles) y un interruptor de maniobra trifásico, elementos de cuadro, que en muchas ocasiones, se encuentran ubicados en la misma máquina que es accionada por dicho motor eléctrico.

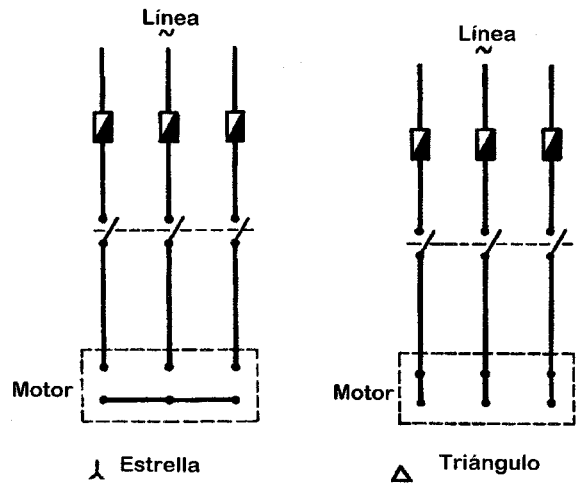


Figura 11. Elementos necesarios en un cuadro de un motor trifásico.

En motores grandes de más de 5 CV, ocurre que, en el momento de arrancar, la intensidad de consumo es muy grande, debido a la inercia que tiene el rotor a ponerse en movimiento.

En motores de rotor muy grande, que tienen mucha inercia, se recurre al procedimiento de arrancadores en estrella, con lo que la tensión de fase es más pequeña y por tanto la Intensidad I = V/R es menor, en el momento de arrancar, y cuando el motor ya ha girado unos segundos y ha vencido la inercia, se conecta en triángulo y el motor queda trabajando normalmente en triángulo a la tensión normal que manda el fabricante. La realización práctica de este sistema se hace mediante un arrancador conmutador estrella-triángulo y entonces en la placa de bornes del motor no se puede hacer ninguna clase de puentes y hay que llevar los seis hilos al conmutador, para que sea éste quien haga los puentes, con arreglo a cada posición, de estrella y triángulo.

En los cuadros de fuerza dispuestos para el accionamiento y protección de motores trifásicos, se suelen instalar todos estos interruptores o conmutadores así dispuestos y completados con elementos de medida (tensiones e intensidades fundamentalmente), tal y como representa la figura 12.

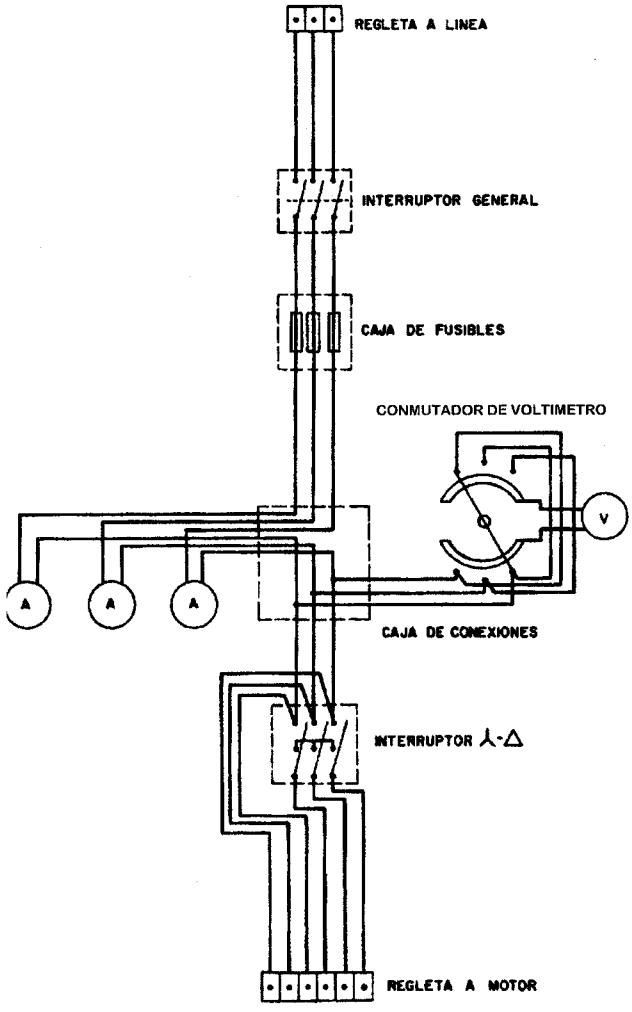


Figura 12. Elementos que se disponen en un cuadro de fuerza para el arranque de un motor estrella-triángulo.

7.- ESQUEMAS DE CUADROS DE AUTOMATIZACIÓN POR CONTACTORES.

Hoy en día, es muy frecuente la utilización de contactores en las instalaciones de motores, lo cual representa una gran ventaja en los sistemas de telemandos, pudiendo combinar las maniobras con relés temporizados y verificar todas las operaciones descritas anteriormente en inversores, arrancadores estrella-triángulo etc. de una manera automática. En la figura 13 se detalla el esquema de funcionamiento de un contactor para un motor trifásico. Estos sistemas tienen gran aplicación en la instalación de ascensores y montacargas, grúas, motobombas, etc.. Se representan las disposiciones esquemáticas de los circuitos principales y de mando en la figura 14 para un inversor de sentido de giro de un motor trifásico, de una forma automática. Y en la figura 15 para un arrancador estrella-triángulo.

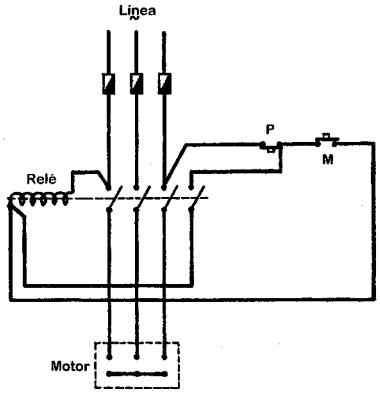


Figura 13. Esquema de funcionamiento de un contactor.

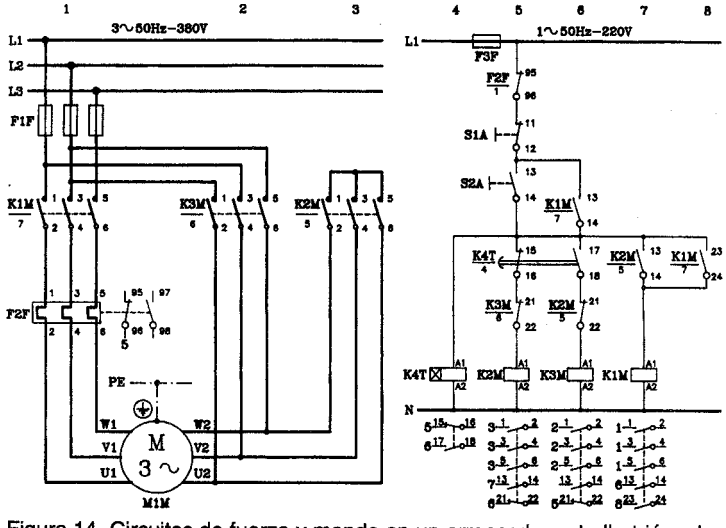


Figura 14. Circuitos de fuerza y mando en un arrancador estrella-triángulo.

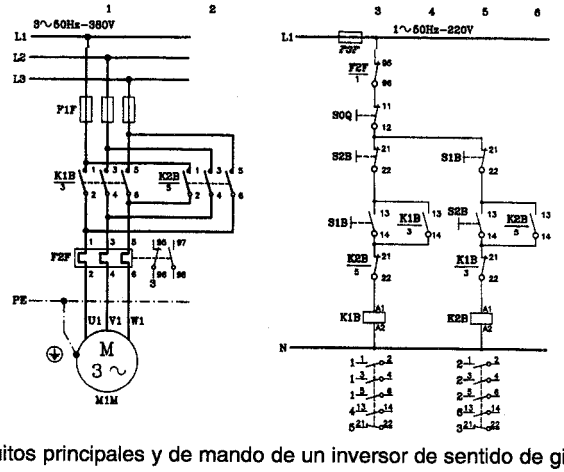


Figura 15. Circuitos principales y de mando de un inversor de sentido de giro de un motor.

El esquema de circuitos es el más utilizado, abarcando todos los detalles del funcionamiento y de la instalación tal y como se representa en el de la figura 16 correspondiente a la instalación de un inversor, en ella se representan dos circuitos uno multifilar, que refiere al circuito principal o de potencia, y el otro unifilar, que es el circuito de mando; ambos forman dos conjuntos independientes dentro del mismo dibujo de representación y se realizan, según puede verse, con distinto espesor de línea, más gruesa el circuito principal y más fina el de mando y generalmente al lado derecho del anterior así pues, siguiendo unas reglas y una nomenclatura establecidas, se puede comprender fácilmente el funcionamiento del mecanismo de mando y accionamiento.

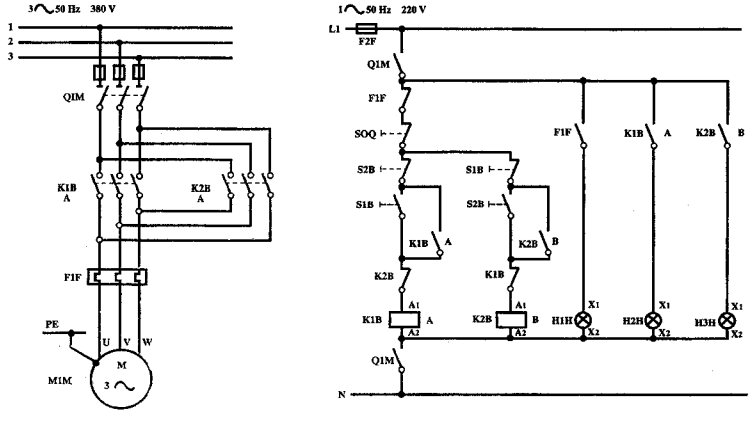


Figura 16. Inversor de sentido de giro.

La disposición de todos los símbolos que ayudan a la realización y comprensión del funcionamiento del equipo y la distribución de los signos de identificación de elementos obliga a adoptar los siguientes criterios generales:

a) En la parte izquierda del papel se dibuja el circuito principal en representación multifilar y sobre líneas verticales imaginarias (columnas) se marca la numeración de los circuitos de control con los números 1, 2, 3, 4, 5, etc. que se colocan encima de los embarrados generales.

b) Se dibuja, a la derecha de este circuito, el de mando y auxiliar en forma desarrollada en la que los símbolos están sobre líneas verticales imaginarias (columnas) marcadas con números correlativos.

c) La numeración, tanto en el circuito principal como en el de mando, se realiza de izquierda a derecha, y ningún símbolo se coloca fuera de la columna marcada numéricamente.

d) Se representan todos los aparatos en su posición de reposo o sin alimentación.

e) La información que se desea obtener se agrupa mediante una serie de bloques de información puestos en sentidos horizontal al lado del símbolo. Esta información y por este orden es CLASE-NÚMERO-FUNCIÓN. La clase se representa por una sóla letra mayúscula que es representativa de una familia de elementos y es deducida nemotécnicamente de un idioma. (Por ejemplo C, condensador, G, generador). El número sirve para distinguir entre varios elementos designados por las mismas letras, y se utiliza toda la secuencia del 1 hasta n. La función indica la información de la misión que tiene el símbolo existiendo un código para cada función.

f) Los bornes de los contactos de los aparatos auxiliares de mando se marcan con números de dos cifras. La cifra de las unidades indica la función y siempre es la misma en todos los elementos de contacto que tengan la misma función, aunque se repite en el esquema (Por ejemplo 1-2 para todo contacto de apertura y 3-4 para todo contacto de cierre). La cifra de las decenas indica el número de orden.

En las figuras 17 y 18 se muestran distintos esquemas de cuadros eléctricos.

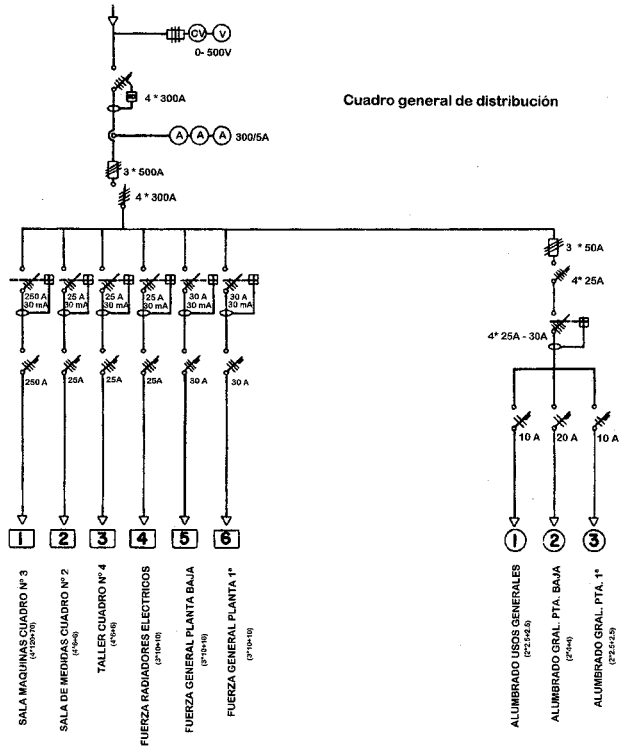


Figura 17. Esquema cuadro de distribución general.

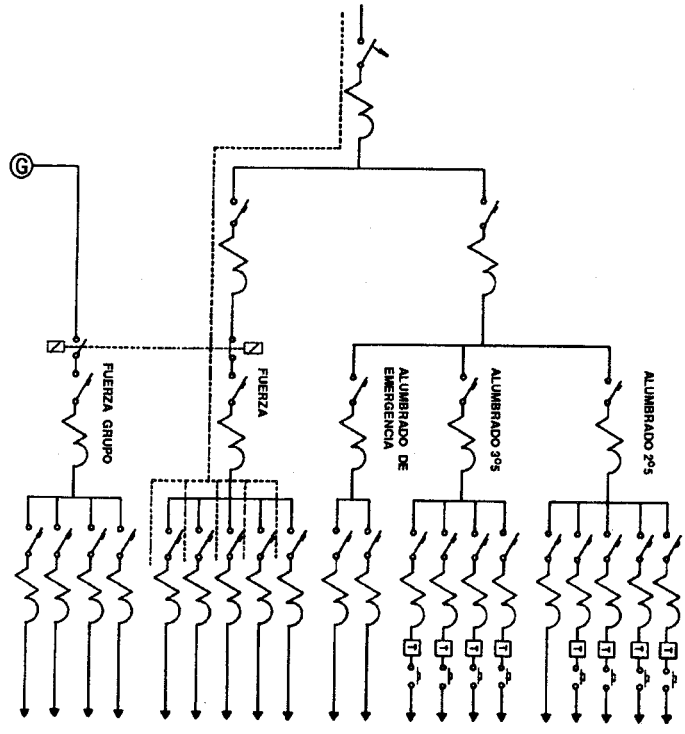


Figura 18. Esquema cuadro de distribución general.

8.- ARMARIOS ELÉCTRICOS.

Los cuadros eléctricos con intensidades nominales de hasta 4.000 A aproximadamente se utilizan preferentemente como cuadros principales en grandes establecimientos industriales y comerciales, en centrales eléctricas, refinerías, y edificios y clínicas de gran tamaño; es decir, en todas partes donde deba cubrirse un gran consumo de energía.

En las figuras 19 y 20 se muestran el despiece de los elementos que constituyen un cuadro eléctrico.

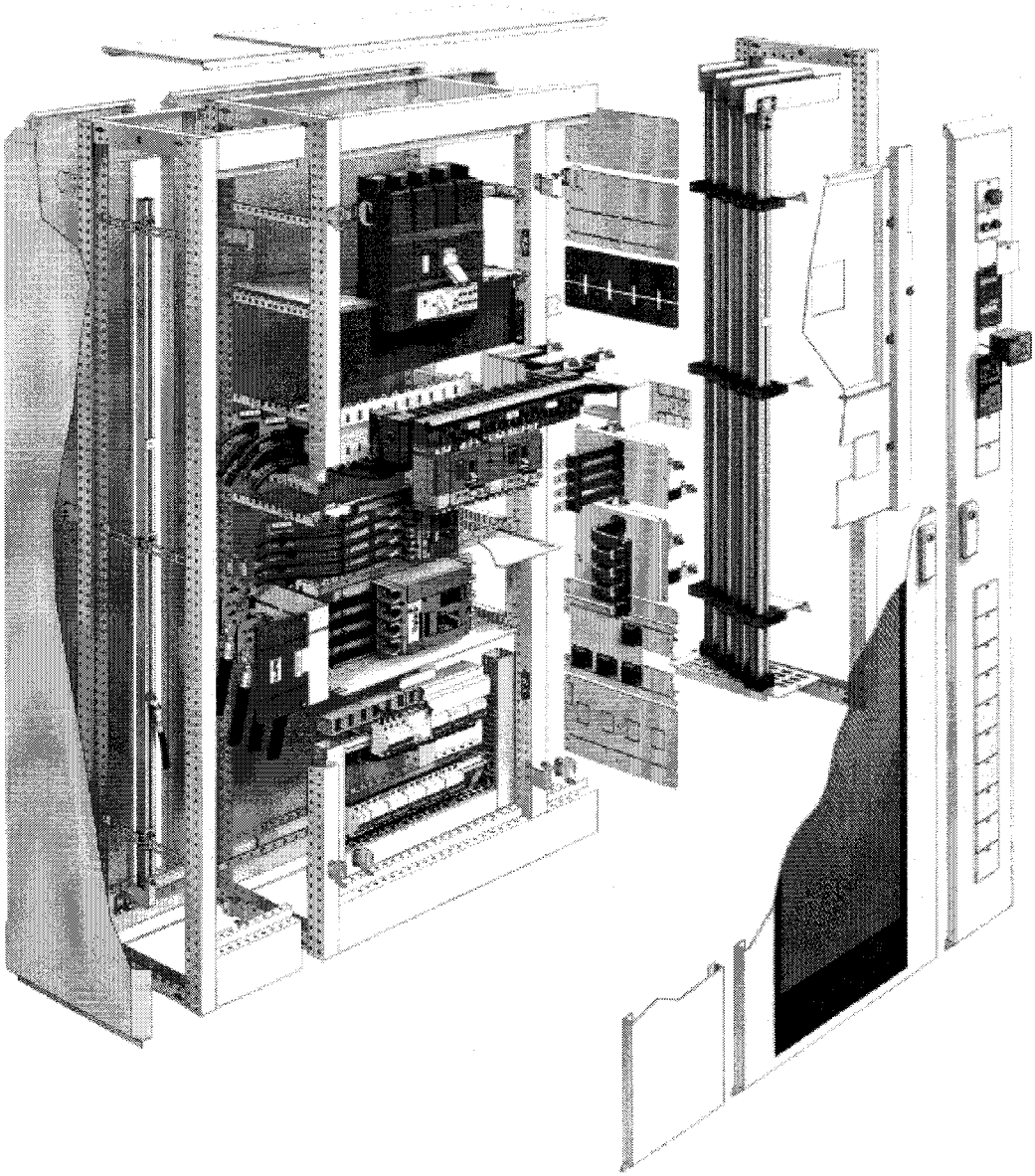
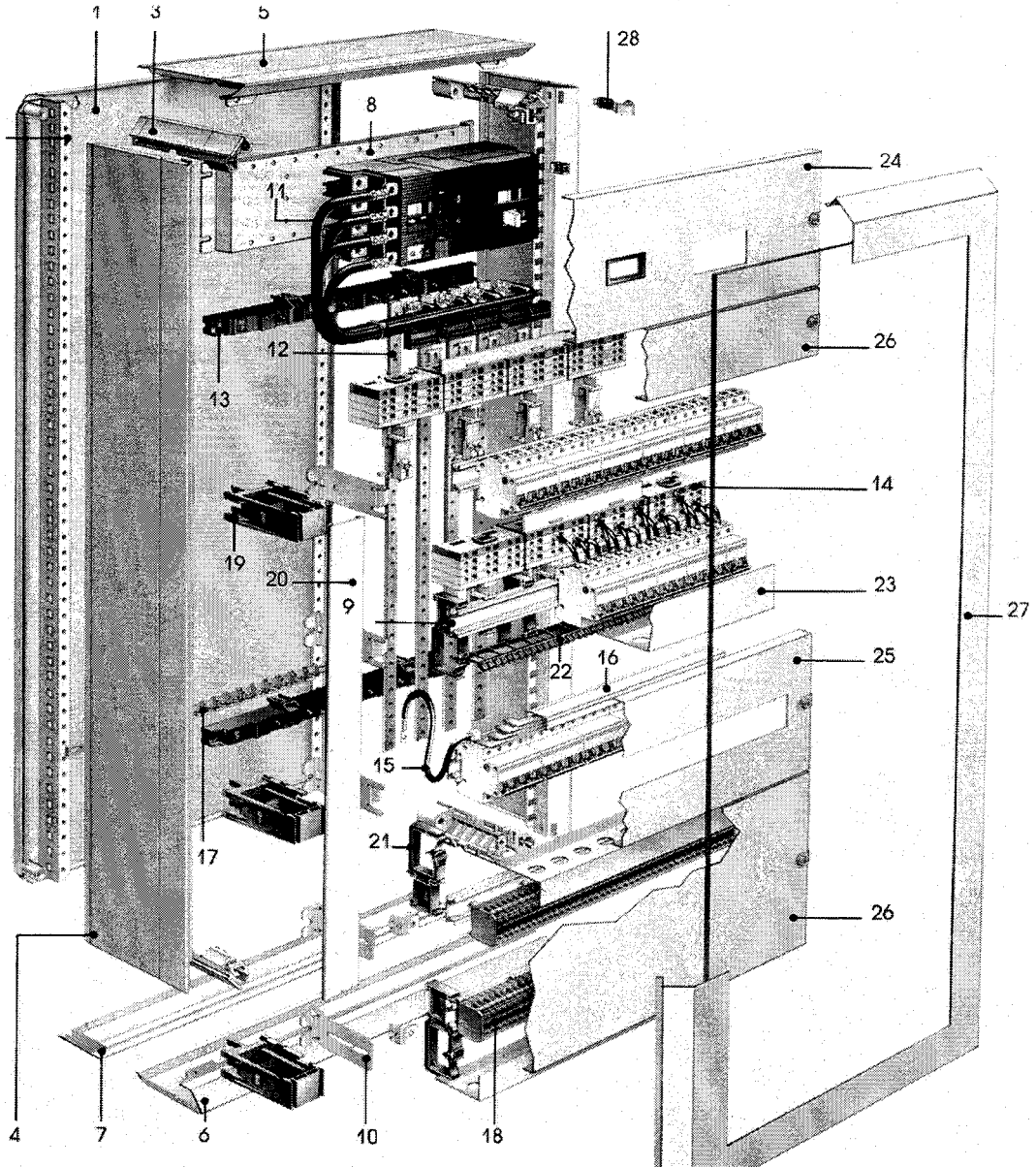


Figura 19. Esquema cuadro de distribución general.



Cofret funcional Prisma G
1 fondo sirviendo de chasis
2 montante taladrado fijación placas soporte aparatos
3 pilar soporte
4 pared lateral
5 pared horizontal superior/inferior
6 1/2 pared horizontal
7 placa pasacables

Soporte del aparellaje
8 placa soporte para interruptor Compact
9 carril Multifix para aparatos modulares Multi9
10 carril regulable en profundidad para regletas de salida

Componentes de conexión
11 conexión prefabricada
12 barra de cobre taladrada
13 soporte de barras
14 repartidor Multiclip
15 conexión prefabricada
16 peines de conexión
17 barra colectora de tierra
18 regletas de salida

Repartición de conductores
19 brazalete vertical para conductores
20 tapa de protección para brazalete vertical
21 brazalete horizontal para conductores
22 guía de cables
23 tapa de protección para brazalete horizontal

Frontal
24 tapa frontal perforada para interruptor Compact
25 tapa frontal perforada para aparellaje modular Multi9
26 tapa frontal plena

Puerta
27 puerta transparente (ó plena)
28 bisagras de la puerta

Figura 20. Esquema cuadro de distribución general.

El esquema eléctrico básico de la figura 21 muestra una configuración razonable de una red industrial con un cuadro eléctrico principal, alimentado directamente por transformadores conteniendo sólo interruptores de potencia de alimentación, derivación y acoplamiento longitudinal, y con distintas "subdistribuciones" para las aplicaciones más diversas.

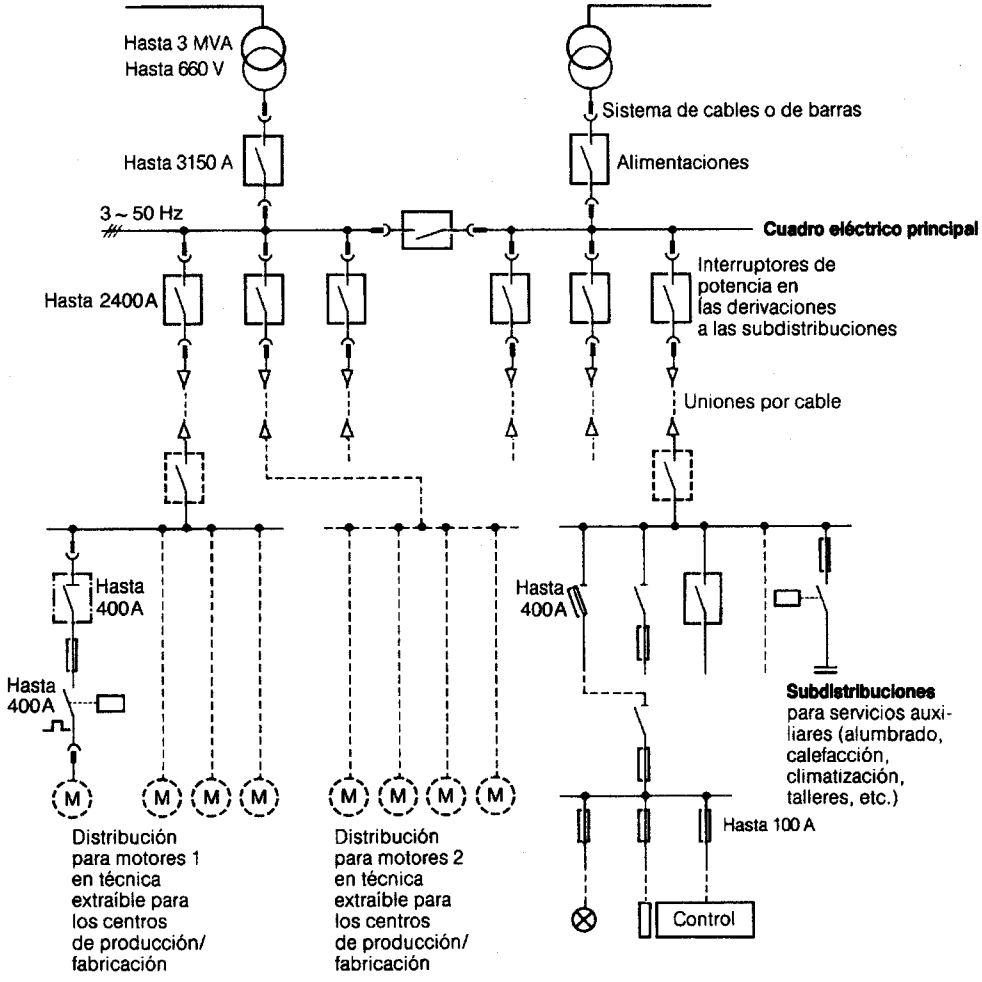


Figura 21. Ejemplo de configuración de una red de baja tensión en una empresa industrial.

Cuando los cuadros eléctricos se encuentren en la proximidad inmediata de los transformadores puede ser ventajosa su alimentación a través de canales blindados de barras. La introducción de las barras en el cuadro es entonces posible, como en el caso de los cables, desde abajo o, a través de módulos adicionales, desde arriba.

Caso de utilizarse cables, debe considerarse que, por ejemplo, para un transformador de 2 MVA y 3.000 A aproximadamente de intensidad nominal a 380 V, deben fijarse y conectarse en la sección de alimentación hasta 14 cables paralelos con una sección de 240 mm^2 por cada conductor activo. El montaje es, por lo tanto, considerablemente más costoso.

Las salidas se conectan, por forma general, mediante cables. Según las distancias y dependiendo de la caída de tensión y de las intensidades a transportar, a partir de 250A aproximadamente, cabe la utilización también aquí de cables paralelos.

En la mayoría de los casos, y dado que consumidores asimétricos tales como calefacción, alumbrado o motores monofásicos se conectan raramente a los cuadros eléctricos principales, puede preverse un sistema de barras colectoras de cuatro conductores, con las tres fases activas L1, L2 y L3 y una barra conductora PE ó PEN tendida por la parte inferior de las secciones. Los conductores activos se encuentran en la parte superior del cuadro eléctrico o escalonadamente unos sobre otros en la parte posterior, a media altura de la sección. En lo que respecta a la capacidad de carga de las barras colectoras, tanto para la intensidad nominal o para la intensidad de servicio nominal en servicio normal, como para las intensidades de cortocircuito son, para los cuadros fabricados exclusivamente determinantes las indicaciones de los fabricantes para el producto concreto.

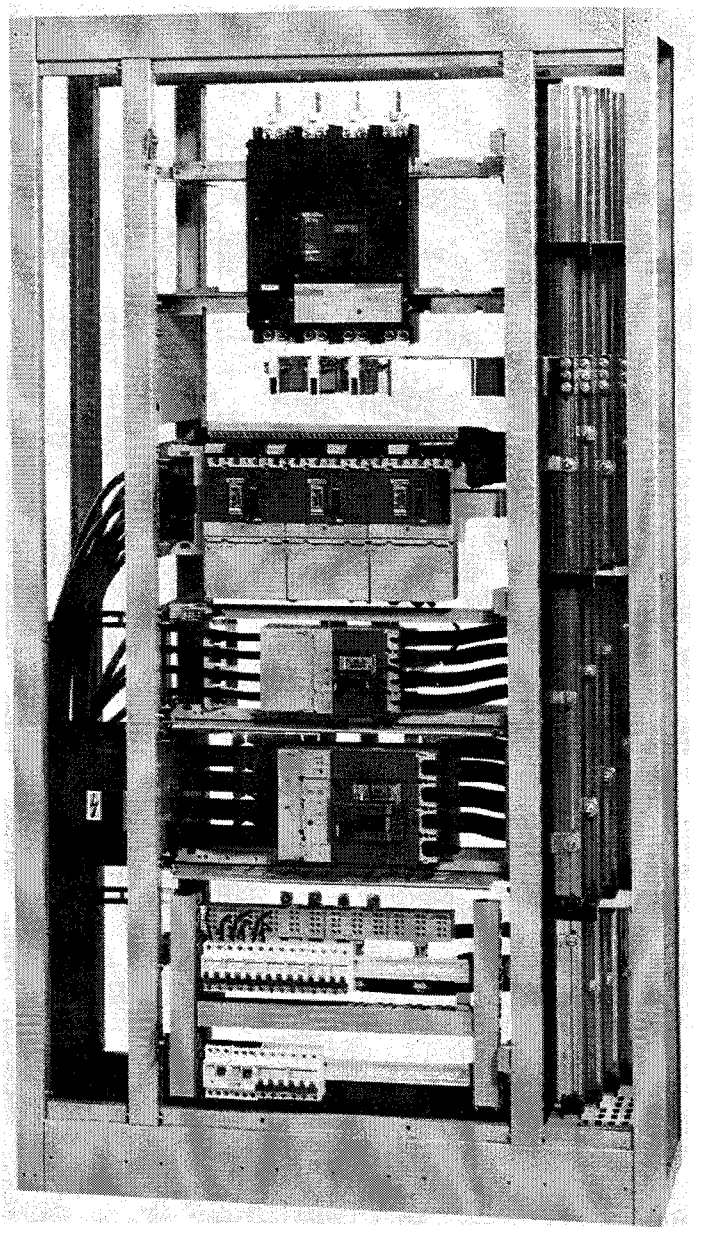


Figura 22. Salidas de un cuadro eléctrico con cables.

Las intensidades nominales y de cortocircuito de las barras colectoras presentan, según el tipo de cuadro eléctrico, diferentes valores, que dependen de:

- La posición de montaje en las secciones.
- La relación entre los distintos conductores.
- La sección de los conductores utilizados.
- La resistencia mecánica de los conductores utilizados.
- Las distancias entre los soportes.
- Las posibles influencias térmicas de otros medios de servicio.

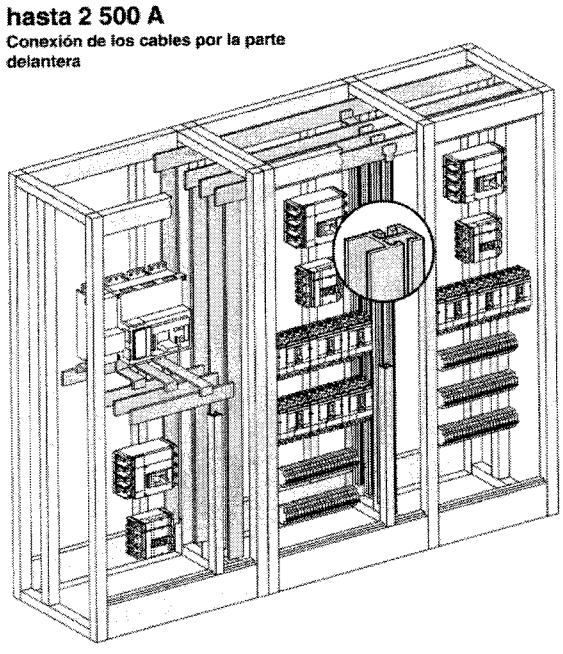


Figura 23. Cuadro eléctrico con barras hasta 2.500 A.

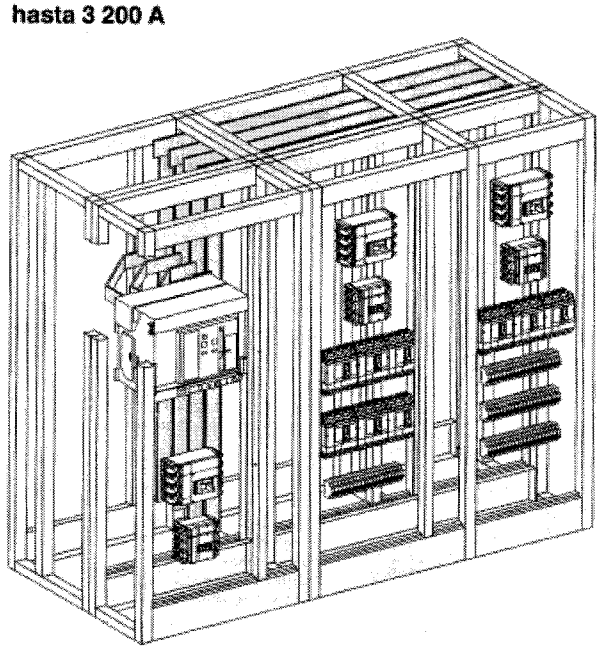


Figura 24. Cuadro eléctrico con barras hasta 3.200 A.

Según sea el lugar en que se vaya a instalar el cuadro eléctrico o la distribución y sus condiciones ambientales, hay que elegir una ejecución que ofrezca la protección necesaria contra los contactos y contra la entrada de cuerpos extraños y agua. En la tabla 2 se muestra las dígitos de grados de protección y el significado.

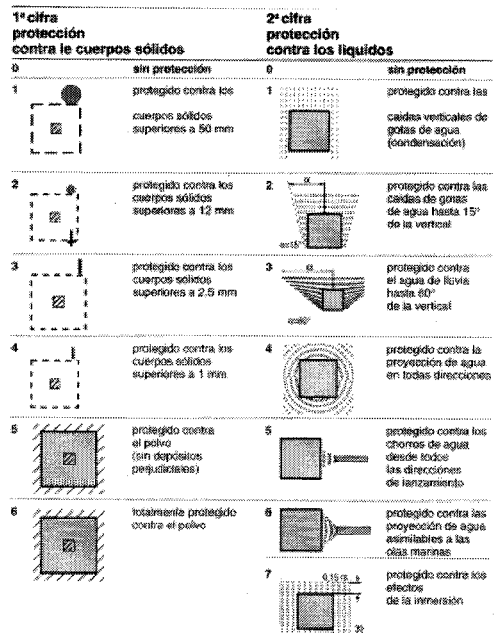


Tabla 2. Significado de los dígitos de grados de protección.

En las figuras 25 y 26 se muestran distintos cuadros comerciales en función del grado de protección.

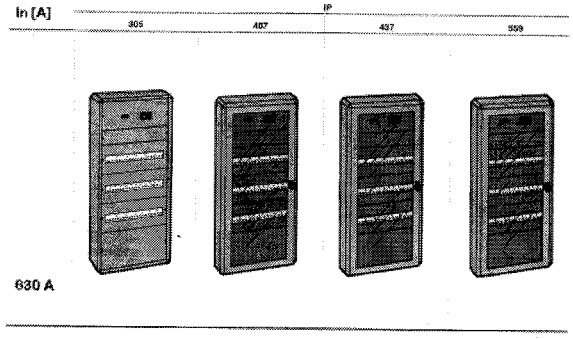


Figura 25. Esquema cuadro de distribución general.

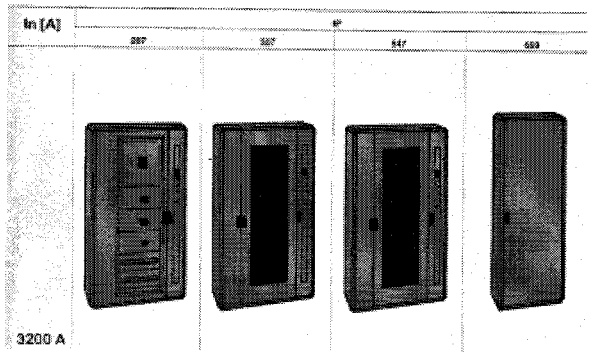


Figura 26. Esquema cuadro de distribución general.

En las figuras 27 a 33 se muestran cuadros eléctricos con los distintos modos de conexionado interno.

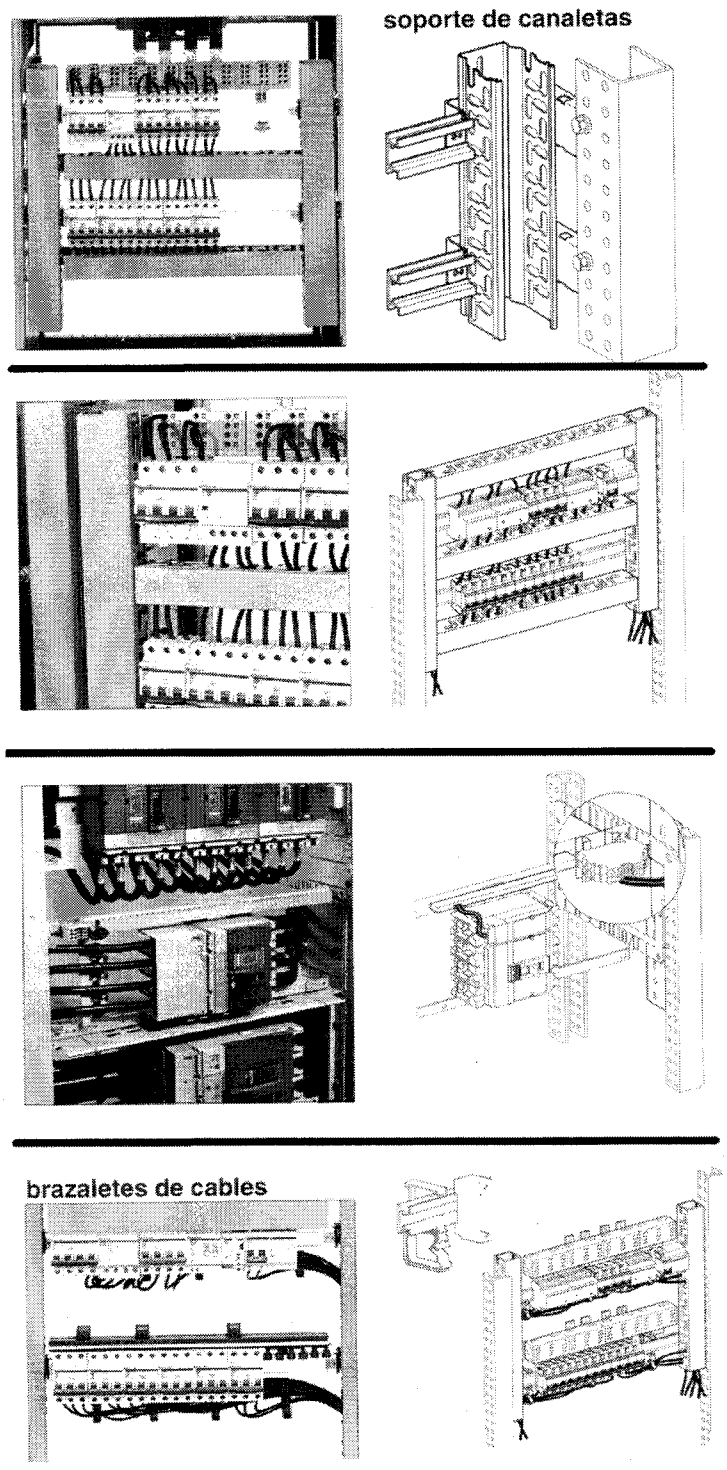


Figura 27. Disposición de los conductores en canaletas en el interior de un cuadro eléctrico.

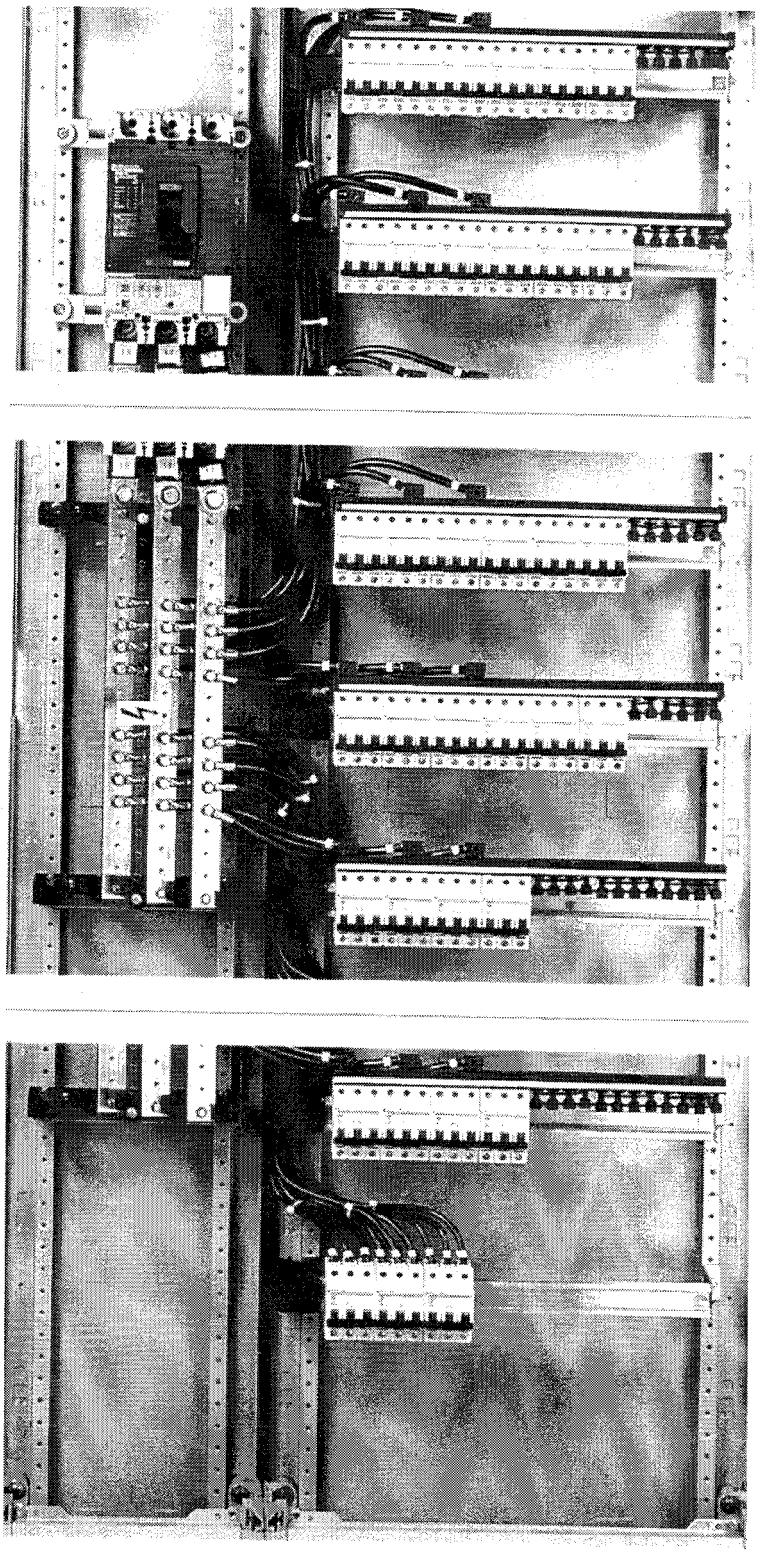


Figura 28. Conexionado interno en un cuadro eléctrico.

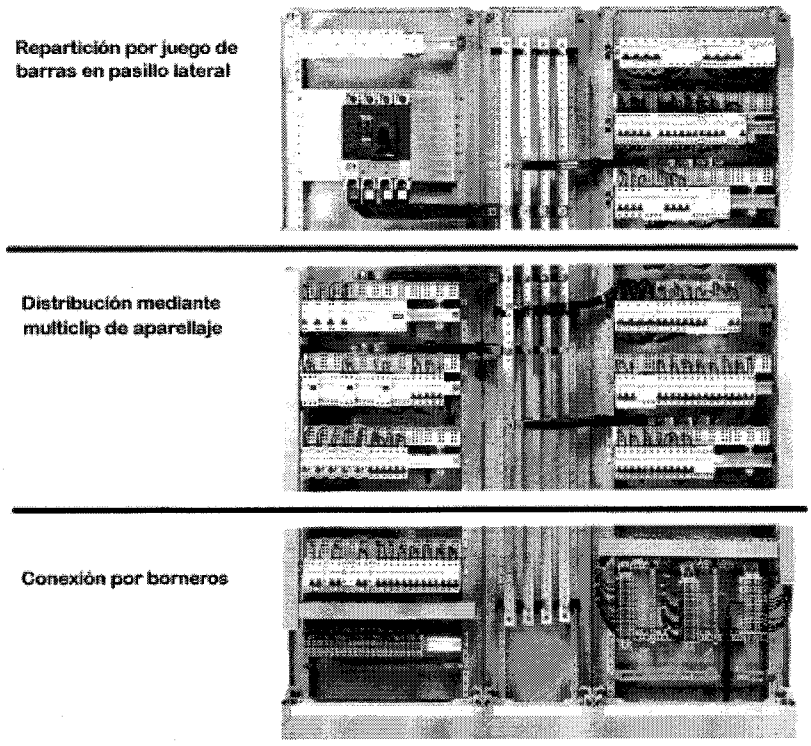


Figura 29. Conexionado interno en un cuadro eléctrico.

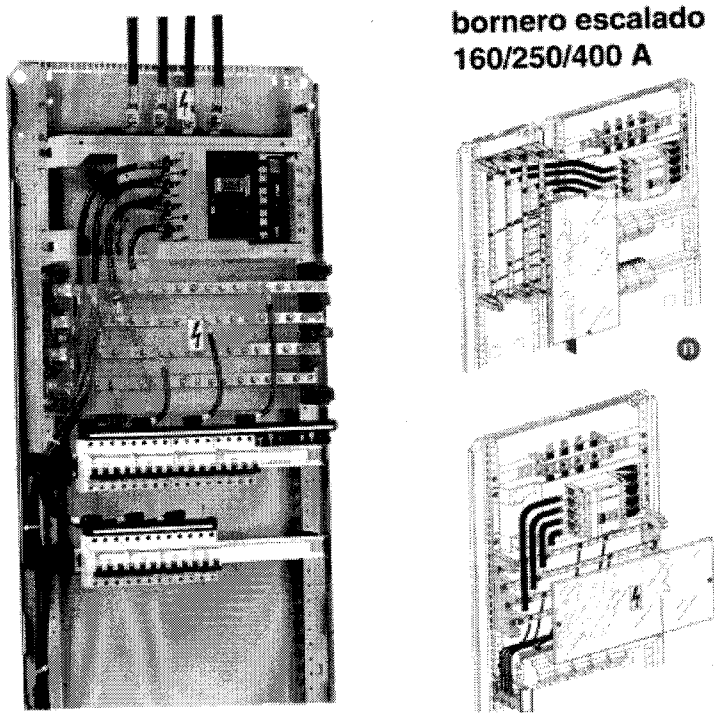


Figura 30. Conexionado interno en un cuadro eléctrico.

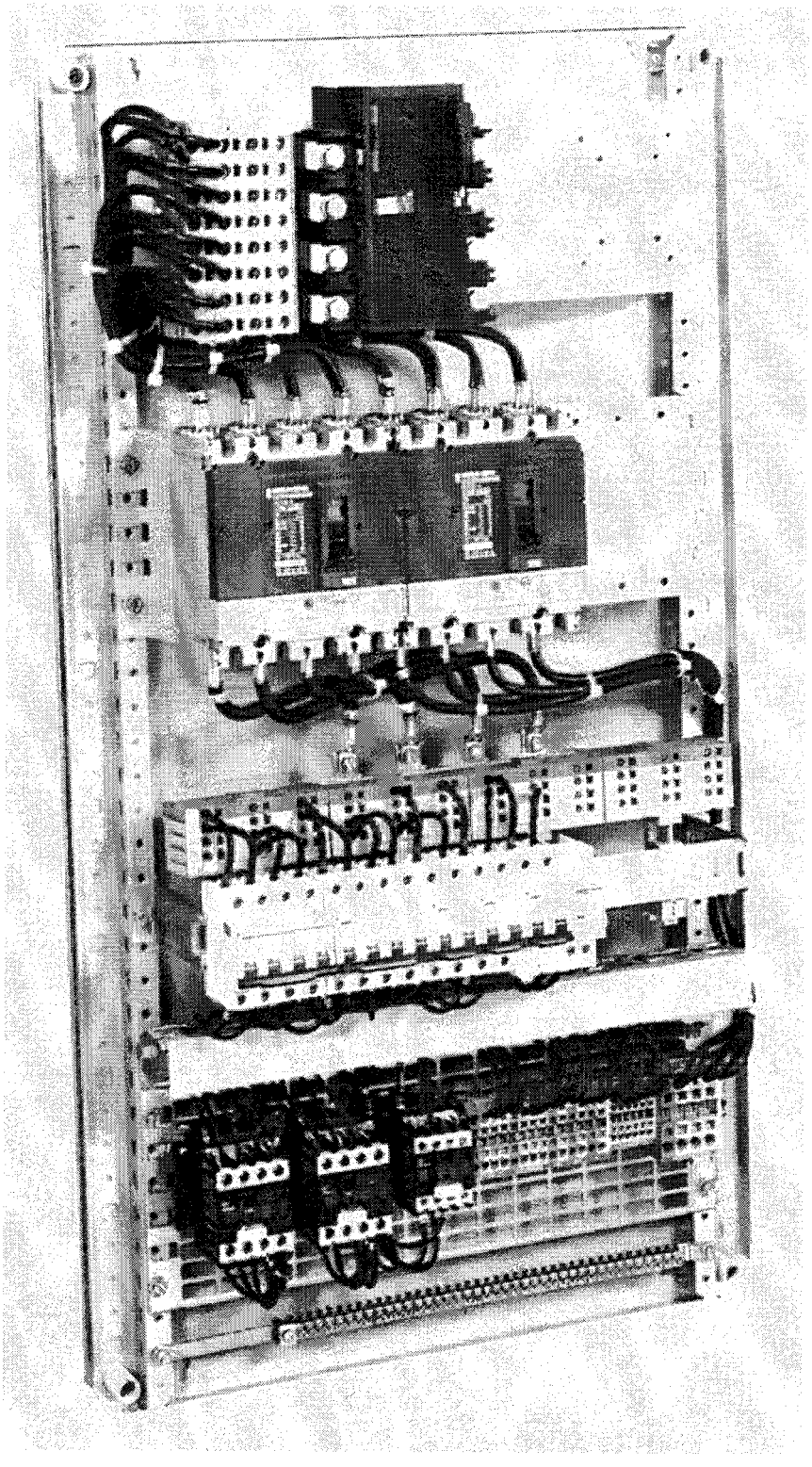


Figura 31. Conexionado interno en un cuadro eléctrico con contactores.

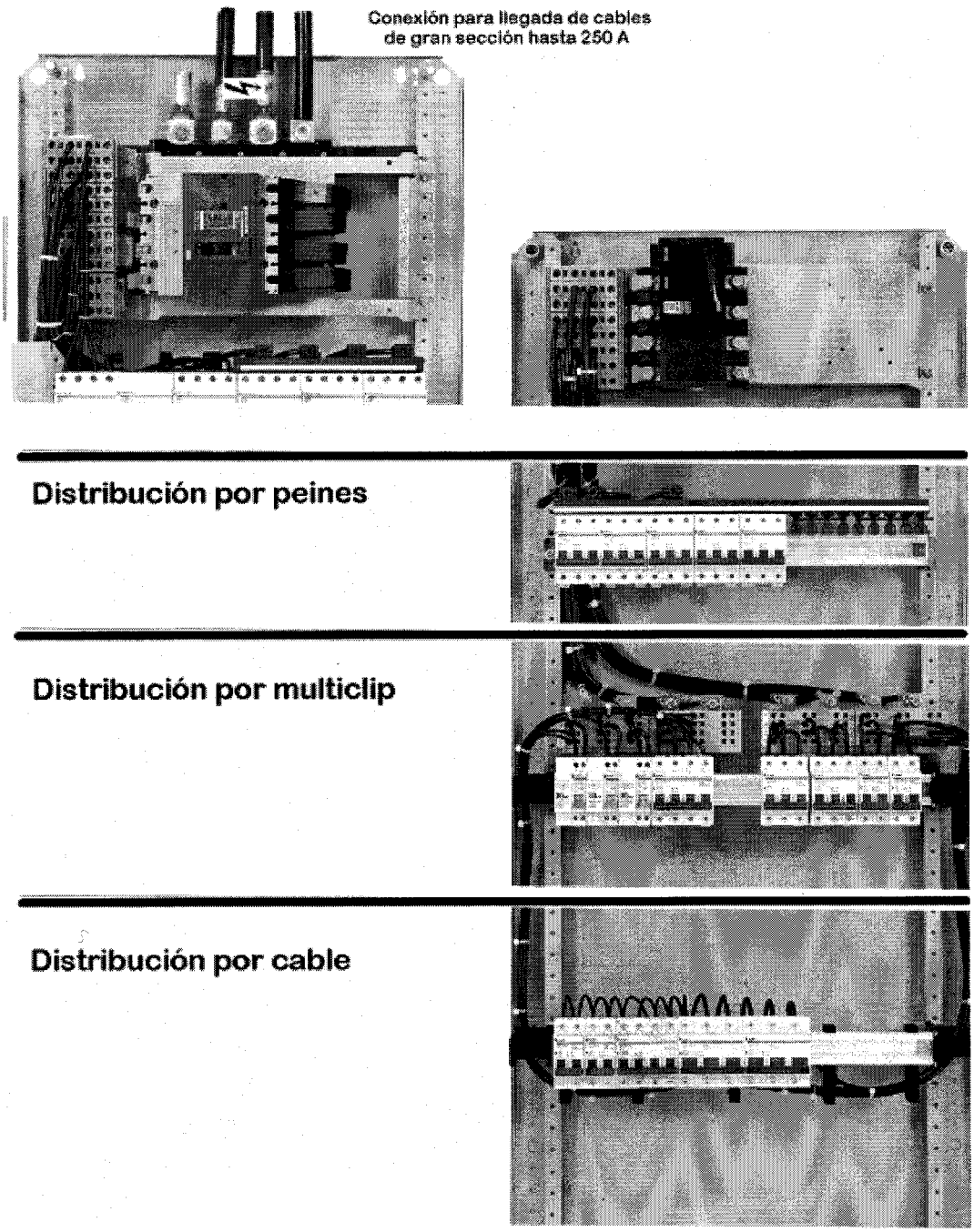


Figura 32. Conexionado interno en un cuadro eléctrico.

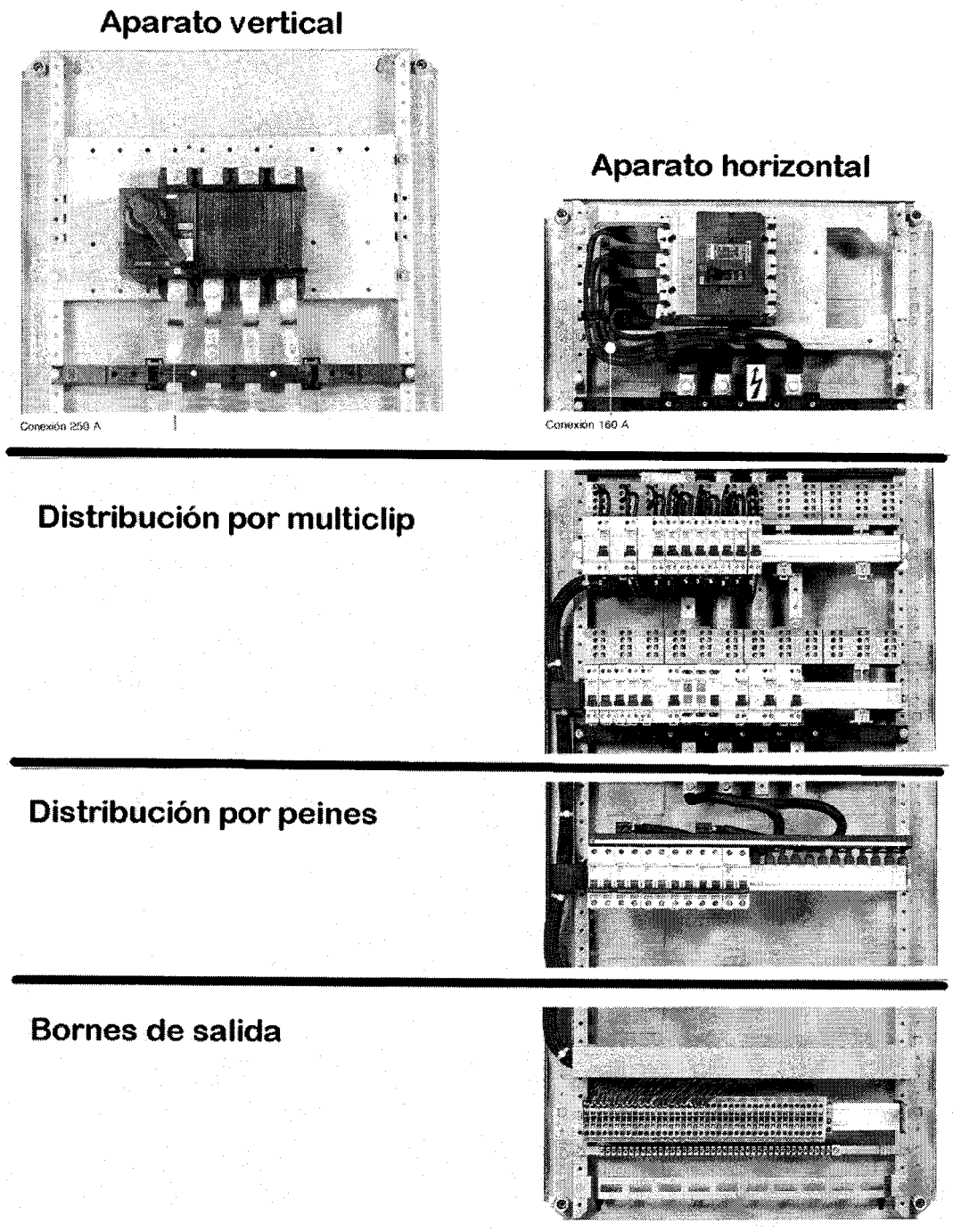


Figura 33. Conexionado interno en un cuadro eléctrico.

A la hora del montaje de los distintos elementos que componen un cuadro eléctrico es necesario llevar a cabo una perfecta distinción entre los elementos de potencia y control dentro de éste para conseguir la compatibilidad electromagnética como queda reflejado en las figuras 34 y 35.

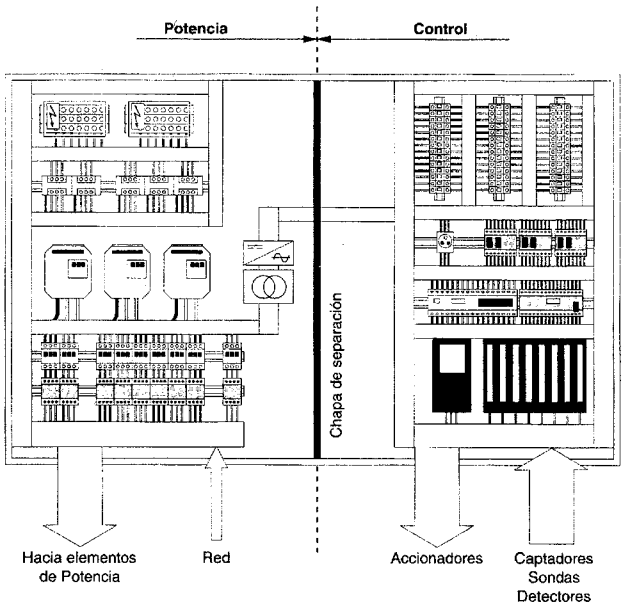


Figura 34. Esquema cuadro de distribución general.

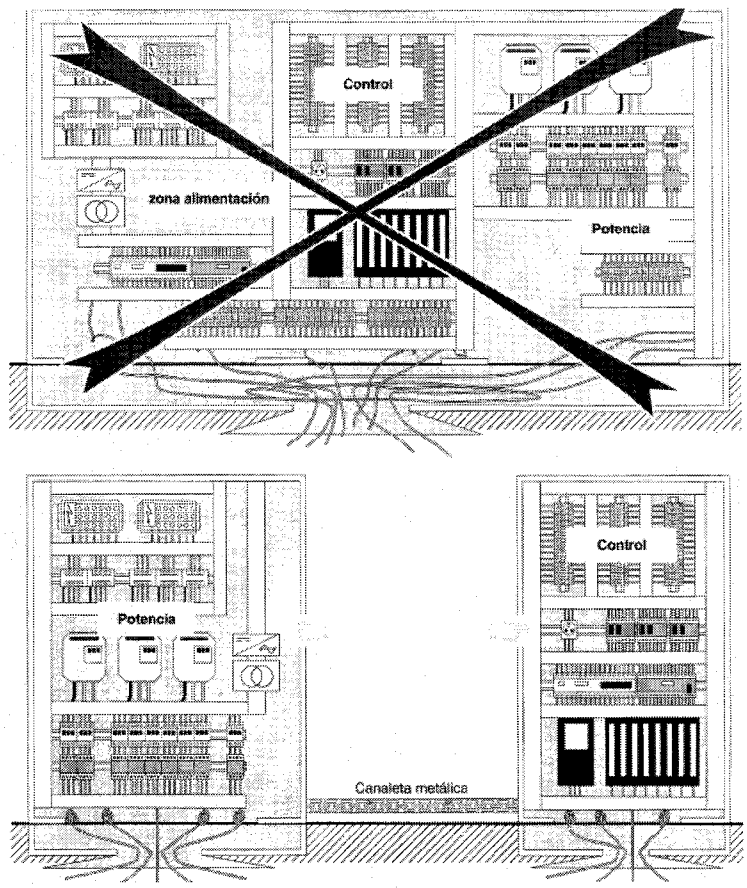
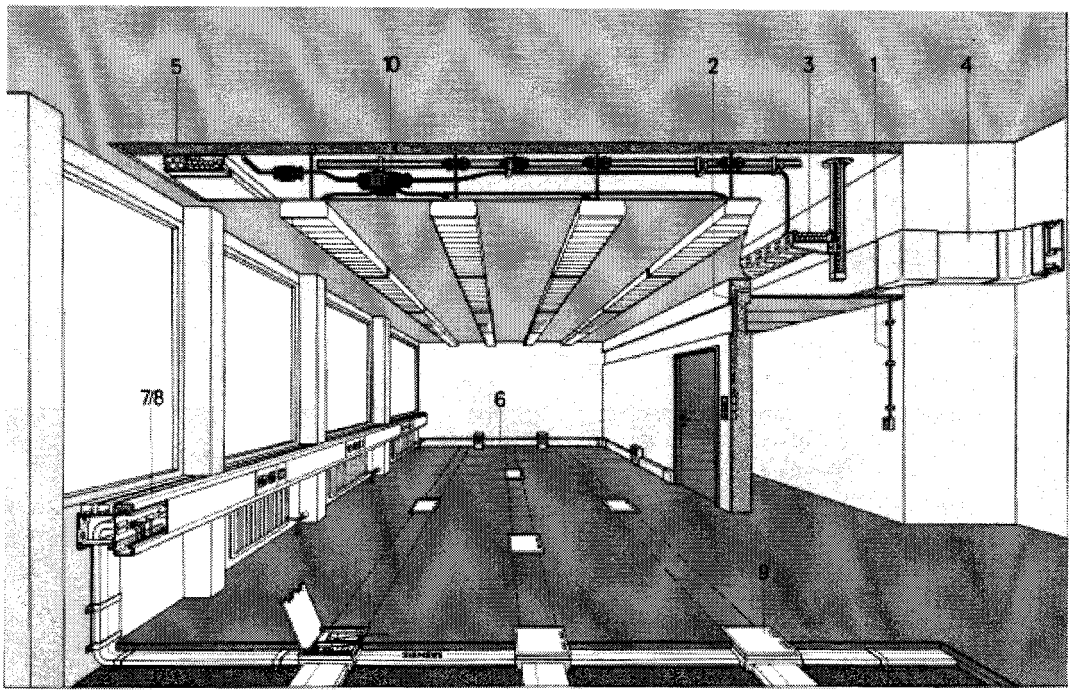


Figura 35. Esquema cuadro de distribución general.

TEMA 18. CANALIZACIONES ELÉCTRICAS

1.- INTRODUCCIÓN.

Las figuras 1 y 2 muestran las formas generales de tendido de líneas en grandes edificios y en el exterior de éstos.



1 Montaje sobre revoque
2 Montaje bajo revoque
3 Canales para cables
4 Canales de pared para el tendido de cables
5 Canales en el techo para el tendido de cables
6 Canales para rodapiés
7 Canales para repisas de ventanas
8 Canales para antepechos de ventanas
9 Sistema de montaje bajo el piso
10 Sistema de montaje rápido (instalación a base de materiales prefabricados)

Figura 1. Representación general de las formas de tendido de líneas en el interior de un edificio.

2.- MONTAJE SOBRE Y BAJO REVOQUE.

Se distinguen dos tipos básicos de montaje:

- Sobre revoque.
- Bajo revoque.

Cuando se trata del montaje sobre revoque (figura 3) los cables de acometida, por ejemplo, a los aparatos de alumbrado, cajas de enchufe de fuerza, se montan sobre el revoque o sobre la superficie de una parte constructiva del edificio. Para ello, los cables correspondientes

pueden fijarse directamente mediante abrazaderas, o conducirse a través de tubos de acero o de plástico, o de canales en la pared o en el techo. Esta forma de tendido se utiliza, por ejemplo, en recintos húmedos, así como en sótanos y pasillos. Una solución considerablemente mejor es la que ofrece el montaje bajo revoque (figura 4). Cuando se ejecuta este tipo de tendido, los cables, tubos o canales se disponen casi siempre al ras o sobresaliendo solo un poco del muro para protegerlos contra daños durante los trabajos de revoque. Una vez efectuado el revoque quedan invisibles. La búsqueda de métodos más sencillos de tendido llevó al desarrollo de cables planos, especialmente apropiados para montaje bajo revoque. Debido a su rápido y sencillo montaje y haciendo abstracción de las dificultades que acarrearían futuros trabajos de equipamiento, se considera como una de las soluciones más económicas en el ámbito de la vivienda. No es adecuado el instalar bajo revoque los cables de telecomunicación por la frecuencia con la que se modifican tales instalaciones.

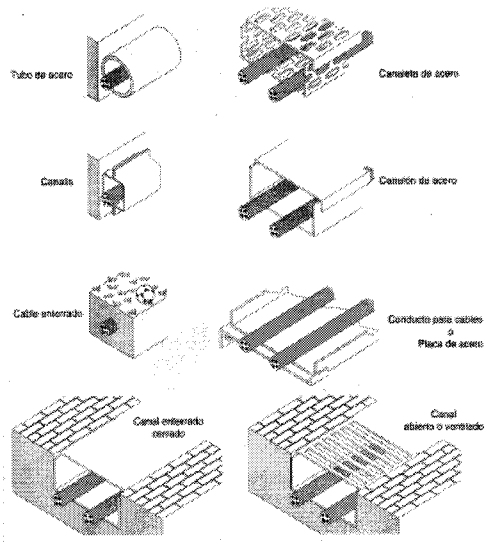


Figura 2. Tendido de conductores en diferentes medios.

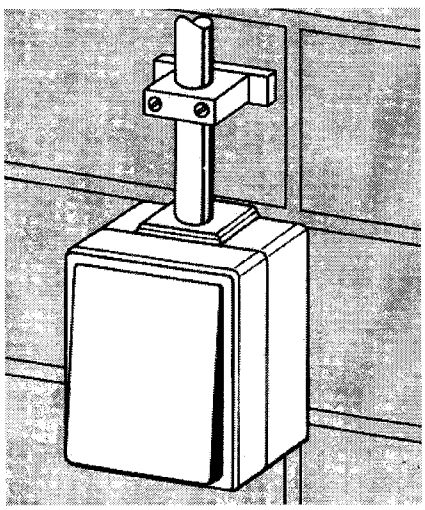


Figura 3. Montaje sobre revoque de un interruptor.

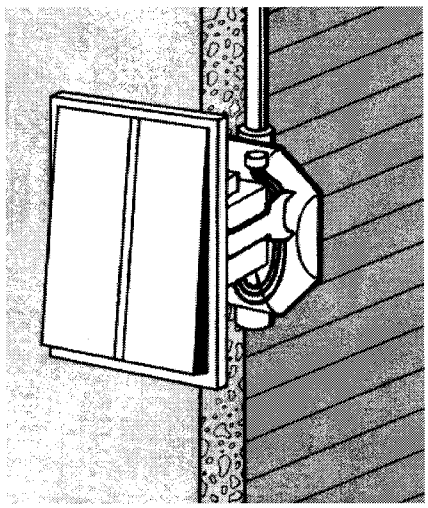


Figura 4. Montaje bajo revoque de un interruptor.

3.- TENDIDO DE LÍNEAS POR SISTEMAS DE CANALES.

Los sistemas de canales se utilizan desde hace muchos años para el tendido de líneas y para la instalación de accesorios en edificios industriales, de administración y viviendas. Para cada tipo de aplicación se dispone de un amplio programa de distintos sistemas de canales de múltiples dimensiones, materiales y colores. Abarca desde el canal simple para el tendido en línea hasta el sistema modular de canales, más desarrollado, para la instalación de equipos eléctricos.

La configuración de los distintos sistemas de canales se realiza de acuerdo con el tipo de tendido y la finalidad deseada. Así se dispone de:

- Canales para cables.
- Canales para paredes y techos.
- Canales para rodapiés.
- Canales para montaje de aparatos en repisas y antetechos.
- Sistemas de montaje bajo el piso.

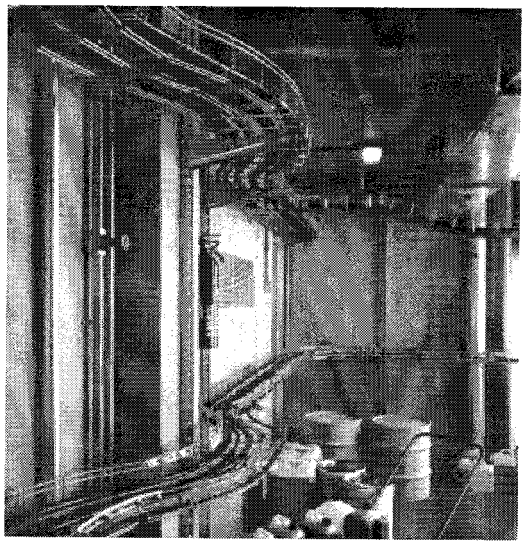
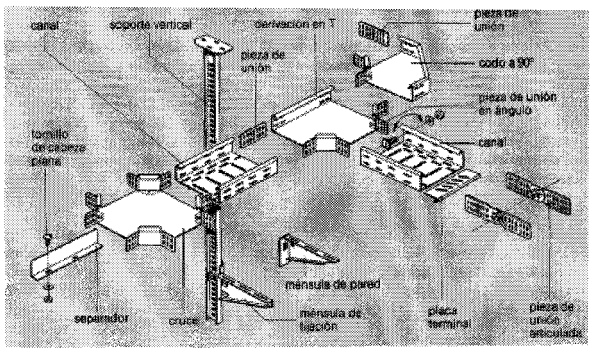


Figura 5. Canal para cables.

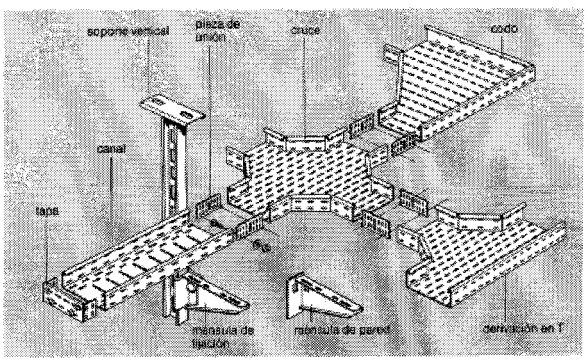
3.1.- Canales para cables.

Las instalaciones eléctricas en grandes edificios y en la industria sufren con frecuencia variaciones, que obligan a replantear el tendido de los cables o la sustitución de éstos, por lo que lo más cómodo y económico será tenderlos en canales (consolas, chapa plegada, rejilla y trazas para cables de acero galvanizado o plástico). Los canales se montan casi siempre en huecos, bajo el techo en pasillos o en falsos techos. Por lo general, el montaje de los cables se limita a disponerlos sobre los canales, siendo necesario fijarlos solo en los tramos verticales, lo que se efectuará con abrazaderas de cinta propias del sistema. La abrazadera de cinta está fabricada de tal forma que puede ser colocada en cualquier punto arbitrario del canal. Los canales pueden fijarse a traviesas dispuestas en la pared o suspenderse mediante soportes adecuados del techo.



a) ejecución ligera

Están estructurados según un principio modular y consisten de chapa plegada, uniones y accesorios. Para los cambios de dirección se utilizan angulares, piezas en T y piezas de cruce. El montaje de los distintos elementos se efectúa con tornillos o por enchufe a través de uniones. Los cambios de dirección a distintos planos se efectúan con piezas articuladas. Mediante separadores pueden tenderse líneas de distintos tipos de corriente por un mismo canal, y los frentes abiertos se cubren mediante tapas apropiadas (figuras 6a y 6b).



b) ejecución pesada

Figura 6. Canal para cables y accesorios.

3.2.- Canales de conducción de cables para paredes y techos.

Los canales de PVC duro a prueba de golpes, o de chapa de acero, así como de combinaciones de acero y plástico, sirven para el tendido de cables de corriente de alta y baja intensidad por paredes y techos. Por su sencillo diseño y su montaje económico permiten replantear los trazados y sustituir o aumentar el número de cables sin problemas.

Existen canales:

- Con separadores ya soldados de profundidad normal (figura 8);
- Con grapas dispuestas con posterioridad, en ejecución plana (figura 9).

Los canales con separadores soldados se utilizan principalmente, por su mayor rigidez, para montaje en el techo y en recintos comerciales o industriales.

Los canales con grapas, en ejecución plana, se utilizan sobre todo para montajes en la pared en viviendas privadas unifamiliares, oficinas, laboratorios o en talleres. Se fijan mediante tacos en paredes y techos.

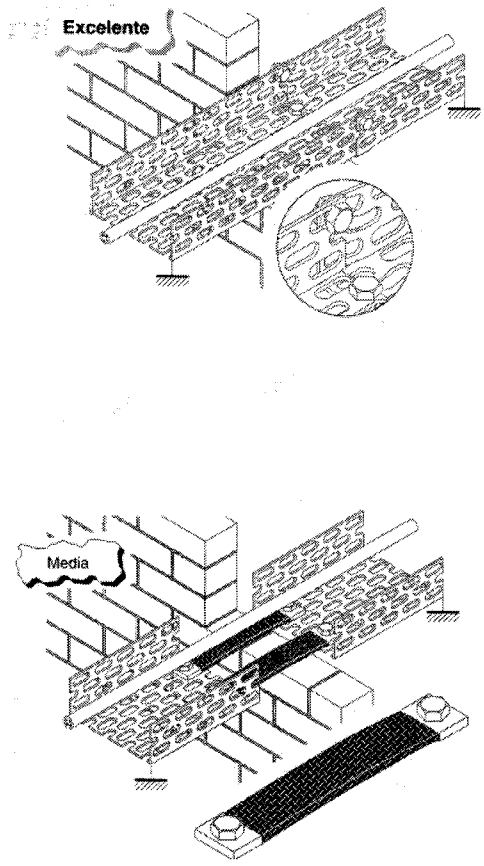


Figura 7. Disposición de canales al atravesar un muro.

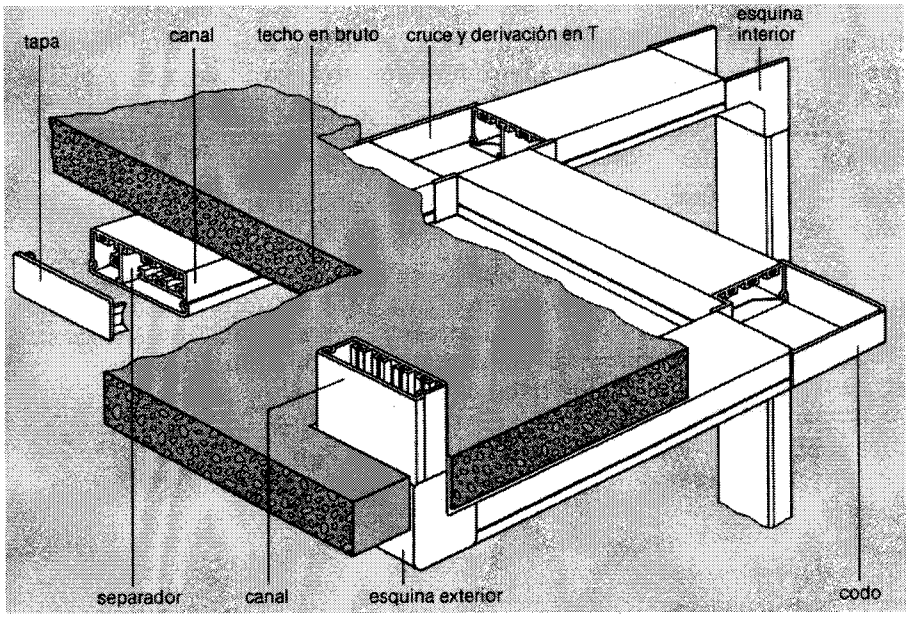


Figura 8. Componentes de un canal con separadores soldados, utilizado principalmente para montaje en techo.

Los canales con separadores soldados constan de una base y una parte superior que se fija a presión. Los separadores fijos proporcionan a los canales la rigidez de un tubo rectangular. Para el tendido, según las normas, de cables de corriente de alta intensidad y de cables de telecomunicación pueden insertarse distintos separadores en los canales.

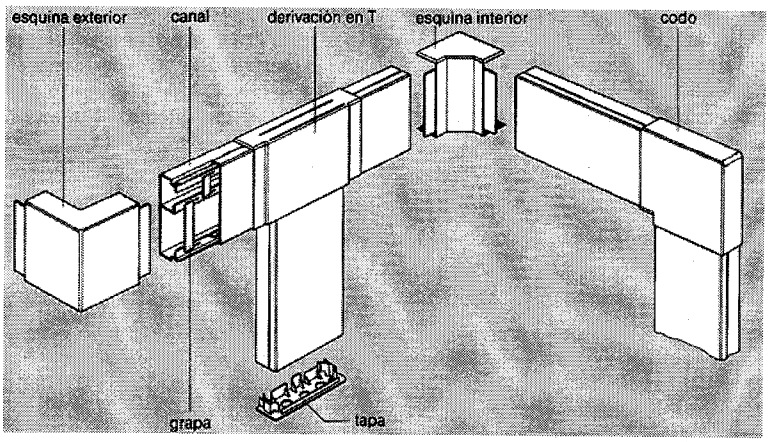


Figura 9. Componentes de un canal (ejecución plana) con grapas, utilizado para montaje en la pared.

Para los cambios de dirección se dispone en ambos sistemas de piezas moldeadas, tales como esquinas interiores, esquinas exteriores, codos, derivaciones en T y cruces, hechas de poliestireno. Tapas adecuadas para cerrar los extremos de los canales completan el espectro de accesorios correspondientes.

3.3.- Canales para rodapiés.

Para la instalación por separado de cables de corriente de alta intensidad y de cables de telecomunicaciones se utilizan también zócalos en forma de canaletas (figura 10). Se montan en la esquina que forma la pared con el suelo y son apropiados tanto en edificios de nueva construcción como para edificios antiguos y viviendas prefabricadas. Para salvar las aperturas de las puertas se utilizan canaletas de unión.

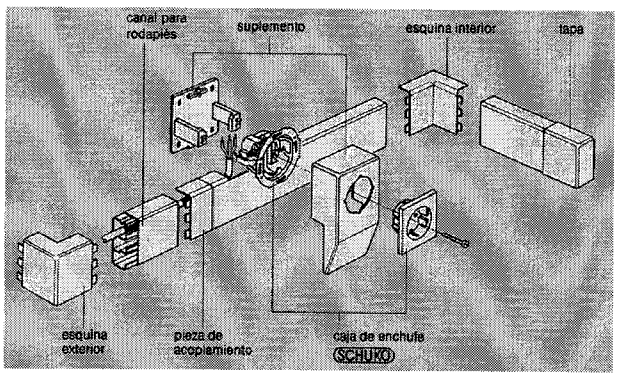


Figura 10. Elementos de un canal para rodapiés con suplemento para montaje de aparatos y accesorios.

Los canales para rodapiés tienen una longitud estándar de 2 m y constan de una base y de una parte superior que se fija a presión. Separadores incorporados en la base dividen el canal en dos o tres sectores. Para unir los distintos tramos se dispone de piezas de acoplamiento. Mediante un suplemento especial puede montarse cualquier aparato en cualquier punto del zócalo.

3.4.- Canales para repisas de ventanas.

Los canales para repisas de ventanas (figura 11) sirven para alojar cables y aparatos para la alimentación eléctrica de puestos de trabajo, por ejemplo, en talleres, oficinas, laboratorios y viviendas. Al mismo tiempo pueden disponerse en ellos también los cables y cajas de

enchufe para antenas, teléfono y otros sistemas de comunicación. Principalmente se montan bajo las repisas de las ventanas y en paredes lisas.

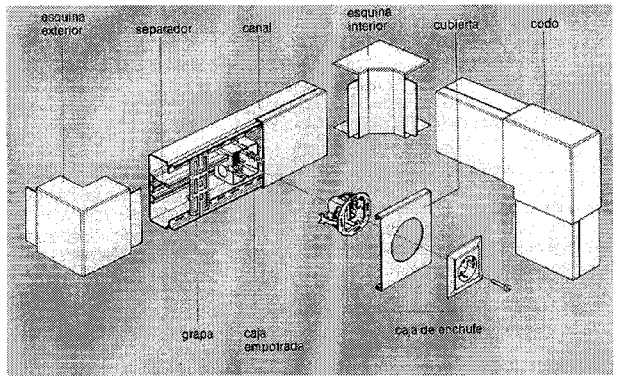


Figura 11. Elementos de un canal para repisas de ventanas, apto para incorporación de aparatos.

Los canales constan de bases abiertas en U con grapas y cubiertas montadas a presión. Las grapas incrementan la rigidez de los canales. Su longitud puede adaptarse rompiéndolas por un extremo fijando así los cables para que no se salgan de las cámaras en las que se han tendido. El montaje de aparatos se realiza mediante una caja empotrada, que se fija en la ranura central del canal. Las cubiertas pueden taladrarse posteriormente para adaptarlas a los distintos aparatos.

3.5.- Canales para antetechos.

Los canales para antetechos (figura 12) se utilizan, al igual que los canales para las repisas de las ventanas, principalmente en edificios de administración, escuelas, talleres y centros de formación, laboratorios y recintos análogos. Se montan preferentemente bajo la repisa de la ventana en el área del antetecho, lo que se consigue por la posibilidad de fijar la cubierta desde la parte frontal. En los canales para los antetechos se tienden cables para corrientes de alta intensidad, cables de telecomunicación y de transmisión de datos, y pueden montarse también los aparatos necesarios.

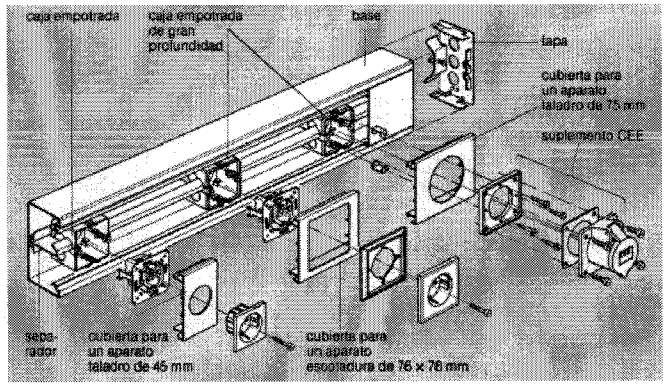


Figura 12. Elementos de un canal para antetechos.

Los canales para antetechos constan de base, cubierta y suplemento para aparatos. Sobre el fondo de la base se encuentran raíles para alojar cajas empotradas, separadores, grapas y aparatos de montaje fijados a presión. Las cubiertas de los canales, opcionalmente de PVC duro o aluminio, se fijan a presión sobre las bases y evitan la entrada de suciedad en el espacio interior. Si los canales tienen las mismas dimensiones pueden intercambiarse las cubiertas correspondientes.

3.6.- Revestimiento de antetechos.

Los revestimientos de antetechos (figura 13) surgen de la combinación de canales para antetechos y laminillas de cubierta. Para ello se disponen los canales delante de los pilares, sobre radiadores o aparatos de climatización, fijándose a la pared mediante ménsulas separadoras de aluminio metálico o chapa de acero, dispuestas entre los pilares.

Los espacios huecos que quedan entre la pared y el canal, así como entre el canal y el suelo se cubren con laminillas de aluminio anodizado. Para facilitar el montaje, las ménsulas distanciadoras disponen de alojamientos especiales que permiten insertar las laminillas de forma sencilla. Por motivos de resistencia mecánica, la distancia entre ménsulas no debería ser mayor de 1 m.

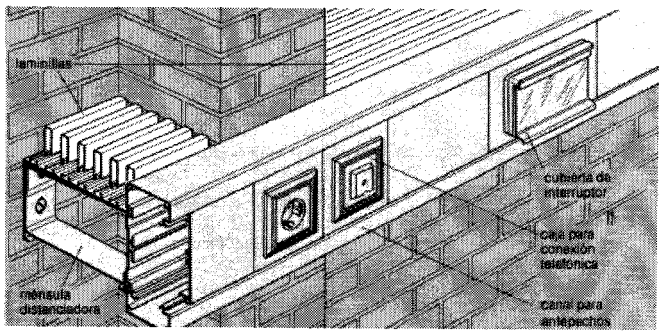


Figura 13. Revestimiento de antetechos entre la pared y el canal.

3.7.- Sistema de montaje bajo el piso.

Las nuevas técnicas de construcción de grandes edificios, que llevan a múltiples concepciones de áreas funcionales, se ejecutan hoy en día preponderantemente mediante un sistema de alimentación bajo el piso que permite materializar las más variables disposiciones electrotécnicas y adaptarlas fácilmente.

Debido a los diferentes tipos de suelo se desarrollaron y ampliaron precisamente en los últimos años dichos sistemas de alimentación.

Se distinguen 6 sistemas, que se describen a continuación. Todos ellos permiten el tendido de cables de corrientes de alta intensidad, cables de telecomunicación y de transmisión de datos, por el suelo. Para ello, los puntos de conexión se disponen preferentemente en forma de retícula, de modo que con los muebles situados en cualquier posición o para distintas distribuciones de los recintos, siempre queden los dispositivos de enchufe de los distintos sistemas de alimentación en la proximidad inmediata de un puesto de trabajo. Sólo una instalación bajo el piso correctamente dimensionada, incrementa el valor de utilización de un edificio y mejora, sobre todo, el empleo económico de los equipos de comunicación.

- **Instalación bajo el piso con canales empotrados en el pavimento y canales de alimentación al ras del suelo:**

Este tipo de instalación (figura 15) sirve para el abastecimiento de energía eléctrica de puestos de trabajo de gran versatilidad y elevadas exigencias en oficinas de gran superficie, para grupos o individuales. Los suelos en bruto se dotan de redes de canales (adaptadas a la disposición de los muebles o, de modo general, en retículos comprendidos entre 1,2 x 1,2 m y 1,8 x 1,8 m), que consisten en canales de alimentación y canales para empotrar en el pavimento, así como cajas empotradas universales de altura variable y accesorios. Las cajas pueden utilizarse con tapas de cierre (caja de tracción), con suplementos de montaje para cajas con conexión superpuesta o con

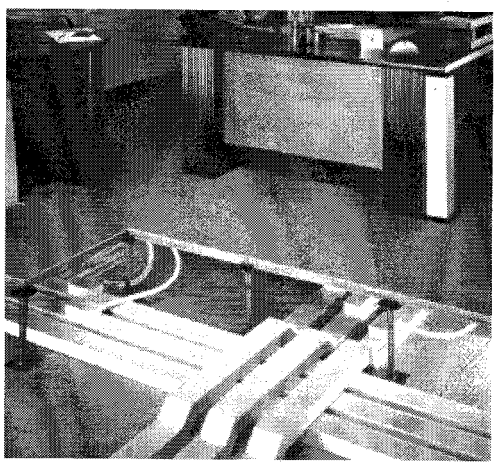


Figura 14. Instalación bajo el piso.

conexiones empotradas universales para cajas con conexión empotrada. Según los aparatos de conexión empotrados o superpuestos necesarios, deben considerarse en primer término la estructura del suelo y su grosor.

Con bajo coste pueden efectuarse modificaciones en cualquier lugar arbitrario de los canales empotrados en el pavimento, efectuando el correspondiente taladro y montando la salida adicionalmente necesaria.

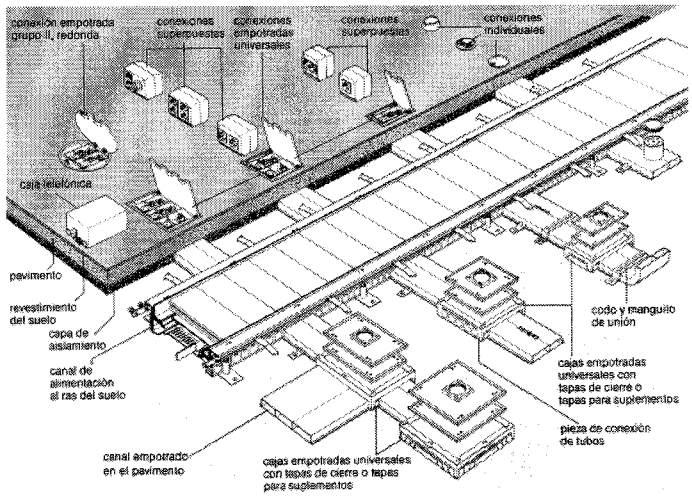


Figura 15. Instalación bajo el piso con canales empotrados en el pavimento y canales de alimentación al ras del suelo.

- **Instalación bajo el piso con canal al ras del suelo y tapas de cierre desmontables:**

Si para el embebido de canales no se dispone de un espesor mínimo del suelo de 55 mm, se recomienda la utilización de este sistema (figura 16). Su altura puede regularse nivelando los perfiles laterales con el nivel del pavimento, de forma que prácticamente la totalidad del grosor del suelo se aprovecha para el tendido de cables. Además, puede accederse rápidamente al interior de los canales abriendo las tapas de cierre en toda su longitud, para un tendido cómodo de los cables. El relativamente pequeño espesor del suelo de 40 mm permite únicamente utilizar suplementos superpuestos y marcos de montaje para cajas telefónicas. Para los cambios de dirección y los cruces se dispone de piezas moldeadas adecuadas. Las exigencias de amortiguación del ruido causado por las pisadas pueden satisfacerse utilizando revestimientos comerciales de espesores adecuados y buenas características amortiguadoras.

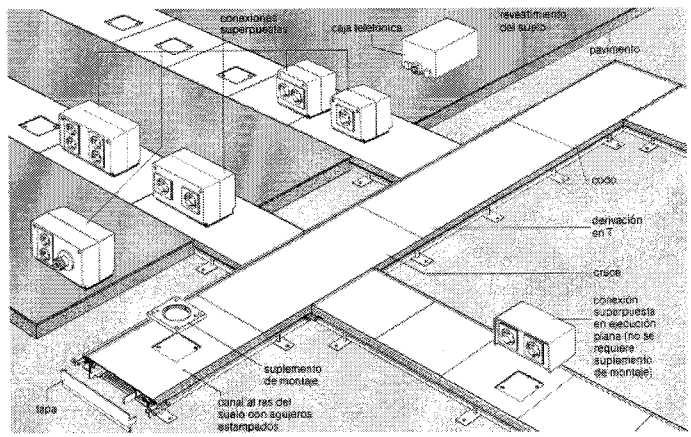


Figura 16. Instalación bajo el piso con canales al ras del suelo y tapas de cierre desmontables.

- **Instalación bajo el piso con canales cerrados al ras del suelo:**

Para reducidos espesores de suelo, a partir de 40 mm, puede también utilizarse el sistema económico de canales cerrados de chapa de acero, al ras del suelo (figura 17). Para aprovechar la totalidad del espesor para el tendido de cables, la altura del canal equivale aproximadamente al espesor total del suelo. Esto requiere la nivelación de la superficie del canal al ras del pavimento.

Tapas con agujeros estampados permiten también el montaje económico de todos los accesorios. Las cajas empotradas pueden utilizarse como cajas intermedias de tendido, codos, derivaciones y cruces. La amortiguación de los ruidos de pisadas se consigue satisfactoriamente empleando revestimientos comerciales.

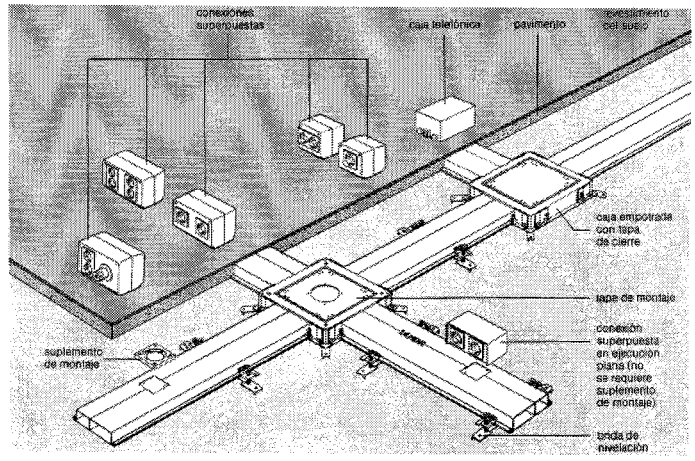


Figura 17. Instalación bajo el piso con canales cerrados al ras del suelo.

- **Instalación bajo el piso con cajas empotradas en el hormigón:**

Si los espesores del pavimento no son suficientes para un montaje flexible de los sistemas de alimentación bajo el piso con canales empotrados en el pavimento, puede elegirse un sistema que se embebe directamente en la losa de hormigón (figura 18). Para este fin se dispone de cajas de diseño especial, que se montan en el encofrado quedando embebidas en el hormigón bruto.

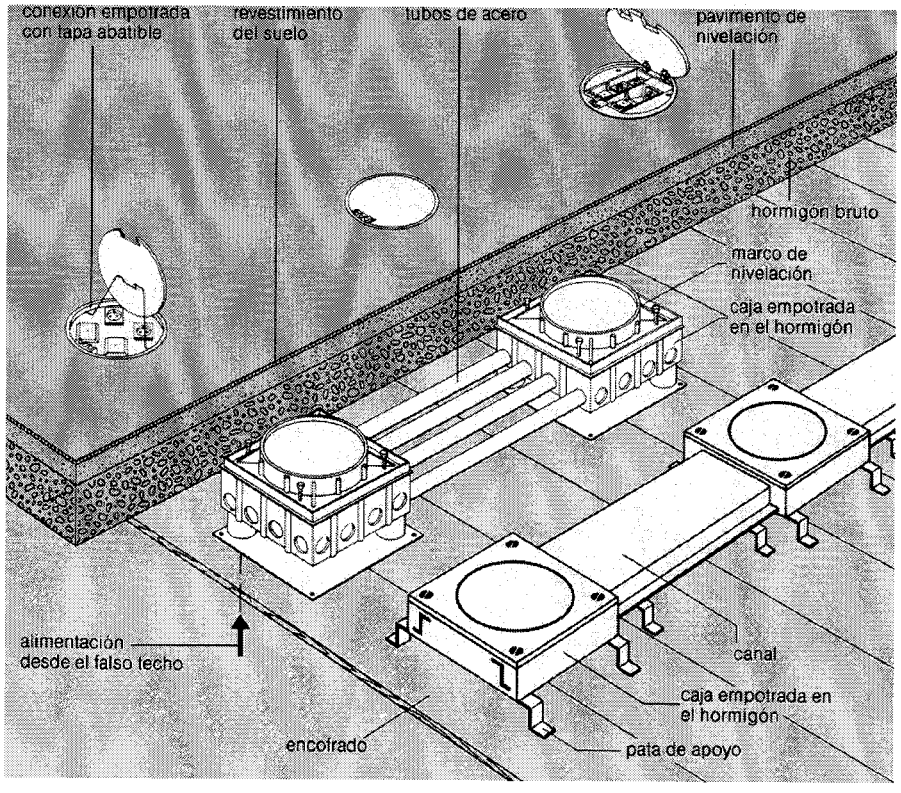


Figura 18. Instalación bajo el piso con cajas empotradas en el hormigón.

- **Instalación bajo el piso con penetraciones:**

Este sistema (figura 19) se monta en suelos de hormigón bruto dotado de agujeros o se empotra directamente en el suelo de hormigón bruto. Por su constitución, la alimentación se toma del falso techo que queda por debajo, llevándola a las cajas a través de las penetraciones y, de este modo, a los aparatos empotrados de conexión. Desde las distribuciones de planta se llevan los cables primeramente a través de canales situados en el falso techo, conduciéndolos luego a las distintas penetraciones.

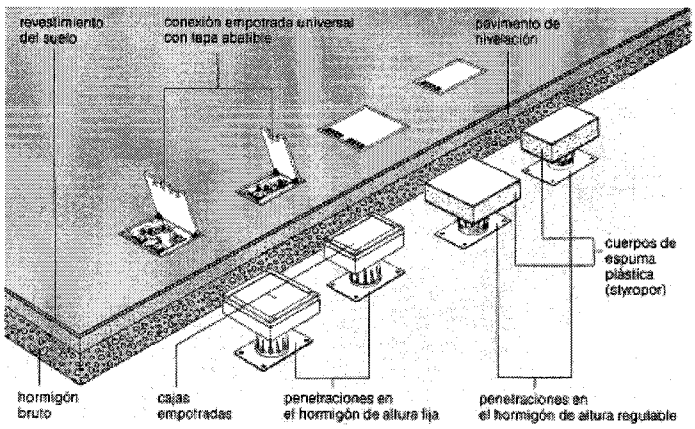


Figura 19. Instalación bajo el piso con penetraciones.

- **Instalación bajo el piso con aparatos de conexión para falsos suelos:**

La instalación en falsos suelos con aparatos de conexión bajo el suelo (figura 20) permite una flexibilidad en las conexiones especialmente alta. Modificaciones y ampliaciones posteriores son posibles sin gran coste, intercambiando las losetas del suelo. Dadas las dimensiones de las losetas de 500 ó 600 mm se consigue un retículo relativamente pequeño,

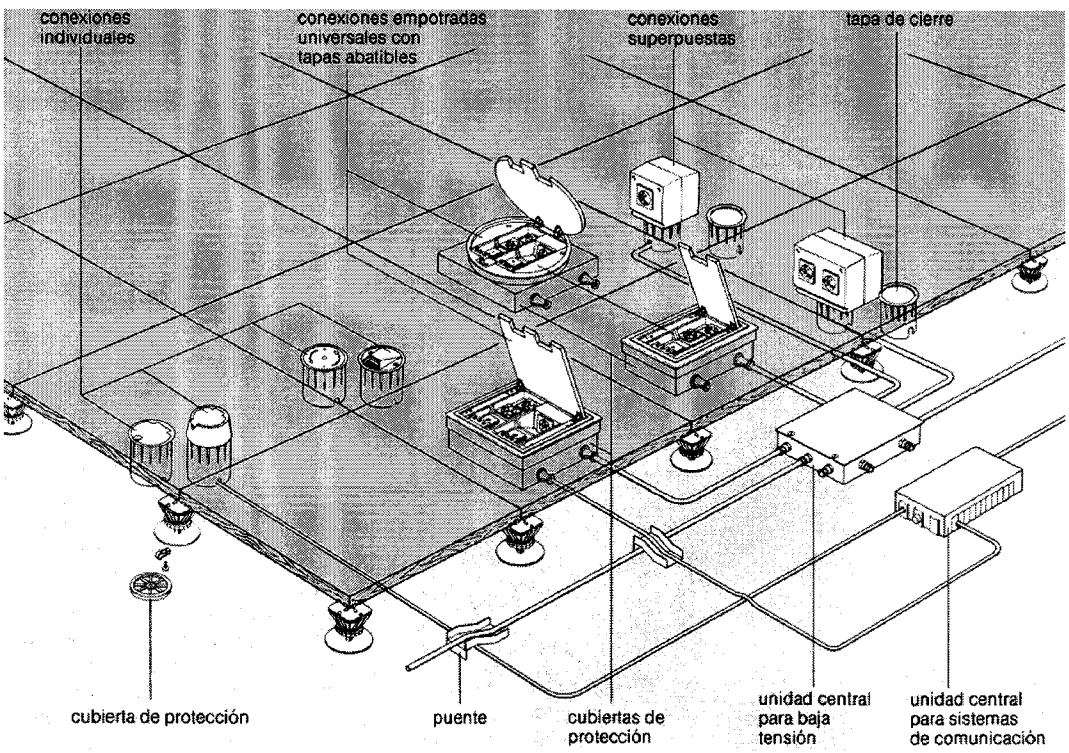


Figura 20. Instalación bajo el piso con aparatos de conexión para falsos suelos.

mediante el que pueden disponerse los aparatos de conexión a los distintos puestos de trabajo de forma óptima. Con cinco losetas prefabricadas y un gran espectro de productos pueden cubrirse todo tipo de deseos.

El espacio hueco del falso suelo se utiliza para el tendido de los cables. Desde la distribución se alimentan las unidades centrales de la red de baja tensión y telefónica. Los aparatos de conexión empotrados o superpuestos se abastecen desde las unidades centrales mediante cables flexibles.

4.- DISTRIBUCIÓN POR BARRAS.

Las distribuciones por barras (figura 21) con salidas variables se emplean para el abastecimiento de energía a máquinas de ubicación variable, por ejemplo, por cambios en el programa de fabricación. Las barras blindadas se montan en las naves de forma fija en paralelo a las hileras de máquinas. Las conexiones de las máquinas se efectúan por medio de cajas de salida dispuesta sobre estas barras.

A continuación se exponen un resumen de los distintos tipos de canalizaciones de conductores:

- Instalación en conductos:
  - En tubos empotrados en paredes aislantes.
  - En tubo sobre la pared.
  - En perfiles sobre la pared.
  - Conductos empotrados en una pared.

- Instalación al aire:
  - Fijados sobre la pared.
  - Fijados en el techo.
  - En bandeja no perforada.
  - En bandeja perforada.
  - Sobre reprisas.
  - Fijadas por collarines.
  - Sobre escaleras.
  - Suspendidas en un cable autoportador.

- Instalación en huecos de construcción:
  - En huecos de construcción.
  - Conductos en huecos de construcción.
  - Conductos perfilados en huecos de construcción.
  - Conductos perfilados embebidos en obra de fábrica.
  - En falsos techos o techos suspendidos.

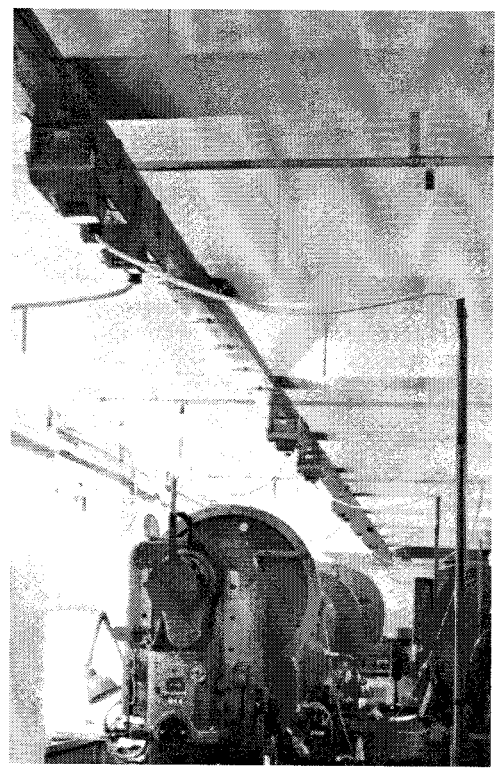


Figura 21. Distribución por barras.

- Instalación en canaletas:
  - Canaletas fijadas a la pared en recorrido horizontal.
  - Canaletas fijadas a la pared en recorrido vertical.
  - Canaletas empotradas en el suelo.
  - Canaletas suspendidas.

- Instalación en canales:
  - En tubos o cables multi en canales cerrados.
  - En tubos, en canales ventilados.
  - En canales abiertos o ventilados.

- Empotramiento directo:
  - En paredes térmicamente aisladas.
  - En paredes sin protección mecánica complementaria.
  - En paredes con protección mecánica complementaria.

- Instalación enterrada:
  - En conducto o conductos perfilados.
  - Enterrados sin protección complementaria.
  - Enterrados con protección complementaria.

- Molduras:
  - En molduras.
  - En zócalos acanalados.
  - En conductos.
  - Dentro de los marcos de las puertas.
  - Dentro de los marcos de las ventanas.

TEMA 19. CENTROS DE TRANSFORMACIÓN DE MEDIA A BAJA TENSIÓN

1.- DEFINICIÓN DE CENTRO DE TRANSFORMACIÓN (C.T.) Y FUNCIONES QUE DESEMPEÑA.

Se entiende por centro de transformación al conjunto de aparatos, máquinas y circuitos que tienen como misión modificar los parámetros de la potencia eléctrica (tensión y corriente) y de proporcionar un medio de interconexión entre diferentes puntos de un sistema eléctrico de potencia.

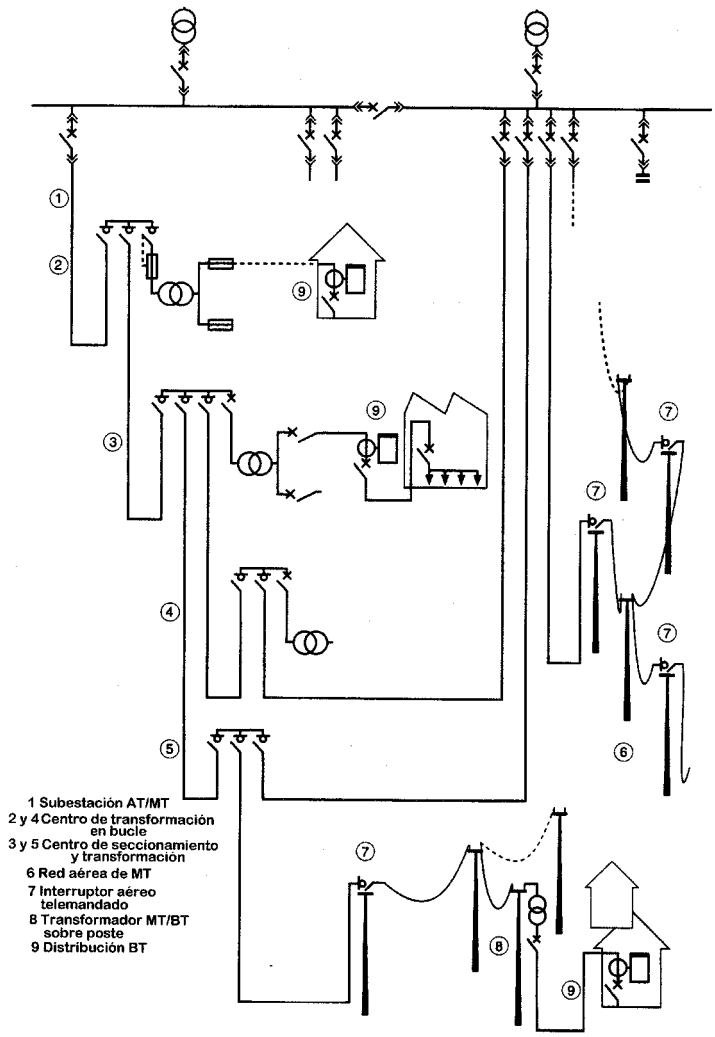


Figura 1. Esquema de distribución en un sistema eléctrico de potencia.

Cuando la transformación tiene lugar desde media tensión (20, 11 kV) hasta baja tensión (380, 220, 125 V), se les denomina "Centros de Transformación (CC.TT.)". En algunas aplicaciones industriales se trabaja con tensiones secundarias de 3 ó 6 kV.

Como se dicen en el Reglamento de A.T. el objeto del mismo es establecer las condiciones y garantías técnicas a que han de someterse las instalaciones eléctricas de más de 1.000 V para:

- Proteger las personas y la integridad funcional de los bienes que pueden resultar afectados por las mismas instalaciones.
- Conseguir la necesaria regularidad en los suministros de energía eléctrica.
- Establecer la normalización precisa para reducir la extensa tipificación que existe en la fabricación de material eléctrico.
- La óptima utilización de las inversiones a fin de facilitar, desde el proyecto la posibilidad de adaptarlos a futuros aumentos de carga racionalmente provistos.

El mismo Reglamento en su artículo 3, clasifica las instalaciones eléctricas en tres categorías:

- Primera categoría: Las de tensión nominal superior a 66 kV.
- Segunda categoría: Las de tensión nominal igual o inferior a 66 kV y superior a 30 kV.
- Tercera categoría: Las de tensión nominal igual o inferior a 30 kV y superior a 1kV.

y en el artículo 7 se señala que los materiales, aparatos, máquinas, conjuntos y subconjuntos integrados en los circuitos de las instalaciones eléctricas de más de 1 kV cumplirán las normas, especificaciones técnicas y homologaciones que les sean de aplicación y que establece como de obligado cumplimiento el Ministerio de Industria y Energía.

A efectos profesionales las Empresas productoras y distribuidoras de energía eléctrica y los fabricantes de material eléctrico han convenido en seccionar la denominada Alta Tensión, o sea, según el Reglamento una tensión superior a 1 kV en las siguientes parcelas:

- Media Tensión (M.T.): la tensión superior a 1 kV hasta unos 50 kV.
- Alta Tensión (A.T.): la tensión superior a 50 kV hasta 300 kV.
- Muy Alta Tensión (M.A.T.): la tensión superior a 300 kV e inferior a 800 kV.
- Ultra Alta Tensión: tensión igual o superior a 800 kV.

A tenor de esta subdivisión se puede definir el centro de transformación como la instalación de 3ª categoría que mediante unos transformadores reduce la Media Tensión de distribución a la Baja Tensión de utilización en las instalaciones eléctricas de edificios y fábricas.

El estudio y proyecto de una instalación de Baja Tensión con su propio centro de transformación persigue, aparte de la reducción de la tensión, un doble objetivo:

- garantizar al utilizador una instalación eléctrica óptima, cuya explotación responde a sus necesidades;
- respetar las Normas y Reglamentos en vigor.

2.- CLASIFICACIÓN DE LOS CENTROS DE TRANSFORMACIÓN.

A tenor de su localización geográfica los CC.TT. pueden ser:

- rurales;
- suburbanos;
- urbanos;
- industriales.

Los CC.TT. rurales se caracterizan por una escasa densidad de cargas y limitados consumos individuales que en su mayoría corresponden a servicios de alumbrado, aparatos electrodomésticos y pequeños talleres.

Los CC.TT. suburbanos atienden cargas de densidad media y consumos bastante variables según la índole de las pequeñas y medianas industrias que se tengan en la zona.

Los CC.TT. urbanos, en su mayoría de las empresas suministradoras de energía eléctrica, son los que alimentan las redes de distribución en B.T. de las ciudades para atender los servicios de fuerza y alumbrado.

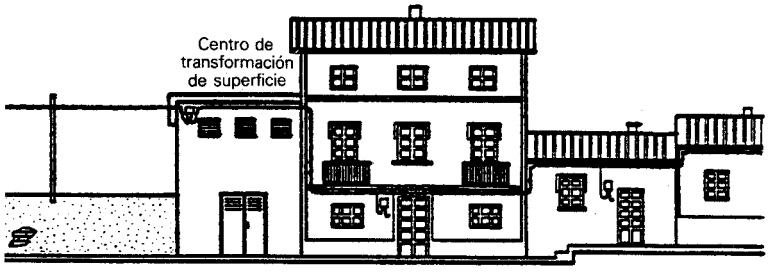


Figura 2. Centro de transformación de superficie.

Los CC.TT. industriales son los que atienden el consumo principalmente de fuerza, de las fábricas e industrias.

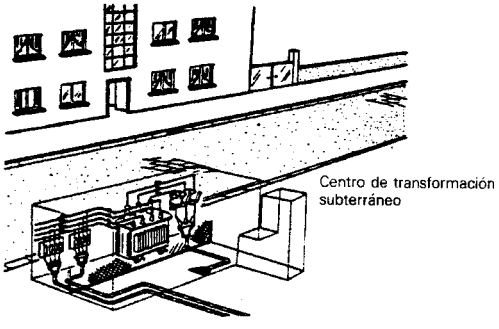


Figura 3. Centro de transformación subterráneo.

Por su emplazamiento los CC.TT. pueden ser:

- A la intemperie:
  - sobre postes;
  - bajo envolvente prefabricada. Prácticamente hoy en día se han dejado de construir de mampostería.
- Interiores.

Por su disposición constructiva pueden ser:

- abiertos;
- con celdas metálicas prefabricas;
- compactos.

En cuanto a su alimentación, la conexión de un centro de transformación a la red de M.T. que debe suministrar la energía eléctrica puede ser:

- **a) Centros de transformación de punta:**

Son aquellos que se encuentran al final de una red radial, existiendo en la misma otros CC.TT. (figuras 4 y 5). La alimentación en antena es la normalmente empleada en la distribución rural. Desde una subestación reductora de A.T. a M.T. parte una ó varias líneas aéreas de decenas de kilómetros de longitud a la que se van conectando directamente a lo largo de la misma centros de transformación, en general, sobre postes de madera, metálicos o de hormigón armado, o se derivan otras líneas sobre la que se conectan los C.T..

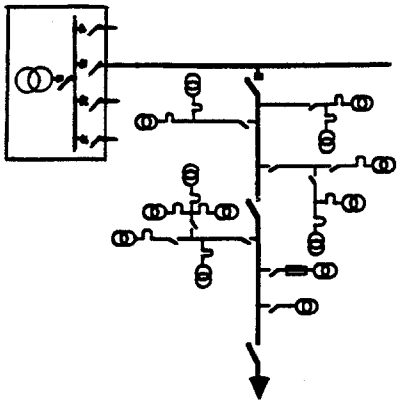


Figura 4. Centro de transformación en punta.

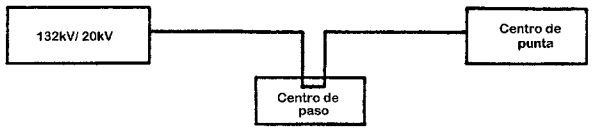


Figura 5. Centro de transformación en punta.

- **b) Centros de transformación de paso:**

Se encuentran situados en la parte intermedia de una red radial y disponen por lo tanto de una entrada y una salida de la línea de alimentación (figura 5).

- **c) Centros de transformación en anillo:**

Están situados en una red de alimentación en lazo cerrado (figuras 6, 7, 8 y 9) y disponen de una entrada y de una salida. La alimentación en anillo a partir de 2 interruptores de salida de la subestación reductora es la utilizada en las poblaciones con red de distribución de M.T. enterrada. En cada C.T. tenemos dos interruptores de M.T., uno de entrada de la línea trifásica y otro para la salida de la misma línea trifásica, los cuales están normalmente cerrados.

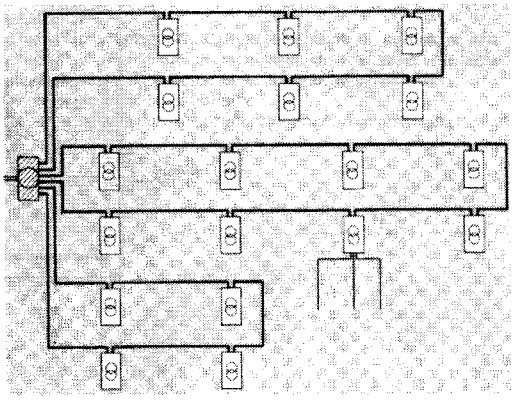


Figura 6. Centros de transformación en anillos múltiples.

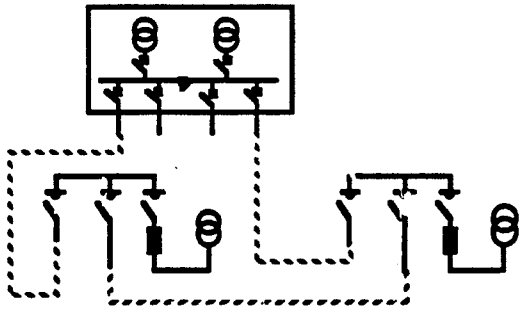


Figura 7. Centros de transformación en anillo.

El cable trifásico de salida va a parar a otro C.T. del cual sale otro cable a un tercer C.T. y así sucesivamente hasta volver a la subestación reductora.

En la explotación, en uno de los CC.TT., en general el intermedio, el interruptor de entrada o el de salida está abierto "ruptura de avería", lo cual determina que una parte de los CC.TT. están alimentados por el cable o arteria, que parte de la subestación y el resto por el cable

de llegada a la subestación de origen, o a otra de igual tensión media de distribución.

La razón de ello es poder reparar cualquier avería en el cable de M.T. entre los CC.TT., sin por ello dejar de alimentar a los mismos. Basta para ello abrir los interruptores extremos del cable averiado, y cerrar el interruptor de "ruptura de antena".

Ello puede motivar como máximo una pérdida del suministro de unos 40 a 60 minutos, los necesarios para localizar el punto de la avería y abrir los dos interruptores de extremos del cable averiado.

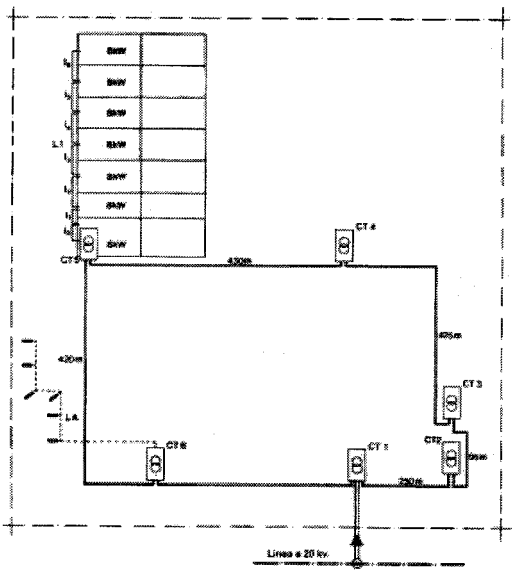


Figura 8. Centros de transformación en anillo.

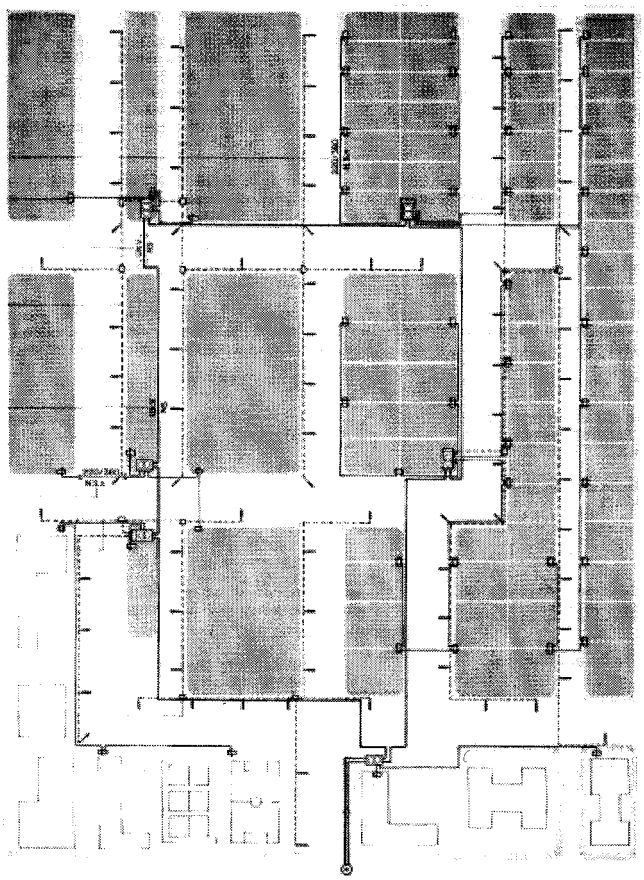


Figura 9. Ejemplo de centros de transformación en anillo.

- **d) Centros de transformación independientes:**

Son CC.TT. que disponen de una sola alimentación y son los únicos existentes en la línea (figura 10).

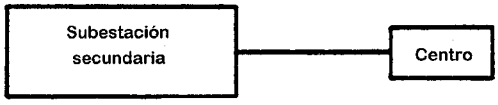


Figura 10. Centros de transformación independientes.

- **e) Centros de transformación en doble derivación:**

Por medio de 2 interruptores enclavados mecánicamente están conectados a Subestaciones reductoras distintas. La alimentación en doble derivación permite alcanzar la máxima seguridad de suministro. La posibilidad de ser alimentado por dos subestaciones, permite que una avería que puede inutilizar una línea de alimentación, o la propia subestación, se solvente pasando la alimentación a la otra subestación lo que permite limitar a unos minutos, o décimas de segundo si se automatizan las conexiones, la falta de suministro.

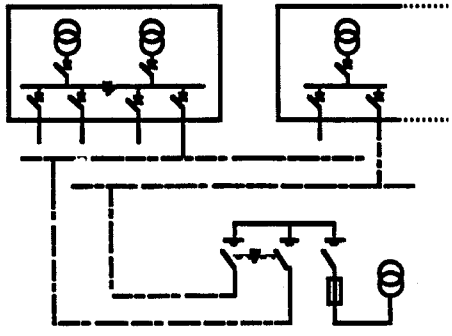


Figura 11. Centros de transformación en doble derivación.

Teniendo en cuenta el punto donde se realice la medida de la energía. Se pueden clasificar en:

- **a) Centro de transformación con medida en media tensión:**

La medida se realiza en la acometida de M.T. del transformador (figura 12).

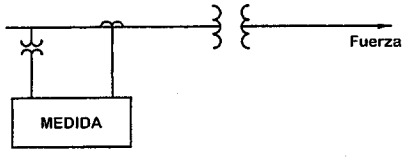


Figura 12. C.T. con medida en media tensión.

- **b) Centros de transformación con medida en media y baja tensión:**

La medida se realiza tal y como se indica en la figura 13.

Se realiza una primera medida en media tensión y una segunda en baja tensión en la línea de alimentación del alumbrado. Aunque actualmente las tarifas de fuerza y alumbrado coinciden, sigue habiendo muchas instalaciones con esta configuración. Las tarifas que se aplican a los dos tipos de medida (media y baja) son diferentes siendo mayor la 2ª, ya que en este caso se tienen en cuenta las pérdidas del transformador.

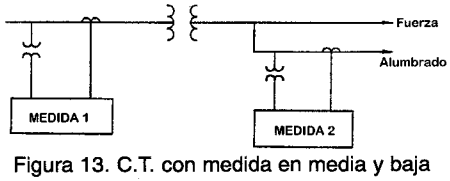


Figura 13. C.T. con medida en media y baja tensión.

- **c) Centros de transformación con medida en baja tensión.**

Se realiza como se indica en la figura 14.

Por último, una distinción, más que una clasificación propiamente dicha, que se puede hacer de los distintos tipos de CC.TT. es atendiendo a quien es el propietario de la instalación, pudiendo distinguirse tres tipos:

- Centros de transformación propiedad del abonado.
- Centros de transformación propiedad del abonado, pero corriendo el mantenimiento a cargo de la compañía suministradora y pasando al cabo del tiempo a ser propiedad de ésta (caso frecuente en urbanizaciones).
- Centros de transformación de la compañía suministradora.

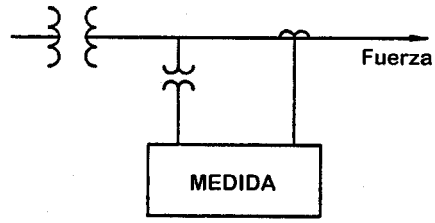


Figura 14. C.T. con medida en baja tensión.

3.- NECESIDAD DEL CENTRO DE TRANSFORMACIÓN.

El aumento de los consumos eléctricos en las viviendas y oficinas comerciales y el elevado número de éstas en las modernas edificaciones conducen a que las potencias instaladas sobrepasen los 50 kVA, potencia que a tenor del artículo 17 del Reglamento de Baja Tensión, es obligado por parte de la propiedad del inmueble, poner a disposición de las empresas distribuidoras un local de medidas y accesos idóneos para instalar en él un C.T.. Si al año de ofrecerse el local la empresa suministradora no ha instalado el C.T. el promotor del edificio recupera la propiedad del local.

El emplazamiento se fijará de común acuerdo entre el solicitante y la empresa distribuidora, teniendo en cuenta consideraciones de orden eléctrico y las necesarias para la explotación y mantenimiento del C.T..

En el caso de que se ubique en edificios para viviendas o industrias no podrá instalarse por debajo del primer sótano.

La alimentación en M.T. y su reducción por un C.T. a B.T. es aconsejable en instalaciones industriales para potencias superiores a 50 kVA:

- para independizarse de otros abonados de B.T.;
- para elegir el régimen de neutro más conveniente, en particular en industrias de fabricación continua, cuya paralización, por deficiencias de aislamiento de la instalación eléctrica, puede suponer millones de pérdidas;
- para beneficiarse de una tarificación más económica, si la facturación de la energía es en M.T.;
- para poder hacer frente a fuertes ampliaciones de la potencia.

En el caso de la tarificación en M.T. debe tenerse presente que el abonado es propietario del C.T. y, por tanto, debe hacerse cargo de su mantenimiento, así como de la conexión a la red de M.T.. El tipo de C.T. y su emplazamiento se elegirán de acuerdo con el distribuidor.

4.- DOCUMENTOS QUE COMPRENDE EL PROYECTO DE UN CENTRO DE TRANSFORMACIÓN.

El proyecto de un centro de transformación, como todos los proyectos de ejecución, contendrá todos los datos necesarios para que la instalación quede definida técnica y económicamente. A este proposito constará de los documentos siguientes:

- Memoria.
- Pliego de condiciones técnicas.
- Presupuesto.
- Planos.

En la memoria se indicará el emplazamiento del C.T., la potencia del C.T., se describirán los elementos componentes y sus características incluyendo los cálculos justificativos, y que se cumplen las normativas de los centros de transformación.

El pliego de condiciones técnicas contendrá la información necesaria para definir los materiales, aparatos y equipos y su correcto montaje, así como las instrucciones que puede dictar la Dirección Facultativa, en la realización del proyecto, ante cualquier eventualidad que pueda surgir en los trabajos, o en los elementos; como por ejemplo:

- Ensayo de materiales.
- Plazos de garantía.
- Obligaciones y responsabilidades del contratista.
- Recepción provisional y definitiva del C.T..
- etc..

El "Presupuesto" deberá constar de:

- Mediciones.
- Presupuestos parciales de los diversos componentes de C.T. a ejecutar.
- Presupuesto general del mismo y resumen del conjunto de presupuestos parciales.
- Planos: deberá incluir:
  - Plano de situación, incluyendo los accesos al C.T..
  - Esquema unifilar del C.T. indicando las características principales de los elementos fundamentales que lo integran.
  - Planos, en planta y alzado, suficientemente amplios a escalas convenientes y con indicación de las cotas esenciales, poniendo de manifiesto el emplazamiento de los elementos fundamentales y conexiones principales.
  - En el caso de preverse futuras ampliaciones deben dibujarse los esquemas y planos correspondientes encerrando esta parte del C.T. en un recuadro de trazos.

Los problemas que tiene que resolver el proyectista en el mismo orden en que son enumerados son:

- Determinar la potencia del C.T..
- Elección del Régimen del Neutro.
- Elaborar el esquema unifilar del C.T. y de la distribución en B.T..
- Elección de las características de los componentes básicos del C.T..
- Compensación de la energía reactiva, si tiene lugar.

5.- ELECCIÓN DEL RÉGIMEN DE NEUTRO Y ESQUEMA DEL C.T..

En el caso de edificios para viviendas y oficinas, el régimen de neutro impuesto por nuestro Reglamento será el TT, (neutro del transformador a tierra y masas de los aparatos de utilización a tierra), pero en el caso de fábricas en las que por lo general el C.T. es propiedad de la empresa, realizándose la tarificación de la energía consumida en M.T., puede que sea más conveniente otro régimen, en particular el régimen IT, (neutro aislado y masas a tierra). En este régimen se tienen dos variantes: Neutro totalmente aislado y Neutro impedante, es decir, unido a tierra a través de una elevada impedancia Zt ($\approx$ 1.500 a 2.000 Ω).

La elección entre uno u otro régimen cuando el utilizador puede hacerlo, será consecuencia de un estudio y concertación con el instalador sobre las exigencias y las posibilidades de mantenimiento de la explotación.

En cuanto al esquema del C.T. tenemos dos variantes:

- Esquema con tarificación en M.T..
- Esquema con tarificación en B.T..

Tanto uno como otro deberán ser lo más simples posibles, lo cual no implica que en algunos casos deban ser objeto de un estudio cuidadoso y exhaustivo para alcanzar la solución más económica como es el caso de los CC.TT. con más de un transformador o de los varios CC.TT. de un gran establecimiento industrial o complejo residencial.

Para definir correctamente un esquema se deberá conocer:

- la potencia del C.T.;
- la posibilidad, a tenor de la curva de carga, de dejar fuera de servicio una parte importante de la potencia en las horas y días no laborables.

Simultáneamente deberán solicitarse a la empresa suministradora los siguientes datos:

- La tensión nominal de la red M.T..
- El nivel de aislamiento.
- La intensidad máxima de cortocircuito trifásico y a tierra.
- Tiempos máximos de desconexión en caso de defectos en M.T..
- El esquema básico del C.T. a tenor de las condiciones de suministro y de la tarificación de la energía eléctrica.
- Cuantos datos sean precisos para la elaboración del proyecto que dependan del funcionamiento de la red.

El esquema de base de un C.T. cuando la tarificación es en B.T. como es el caso de edificios y fábricas de reducido consumo es el que nos muestra la figura 15.

O punto de conexión de la celda a la red de M.T.
D dispositivo de protección M.T.
C contador y medida B.T. ó M.T.
A aparatos de corte M.T. (interruptor-seccionador)
T transformador M.T./B.T.
S dispositivo de seccionamiento de apertura visible

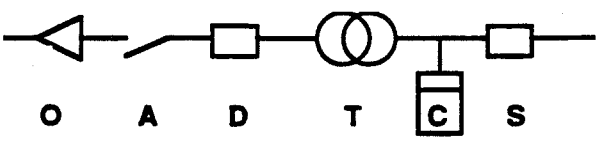


Figura 15. Esquema con facturación en B.T..

En CC.TT. para fábricas y grandes urbanizaciones, la tarificación en B.T. deberá reemplazarse por la tarificación en M.T. cuando:

- El consumo en B.T. exceda los 2.000 A.
- Se van a tener varios transformadores en paralelo, o una fuente autónoma de energía en M.T..
- El C.T. alimenta en M.T. otros CC.TT. satélites o receptores en M.T. (motores).

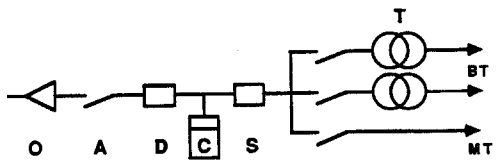


Figura 16. Esquema con facturación en M.T..

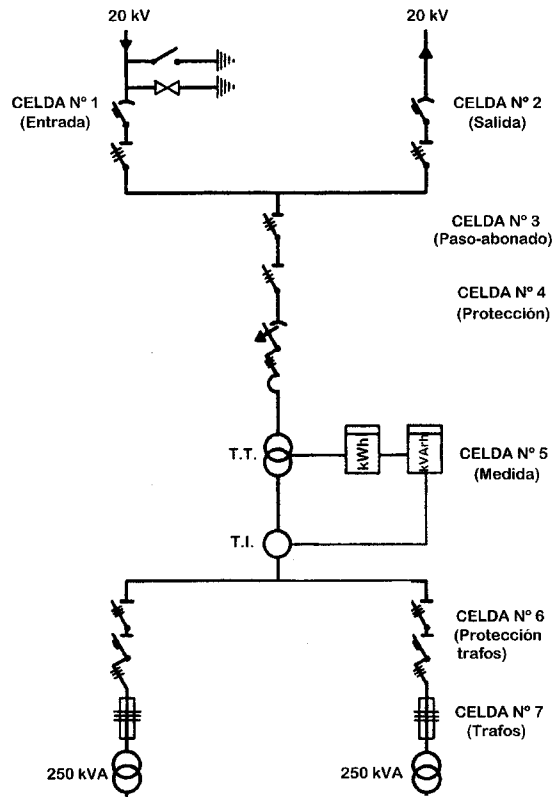


Figura 17. Esquema unifilar de un centro de transformación.

6.- CENTROS DE TRANSFORMACIÓN MÁS USUALES.

6.1.- Centros de transformación a la intemperie.

6.1.1.- Centro de transformación sobre poste simple.

Es muy utilizado, sobre todo en instalaciones de tipo rural y aquellas otras donde no hay previsto un gran consumo de energía (figura 18). La utilización de un poste de la línea, como apoyo para el centro de transformación, hace que éste sea especial en su forma y resistencia, pues debe tener un esfuerzo mayor ya que ha de soportar, no solamente la tracción a la que se ve sometido por ser final de línea, sino también la compresión que le produce el transformador y el aparellaje que ha de ir en él. Es muy utilizada esta disposición por su simpleza y economía y aunque el poste ha de ser diseñado en esfuerzo y herrajes, todos los fabricantes disponen de tipos propios de fabricación normal.

Deben disponer a su vez de un cuadro de B.T., en el cual se instala el equipo de medida principalmente y las protecciones de las líneas de B.T. que de él parten. La unión del transformador con el cuadro se realiza con un conductor aislado para 1 kV, y si la línea o líneas de salida son aéreas, se unirá el cuadro con la cruceta de B.T., que le sirve de soporte, por medio de un conductor igualmente aislado para 1 kV. Las salidas subterráneas se harán por debajo del cuadro bajo tubo protector hasta una arqueta construida junto a la cimentación del poste, de donde partirán las canalizaciones subterráneas.

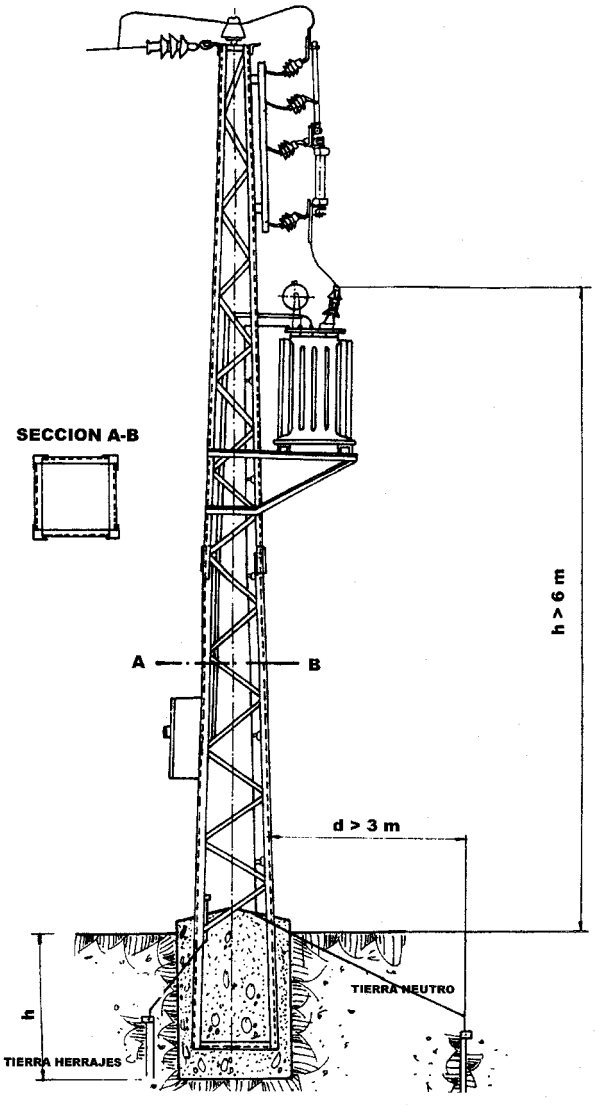


Figura 18. Centro de transformación sobre poste.

El entronque de los conductores de M.T. al poste puede realizarse por el lado contrario al de colocación del transformador, como se indica en la figura 18, o por el mismo lado donde se encuentre éste. En el primer caso, el esfuerzo de los conductores sobre el poste es en parte absorbido, por el momento que crea el transformador y el aparellaje colocados en la cara opuesta, pero obliga a que el paso de los conductores al otro lado del poste, se haga apoyándose en unos aisladores rígidos colocados en la cogolla de éste, para evitar que la curvatura del conductor, al pasar de la grapa del aislador de amarre al terminal de sujeción en el seccionador, pueda dar en él.

En el segundo caso, la entrada de línea de M.T., evita la colocación de aisladores rígidos en la cogolla, por estar todo el aparellaje en el mismo lado del tiro de línea. Esta disposición tiene dos inconvenientes: uno desde el punto de vista del esfuerzo, dado que el momento del aparellaje y transformador se suman al momento del tiro de línea, con lo cual, el esfuerzo resistente del poste ha de ser mayor y otro que ha de ser de una altura superior, pues no podremos llegar con el seccionador hasta la posición marcada en la figura 18.

El seccionador tripolar siempre ha de ser accionado mecánicamente por un estribo. Después del seccionador y colocado debajo de él, van las bases de los fusibles de protección del transformador; a continuación se instala el transformador. Más abajo, a la altura aproximada de 1.50 m, se sitúa el cuadro de protección.

6.1.2.- Centro de transformación en pórtico.

Es de una utilización menos normal, pero se emplea para aquellos casos en los que el transformador sea de una potencia próxima a los 250 kVA.; esta potencia es la máxima para utilizar en este tipo de montaje (figura 19).

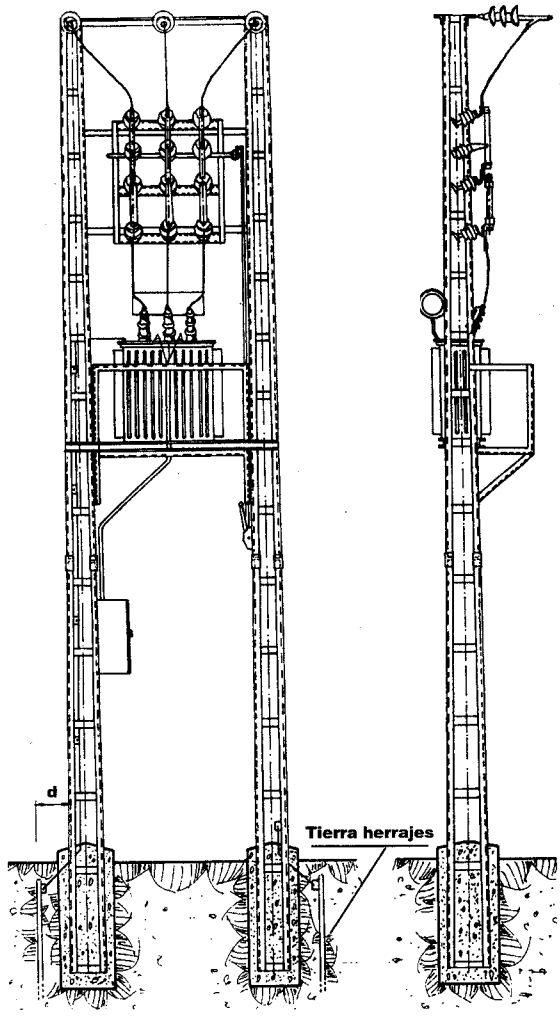


Figura 19. Centro de transformación en pórtico.

El peso de los transformadores ya es bastante importante y por lo tanto crea un momento considerable sobre el apoyo si éste es de un sólo poste. Esta distribución es mucho más resistente, centra la compresión producida por el transformador y el aparellaje entre los dos postes, no creando ningún tipo de momento de vuelco; favorece la colocación, tanto del seccionador como del transformador, por la simpleza de los herrajes a emplear y beneficia el hecho de que se puedan utilizar postes de menor resistencia, pero que, sumados sus esfuerzos, son suficientes para contrarrestar el de los conductores de la línea, que son los únicos que crean momento de vuelco.

El esfuerzo de compresión del aparellaje y transformador, es absorbido por los postes aunque sus características mecánicas no sean importantes. La colocación del cuadro de baja es similar a la descrita anteriormente y el mando del seccionador se hace también a través de una barra de accionamiento con estribo, enclavada en la misma forma que habíamos expresado en el caso anterior.

Se observa en la figura 19, el balconcillo cuya utilización es preceptiva en los centros de transformación intemperie.

La altura mínima al suelo que ha de tener la parte en tensión más inferior de todo el poste es de 6 m. siendo esto preceptivo para cualquier tipo de poste.

Tanto los centros de transformación en pórtico, como los de un sólo poste, han de disponer de una toma de tierra única, que cumpla las condiciones establecidas en el Reglamento sobre Condiciones Técnicas y Garantías de Seguridad en Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación e Instrucciones Técnicas Complementarias MIE RAT. 13, B.O.E. núm. 183 del 1/8/1.984, a la cual han de unirse los herrajes, autoválvulas si las hubiere y el neutro del transformador si la resistencia a tierra obtenida lo permite.

- **Cerramiento de malla metálica:**

Los centros de transformación, cuando se instalan en zonas transitadas, es preceptivo que vayan cercados por una malla de protección o cerramiento, con objeto de evitar el paso al interior de la subestación de personas no conocedoras de ella. Este cerramiento se suele hacer de mallas con angulares metálicos de soporte y cubren la base completa de la subestación.

La malla metálica debe tener una altura mínima de 1.80 m y una separación del suelo de 10 cm máximo. El diámetro del alambre no ha de ser inferior a 2 mm y el hueco entre alambres no ha de ser superior a 25 mm.

La sujeción de la valla metálica se hace con pilotes de perfil normal o tubos anclados al suelo con cimentación de hormigón y debe tener un panel desmontable con objeto de utilizar éste como paso al interior del centro.

- **Cerramiento de obra de fábrica:**

En zonas rurales particulares o previstas para poco tránsito, no es preceptivo el cerramiento. Para la protección del centro de transformación, es suficiente cubrir con obra de fábrica la base del poste como se indica en la figura 20, para evitar que se pueda subir por la celosía hasta la plataforma. Este cerramiento suele ser de una altura de 2 m, está hecho de ladrillos, con el acabado que se desee y normalmente cerrado por arriba para evitar la entrada y acumulación de agua dentro del hueco que forma.

Si el montaje del centro de transformación es sobre dos postes bastará con cubrir de la misma forma la parte baja de cada uno de los postes que forman el pórtico. La altura mínima, como hemos dicho, es de 2 m y para accionar el seccionador o subir a la plataforma ha de ser necesaria la utilización de una escala o cualquier otro procedimiento que no esté fijo en el poste.

Sobre este cerramiento del poste se coloca el cuadro de B.T. que se utiliza para instalar el equipo de medida y para protección y seccionamiento de líneas de salida. Para mayor seguridad se aconseja que la envolvente del cuadro de B.T. sea de material aislante.

Es muy recomendable desde el punto de vista de la seguridad y como medida correctora para aumentar las resistencias, en los casos de tensiones de paso y contacto, construir en la base del poste, una acera de hormigón en masa o grava gruesa y suelta de un ancho de 1 m.

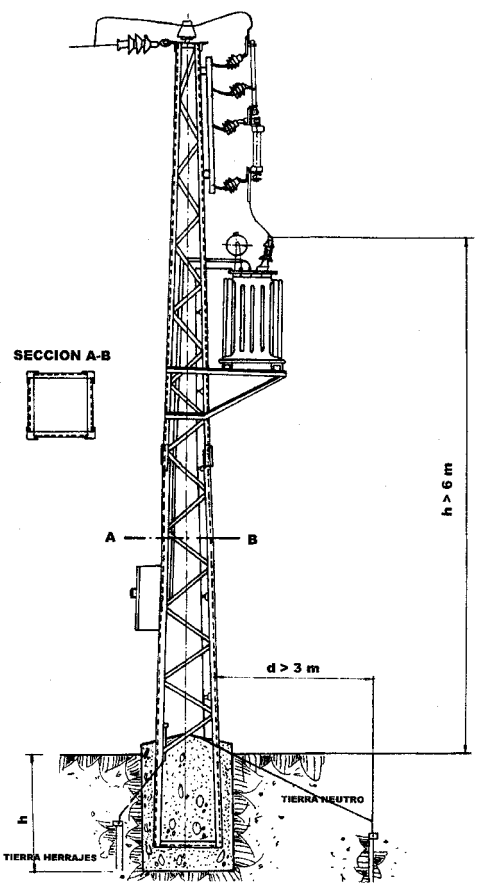


Figura 20. Centro de transformación sobre poste simple.

6.2.- Centros de transformación interiores.

6.2.1.- Centro de transformación interior con entrada aérea.

Si la potencia del transformador a utilizar supera los 250 kVA no se permite su instalación sobre postes como en los casos anteriores; entonces, es preceptiva la construcción de un centro de transformación de obra de fábrica, bien prefabricado o bien realizado "in situ", el cual contendrá todo el sistema de aparellaje necesario en estos centros.

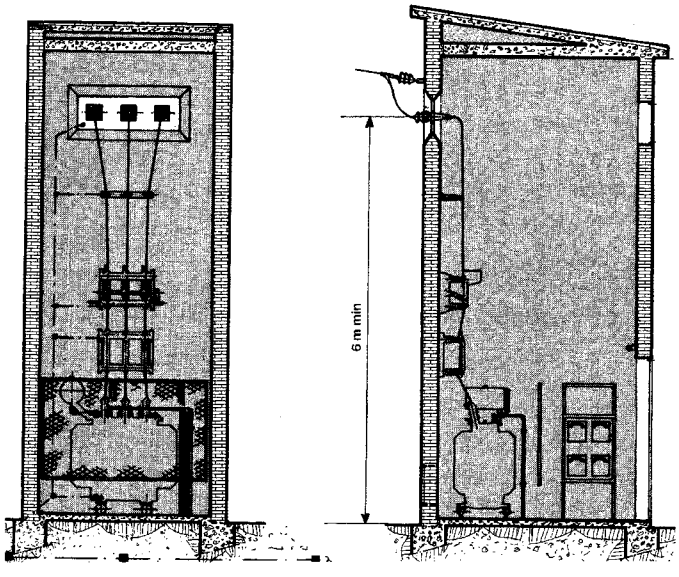


Figura 21. Centro de transformación "in situ" entrada aérea.

El centro de transformación que representamos en las figuras 21 y 22, es de entrada aérea y en la planta del mismo se observa la zona reservada al transformador y aparellaje de M.T. y la reservada al cuadro de B.T. y servicios. Los edificios destinados a estos centros de transformación tienen unas medidas muy estándar dado que, normalmente, la potencia máxima del transformador a utilizar en ellos, es marcada por las respectivas Cías Distribuidoras de la Energía. Las medidas son las del plano a escala y se observa que la entrada de la línea se hace a través de unos pasamuros, pasa después a un seccionador en carga y unos cartuchos fusibles de alto poder de ruptura y de aquí se conecta al transformador.

El interruptor de corte en carga se maniobra a través de un mando por estribo que se sitúa fuera de la malla de protección y los cartuchos fusibles protegen a cada una de las fases contra sobrecarga o cortocircuito, pero no producen ningún disparo conjunto de las tres fases, en el caso de producirse una avería en unas de ellas; se observa en la figura 21 la disposición en alzado y perfil de los diversos aparellajes, no indicándose en ellas la situación del mando por estribo, pero teniendo en cuenta que éste se hace siempre prolongándolo hacia la pared y bajando lo más próximo al muro con objeto de separarlo de las partes en tensión;

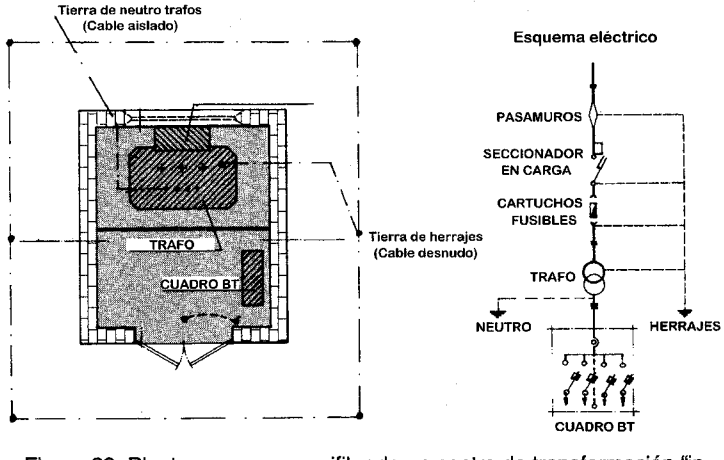


Figura 22. Planta y esquema unifilar de un centro de transformación "in situ" con entrada aérea.

la situación de los fusibles de M.T. se hace a una altura no inferior a 2.50 m, con objeto de lograr que cualquier tipo de transformador que en ella se coloque, pueda entrar sin ningún problema en el interior de la celda.

La instalación del cuadro de B.T. se hace en la parte exterior de la malla. Se han indicado en el esquema cuatro líneas de salidas protegidas cada una de ellas por un seccionador fusible, siendo ésta la forma más normal del cuadro de B.T.. También se instalan un voltímetro con conmutador, 3 amperímetros maxímetros, para control de la intensidad máxima suministrada y una toma de corriente con protección.

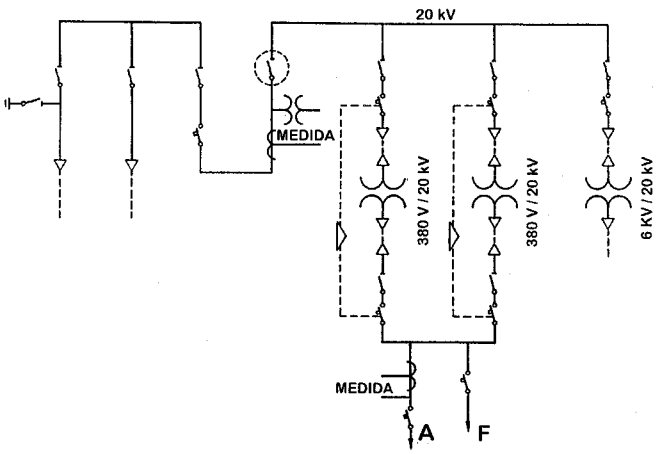


Figura 23. Ejemplo 1 de un esquema unifilar de un C.T. "in situ".

El cerramiento de malla que separa la celda del pasillo, ha de cubrir desde 0.4 a 1.8 m. del suelo, aunque es una práctica muy generalizada llegar por la parte inferior hasta 0'1m. La malla ha de ser metálica de hueco máximo 25 mm y alambre de 2 mm de diámetro mínimo. Se instala normalmente una luz sobre la puerta de entrada con el interruptor en la zona interior para realizar maniobras nocturnas.

La ventilación se produce por el tiro de dos rejillas con cierre en forma de persiana que se observan en la parte inferior (detrás del transformador) y en la parte superior encima de la puerta de acceso al lado contrario de la entrada de líneas en el centro de transformación.

Estos centros de transformación descritos suelen ser de obras de fábrica de mampostería normal y la cubierta a un agua con inclinación suficiente para evacuar el agua de lluvia e impedir que se produzcan humedades en el interior que pueda perjudicar o afectar al aparellaje. En el suelo de la celda del transformador, ha de preverse un sumidero para que el aceite que pueda derramarse de no quede en ésta, sino que pase a un depósito que al efecto se coloca fuera del edificio. La puerta de la subestación ha de ser metálica de ancho suficiente para que permita el paso del transformador y siempre abriendo hacia fuera. Esta disposición es totalmente preceptiva y debe de cuidarse su realización a efectos de seguridad.

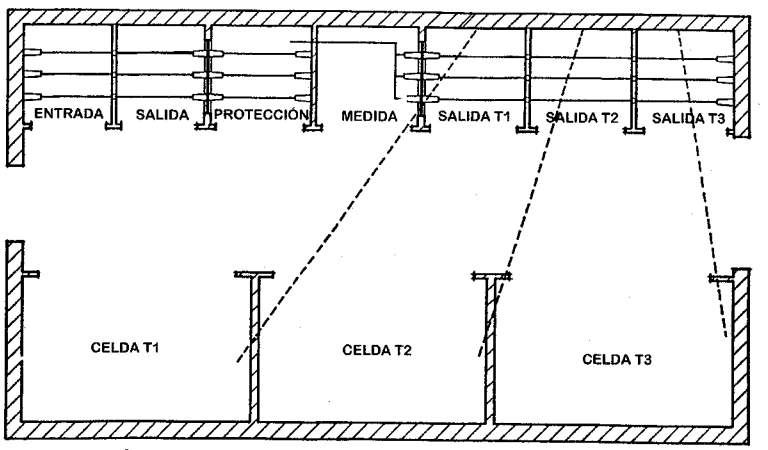


Figura 24. Planta del C.T. ejemplo 1.

Cuando el neutro ha de ir conectado a una tierra diferente figura 22, el cuadro de baja que se conecta a la del herraje, ha de tener los soportes de los seccionadores fusibles y elementos de medida si los tuviere, aislados del chasis por medio de aisladores con rigidez dieléctrica suficiente como para soportar la tensión de contacto resultante.

Las puertas de acceso y las rejillas de ventilación no deben ser conectadas a ninguna de las tomas de tierra del edificio y como medida de seguridad complementaria, es conveniente construir una acera de hormigón en masa o grava gruesa alrededor del centro y colocar en el pasillo entre celdas, una goma con suficiente rigidez dieléctrica para aumentar la resistencia a tierra del conjunto.

6.2.2.- Centro de transformación interior con entrada subterránea.

Se representa en las figuras 25 y 26, un centro de transformación con tres celdas para líneas de M.T., una de entrada, otra de salida y una tercera de reserva. La cuarta celda es la del transformador y en ella figuran, un seccionador tripolar de accionamiento por estribo y apertura en carga, tres bases de fusibles de protección del transformador contra las sobrecargas y cortocircuitos y el propio transformador. La altura de la subestación es muy inferior a la utilizada anteriormente; el aparellaje está más bajo, pero no obstante se debe guardar la distancia mínima de 2.5 m. de las bases de fusibles al suelo para permitir que un transformador de 630 kVA. pueda instalarse en esa celda, o instalar bases y seccionador en una celda independiente.

La entrada y salida de líneas de M.T. se realizan en celdas separadas y van a sendos interruptores de corte en carga. En este caso, los representados son de apertura en carga por inyección de aire, su mando se realiza también por estribo situado en la misma forma y disposición que el interruptor de corte en carga correspondiente al transformador y la entrada de los conductores se hace a través de tres terminales con conos pierde fluidos para evitar en ellos los potenciales importantes que se crean por el corte de la continuidad de la malla de protección del conductor. Las mallas metálicas de los conductores de M.T. han de estar unidas a la tierra de herrajes del C.T..

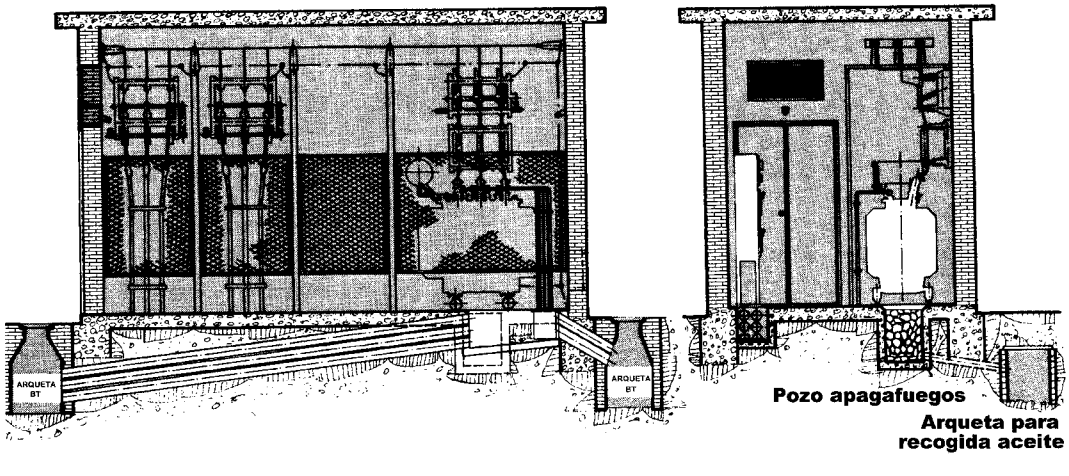


Figura 25. Alzado de un centro de transformación "in situ" con entrada subterránea.

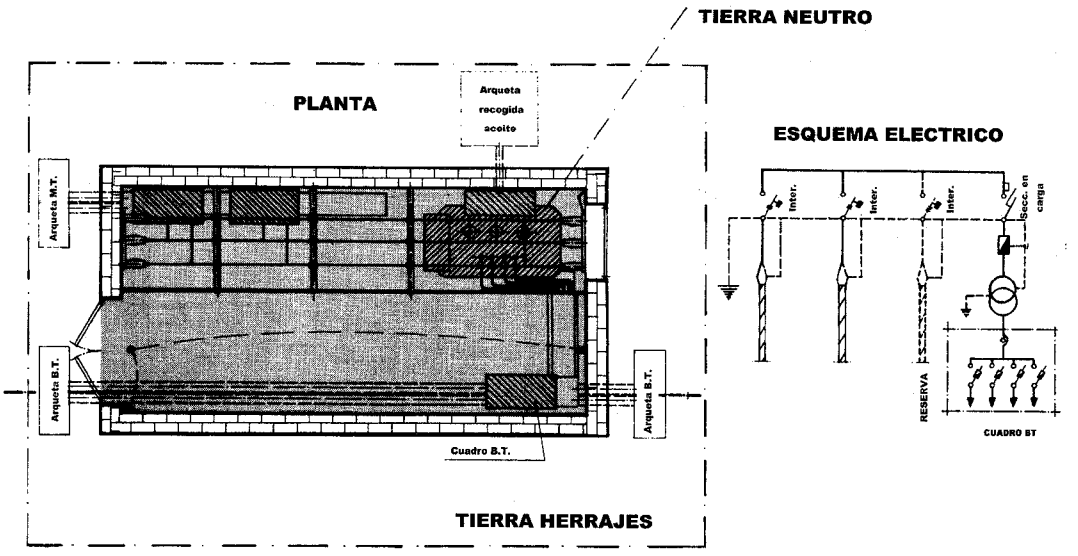


Figura 26. Planta y esquema unifilar de un centro de transformación "in situ" con entrada subterránea.

Las rejillas de ventilación se sitúan normalmente en caras opuestas del edificio y se observa que están, una en la parte baja lateral del transformador y otra en la parte alta de la puerta de entrada. Su posición opuesta refuerza el tiro, para que se produzca con más eficacia la renovación del aire en la totalidad del recinto, facilitando su ventilación y a su vez el enfriamiento del transformador.

Los conductores de B.T. pasan a través de canales construidos en el suelo al cuadro de B.T. situado en la posición que se indica en la figura 26 y se observan las arquetas y canales de cables para los conductores de B.T. y M.T. que entran y salen en el centro de transformación y el pozo apagafuegos con la arqueta de recogida del aceite. Los canales de cables del interior del centro, discurren, los de M.T. por la parte posterior de las celdas de líneas, para facilitar el paso de los conductores a los interruptores en carga y los de Baja Tensión por el pasillo junto al muro exterior, para unir el cuadro de B.T. con la red de distribución.

En el esquema eléctrico se indican los interruptores en carga de M.T. y el interruptor de reserva, el seccionador en carga del transformador, los fusibles de alto poder de ruptura y el transformador así como la salida de B.T.. La puerta ha de ser también metálica y abrir hacia fuera y ser de suficiente tamaño como para permitir el paso de un transformador de 630 kVA al centro de transformación.

Los CC.TT. situados en el interior de edificios de viviendas o servicios, tienen que disponer de las reglamentarias protecciones contra el fuego, tanto para sofocarlo, como para proteger las zonas anejas a él.

La instalación en general de estos CC.TT. se rige por las condiciones que contiene el Reglamento correspondiente mencionado en el Apartado 2.6 y las tomas de tierra, indicadas en la figura 26 y las medidas correctoras para evitar las elevadas tensiones que se puedan originar en ellas a causa de su resistencia, son las mismas indicadas en el apartado anterior para los CC.TT. de entrada aérea.

Se representa en las figuras 27, 28, 29 y 30 un centro de transformación prefabricado, cuya instalación no difiere esencialmente de la descrita, pero que sus celdas son igualmente prefabricadas y montadas en módulos metálicos homologados, quedando un conjunto muy homogéneo y seguro. Los fabricantes de estos módulos indican en sus catálogos la infraestructura que precisan para su montaje, debiéndose de construir, en el exterior, las arquetas, pozo apagafuegos, línea de tierras y acerado reglamentarios. Las celdas prefabricadas pueden ser utilizadas de igual forma en un de transformación construidos "in situ" de obra de fábrica.

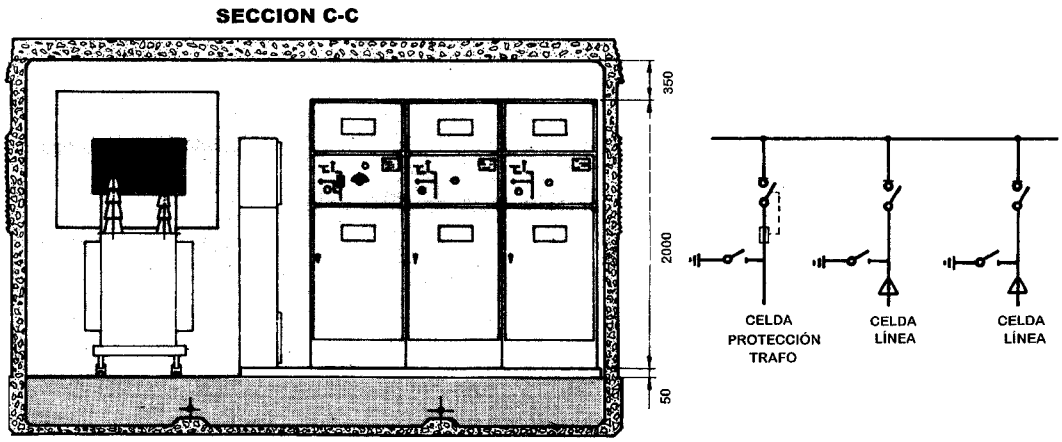


Figura 27. Alzado y esquema unifilar de un centro de transformación prefabricado con entrada subterránea.

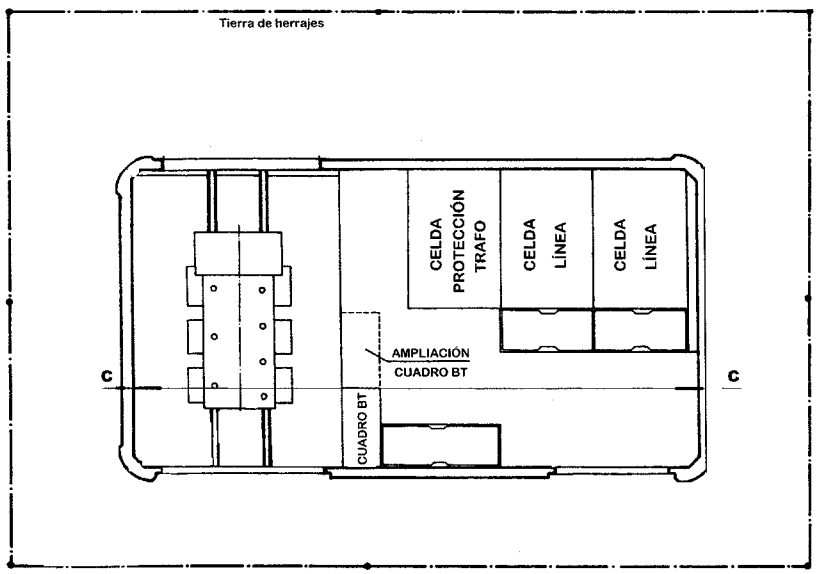


Figura 28. Planta de un centro de transformación prefabricado con entrada subterránea.

Dado que estos centros de transformación se utilizan para suministrar energía a varios usuarios, han de ser propiedad de la Cía. Suministradora ó ser cedidos a ella. Éstas indican en sus Normas las dimensiones de los edificios o locales para ubicarlos, siendo muy similares para todas ellas. No obstante, pueden ser más reducidas, si se justifica por la utilización de aparellajes de nuevas tecnologías.

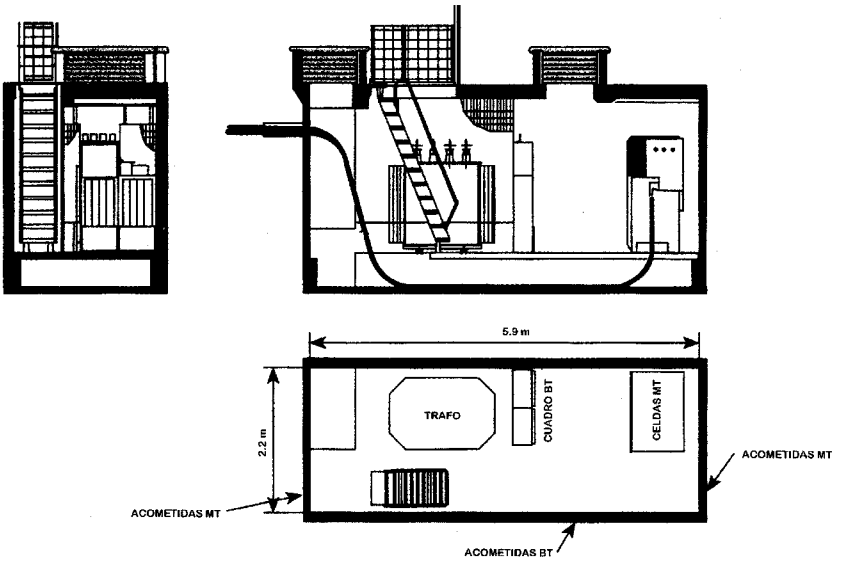


Figura 29. Centro de transformación prefabricado con entrada subterránea.

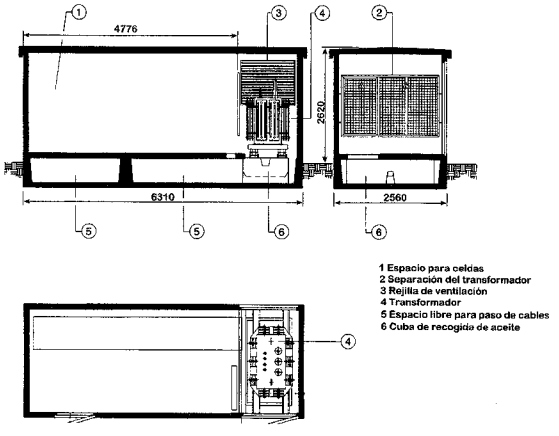


Figura 30. Planta y alzado de un centro de transformación prefabricado.

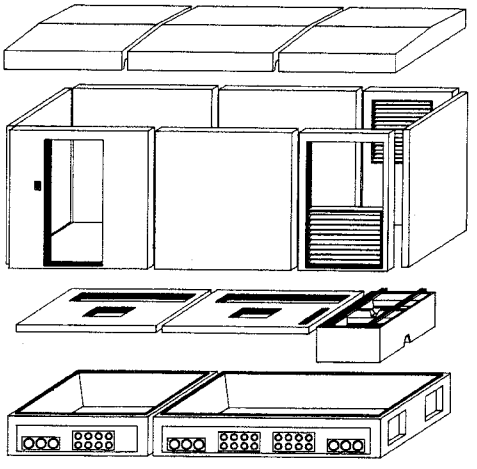


Figura 31. Despiece de la estructura de un centro de transformación prefabricado.

6.2.3.- Composición general de un centro de transformación de interior.

Los elementos que componen el C.T. de interior están alojados en celdas, pudiendo ser éstas de obra ó prefabricadas con envolvente metálico.

- Las celdas de obra (sistema clásico) normalmente son semicerradas, siendo la altura mínima de los tabiques divisionarios de 2.20 m y la altura mínima del cierre metálico frontal de 1.80 m, admitiendose no obstante el cierre frontal incompleto. Según este mismo reglamento, podrán admitirse, en aquellas partes de la instalación que no sean lugares de paso en servicio normal (instalaciones con mando a distancia o locales independientes totalmente aislados), la realización de celdas abiertas.

- Las celdas prefabricadas, son conjuntos prefabricados de aparamenta, bajo envolvente metálica que el fabricante suministra montados y ensayados (norma UNE 20.099). El nivel de aislamiento nominal de las mismas corresponderá al valor de la tensión nominal de la instalación. El resto de las características nominales serán las que correspondan a cada uno de los aparatos instalados en su interior.

En lo que sigue se hará referencia siempre a celdas de obra, teniendo en cuenta que el paso de estas a celdas prefabricadas es directo sin más que sustituir las celdas de obra por el equivalente prefabricado.

En cada C.T. particular será necesario estudiar el número de celdas y la disposición de las mismas que dependerá por un lado del tipo de C.T. (paso, anillo, alimentación aérea, subterránea, medida en media ó baja, etc.) y por otro lado del número de transformadores existentes, sin poder olvidar, como es lógico, el espacio disponible para su realización.

6.2.4.- Tipos de celdas y elementos que las integran.

Los diferentes elementos que constituyen las instalaciones de transformación son: barras colectoras, seccionadores, interruptores, transformadores de medida, transformadores de potencia, etc.. Estos elementos se montan en celdas, y en cada una de ellas se agrupan en los correspondientes a cada circuito, como son los de entrada o salida de línea o los correspondientes a un transformador. También se agrupan funciones, como medida de la energía. Atendiendo a este criterio se dispondrán (figura 32):

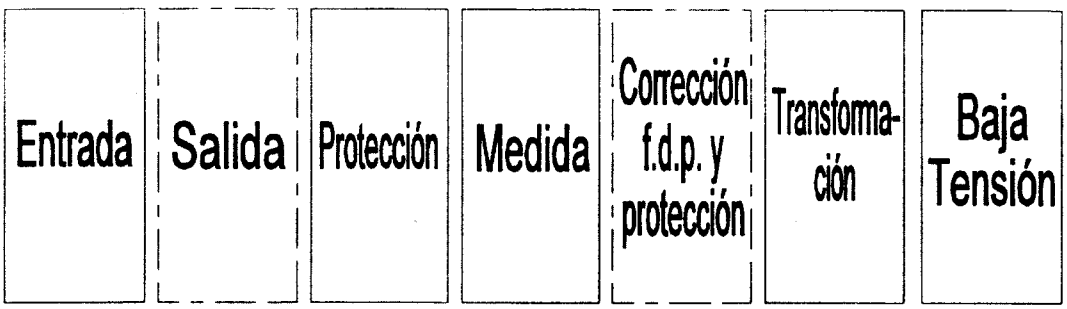


Figura 32. Esquema de bloques de las celdas de un centro de transformación de abonado.

- **Celda de entrada (figura 33)**:

Entrada de la línea que ha de alimentar al centro de transformación, generalmente equipada con seccionador tripolar y seccionador de puesta a tierra. La entrada de cables puede ser aérea o subterránea.

- **Celda de salida:**

Incorpora seccionador en carga para interrumpir el circuito de salida a otros centros conectados en bucle. Generalmente también incorpora seccionador de puesta a tierra. Está presente cuando el C.T. no está al final de línea. De cualquier forma el control estaría a cargo de la compañía distribuidora, de energía eléctrica. Cuando existe salida de línea, en la celda de llegada, obligan las compañías distribuidoras a que incorporen interruptores. El número de celdas de llegada y salida puede ser cualquiera, tantas como líneas concurran en el C.T..

- **Celda de protección (figura 33):**

Corresponde con la protección del transformador generalmente con interruptor de corte en carga y fusibles combinados o interruptor automático. Cuando se hace necesario pararrayos, autoválvulas, éstos se conectan, en el exterior de la caseta generalmente, o a la entrada de la línea en la celda de llegada.

- **Celda de medida (figura 33):**

Formada por los transformadores de medida de tensión e intensidad, el número de tres para cada circuito de medida, (amperímetro y voltímetro). Los contadores de energía, normalmente, se colocan fuera de esta celda, con el fin de evitar los efectos electromagnéticos sobre éstos y evitar los riesgos de accidentes para el personal encargado de las operaciones de verificación, cambio de hora y lectura. Esta celda estará precintada por la compañía distribuidora.

- **Celda de transformación:**

Lugar donde se ubica el transformador de potencia. Debe de estar protegido con tabiques o muros, que impida la proyección de material y aceite al resto de la instalación, en caso de explosión del mismo. De igual debe estar previsto la recogida de aceite en caso de accidente.

- **Celda o cuadro de baja tensión:**

La salida en baja tensión del transformador se deriva en diferentes líneas que salen del C.T.. Cada una de éstas deben estar correctamente protegidas contra cortocircuitos y sobrecargas. Todos estos elementos se sitúan en un cuadro de baja tensión.

Pueden existir otras funciones ubicadas en el C.T., para las cuales ha de preverse el espacio suficiente. Puede existir batería de condensadores para la corrección del factor de potencia, batería de acumuladores como fuente auxiliar, así como ampliaciones previsibles del número de entrada y salida de circuitos.

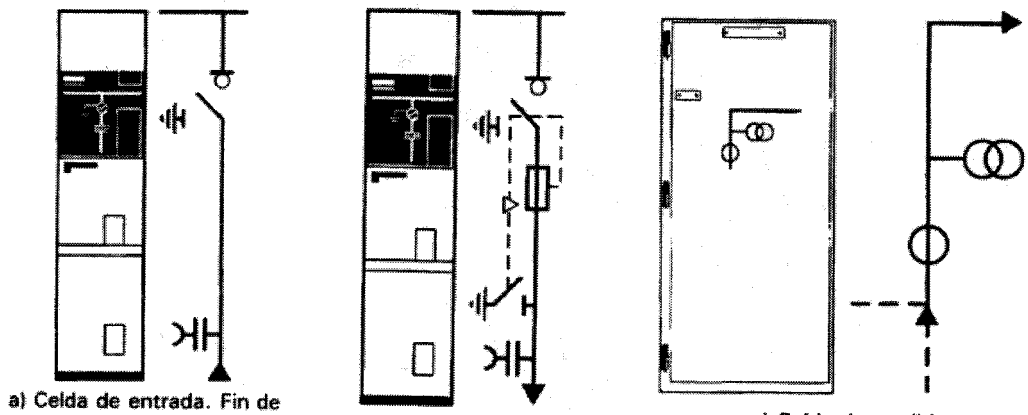


Figura 33. Celdas prefabricadas de media tensión que, usualmente se instalan en un centro de transformación.

Cada C.T. tendrá una disposición particular y un número de celdas determinado, dependiendo de sus características; no obstante en todos ellos se encuentran una serie de celdas comunes.

El concepto de celdas no tiene sentido en los C.T. del tipo intemperie sobre poste, pero las funciones realizadas por los aparatos son las mismas.

El esquema de conexionado de los diferentes elementos de un centro de transformación puede ser como el de la figura 34 y 35.

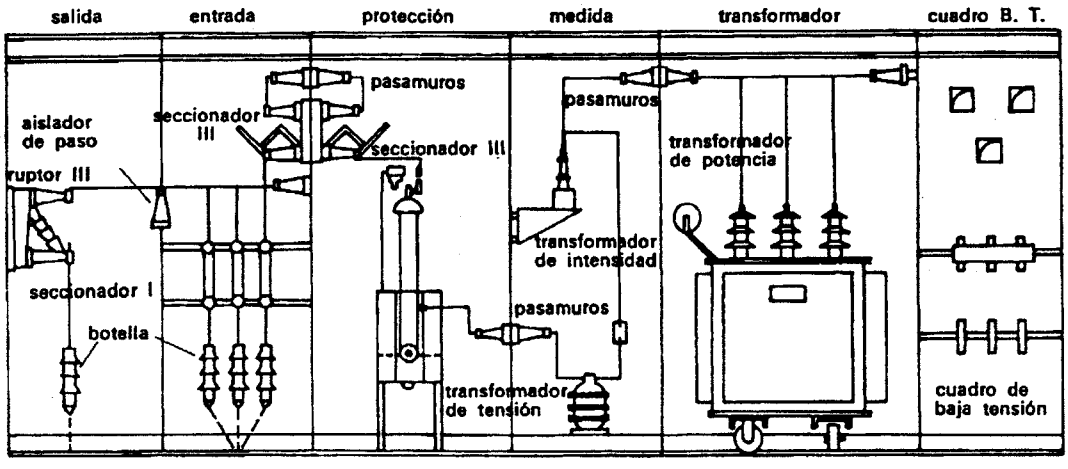


Figura 34. Esquema de conexionado de un centro de transformación.

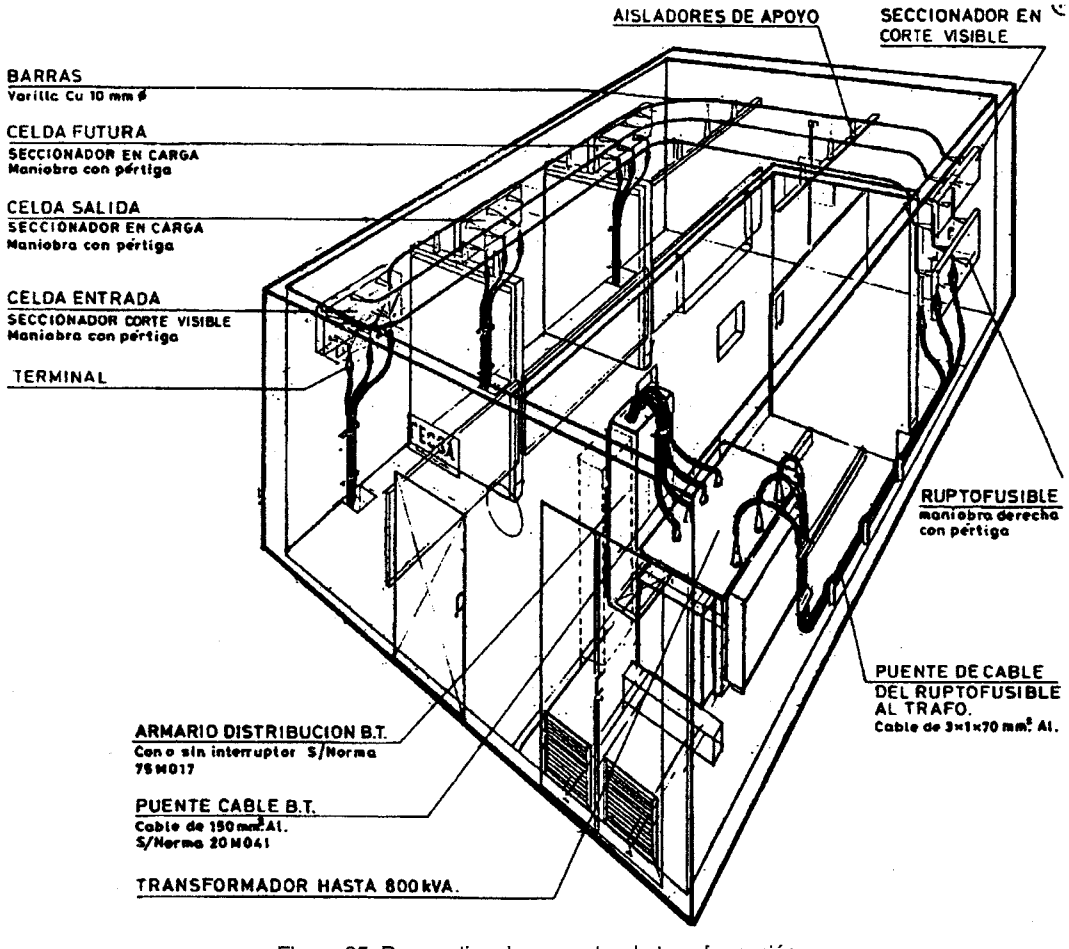


Figura 35. Perspectiva de un centro de transformación.

El esquema unifilar de un centro de transformación puede ser como el de la figura 36.

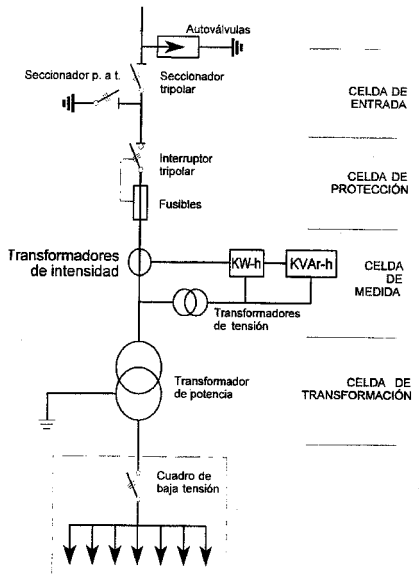


Figura 36. Esquema unifilar típico de un centro de transformación.

- **CELDA DE ENTRADA-SALIDA:**

Por esta celda entra y sale la línea de alimentación al C.T. y como es lógico sólo existirá una celda de este tipo en el C.T. de paso ó anillo. En el resto de los tipos (punta, independiente) se dispondrá sólo de la parte correspondiente a la entrada.

La forma de la celda de entrada-salida, así como los elementos que la integran, viene impuesta por la compañía suministradora atendiendo a sus propias normas, siendo esta la única que tiene acceso a esta celda.

- Cuando la entrada sea aérea se dispondrán de los correspondientes pararrayos para evitar los peligros por sobretensiones de origen atmosférico (siempre que no existan otras protecciones a una distancia inferior a 3 Km).

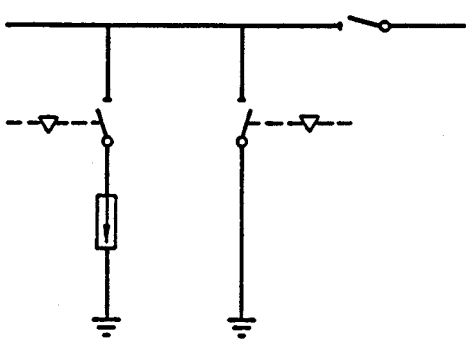


Figura 37. Esquema unifilar, celda de entrada aérea.

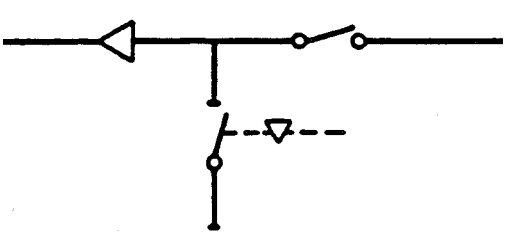


Figura 38. Esquema unifilar, celda de entrada subterránea.

Se aconseja disponer de un seccionador de puesta a tierra que permita poner a tierra las líneas cuando se realizan trabajos de reparación en las mismas.

En la figura 37 puede verse el esquema unifilar de una entrada aérea. El seccionador en serie con el pararrayos permite la puesta fuera de servicio de este para la comprobación de averías.

- En el caso de entrada subterránea (figura 38) se dispone de seccionador de puesta a tierra del cable subterráneo para evitar posibles accidentes debidos a capacidades parásitas en el caso de tener que trabajar con dichos cables (reparaciones, ampliaciones, etc.). Los seccionadores de puesta a tierra disponen normalmente de un enclavamiento mecánico que impide su accionamiento.

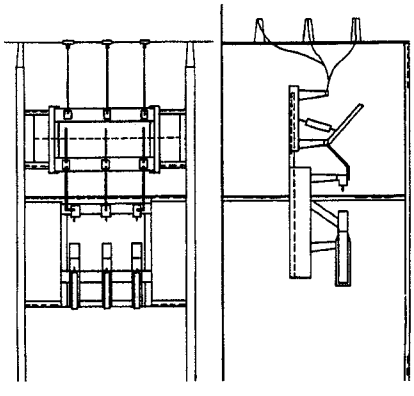


Figura 39. Celda de entrada aérea.

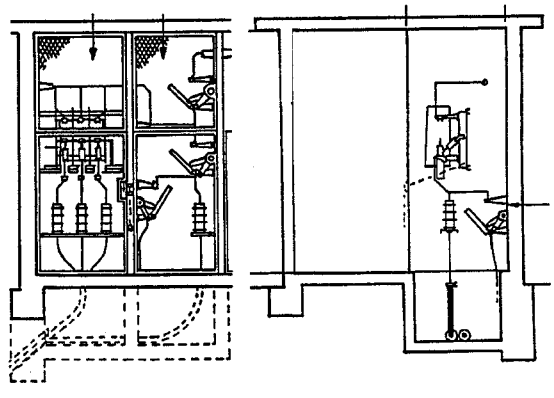


Figura 40. Celda de entrada subterránea.

Los planteamientos realizados para la parte de entrada son totalmente validos para la de salida.

Estas celdas se denominan también "Celdas de entrega de energía" y en muchas aplicaciones suelen estar separadas del resto del centro de transformación (celdas de entrega de energía en fachada y el resto en el interior de la factoría). En estos casos en la celda de salida se dispondrá de un seccionador (1), figura 42, que permita aislar estas celdas del resto del C.T., impidiendo así la presencia de tensiones peligrosas provenientes del centro de transformación (alimentación en baja desde otra instalación).

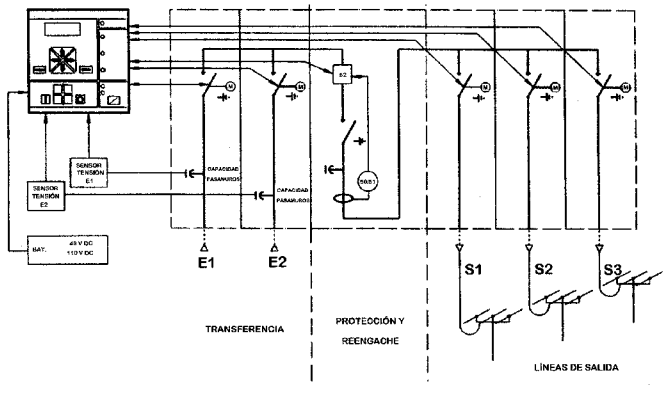


Figura 41. Esquema unifilar C.T. 2 entradas, 3 salidas con sensores y relés de protección.

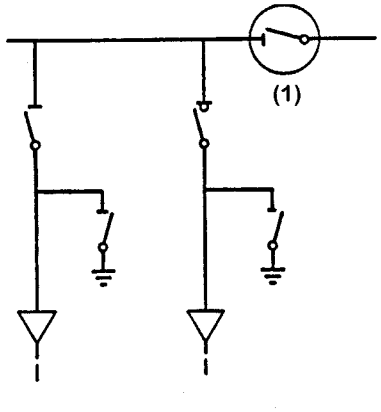
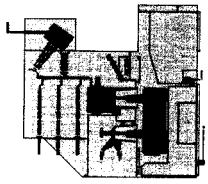


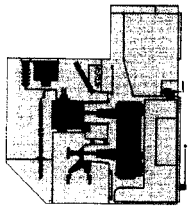
Figura 42. Celda de entrada independiente.

En la celda de entrada y salida se disponen de una serie de elementos de corte y seccionamiento (interruptores, seccionadores e interruptores seccionadores), que como se

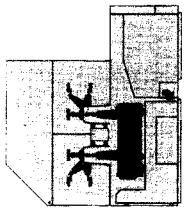
ha indicado anteriormente vienen impuestos por la compañía suministradora. Así pues, en cada caso particular será necesario consultarle antes de determinar dichos elementos.



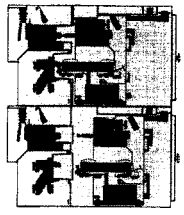
celda de llegada del interruptor automático
La celda de llegada dispone de un interruptor automático Fluarc extraíble y presenta la posibilidad de agregar transformadores de tensión fijos o seccionables



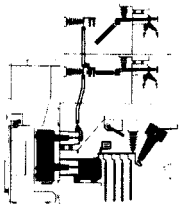
celda de salida del interruptor automático
La celda de salida dispone de un interruptor automático Fluarc extraíble y presenta la posibilidad de agregar transformadores de tensión fijos o seccionables.



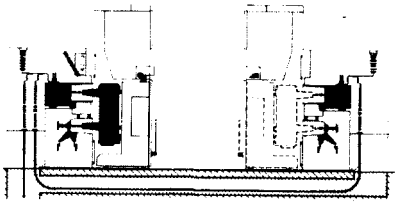
celda de acoplamiento del interruptor automático
Esta celda está destinada al acoplamiento de dos juegos de barras, para ello dispone de un interruptor automático extraíble. Provoca una elevación de las barras, presenta la posibilidad de agregar transformadores de tensión fijos o seccionables en cada uno de los dos juegos de barras. No permite llevar T.i's.



celda del contactor
Esta celda está compuesta por dos elementos superpuestos que disponen en cada salida de un contactor Rollarc 400, con o sin fusibles.
Cada contactor está montado sobre un carro extraíble.
Es posible utilizar la configuración de dos contactores superpuestos o la unitaria con un contactor Rollarc 400 en cada una de ellas.



celda del interruptor automático con doble juego de barras
Esta celda, que contiene dos juegos de barras con 2 seccionadores en derivación, puede recibir los siguientes equipos extraíbles:
- llegada del interruptor automático,
- salida del interruptor automático,
- acoplamiento del interruptor automático.



celda del interruptor automático con doble juego de barras "Duplex"
Este tipo de esquema puede realizarse con dos cuadros instalados cara a cara.
Utiliza celdas estándar, con un juego de barras simple.

Figura 43. Equipamiento interno de celdas prefabricadas.

- **CELDA DE PROTECCIÓN:**

En esta celda van alojados los elementos necesarios para la protección de la instalación y los elementos que la integran, tanto contra sobrecargas como contra cortocircuitos. Según el reglamento de estaciones transformadoras (articulo 16), los dispositivos mínimos a adoptar en función de la potencia del transformador (S) y de la tensión en el lado de alta (U) son los indicados en la tabla 1.

S [kVA]	U [kV]	DISPOSITIVO
S≤100	U≥15	Seccionador y fusible
100≤S≤200	U≤6 U≥15	Seccionador y fusible Seccionador e interruptor automático
S≥200	U≥6	Seccionador e interruptor automático

Tabla 1. Posibles disipositivos en la celda de protección.

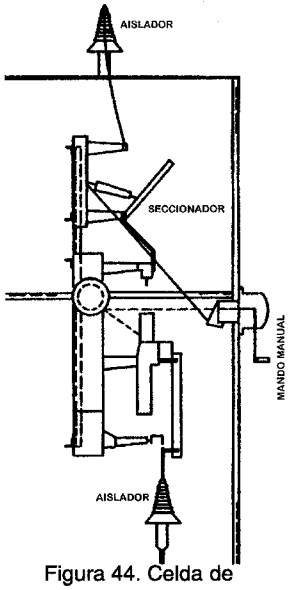


Figura 44. Celda de protección.

No obstante, y teniendo en cuenta que esta reglamentación es muy antigua y que la aparamenta de M.T. ha ido evolucionando, se admite hasta potencias de 1 MVA la utilización del ruptofusible sustituyendo al interruptor automático y al seccionador.

Como es lógico, sobre el elemento de apertura actuarán los diferentes relés necesarios para la protección del transformador (MIE RAT 09).

En el caso de existir varios transformadores en el mismo C.T., se dispondrá de una celda de protección general y de tantas celdas de protección como transformadores existan.

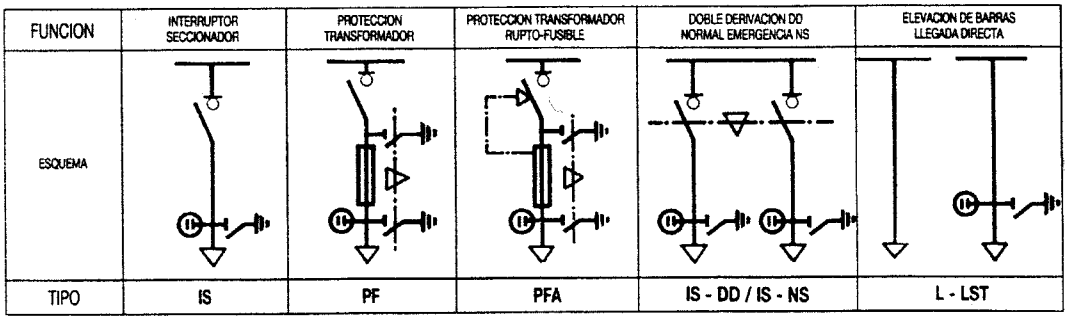


Figura 45. Esquema unifilar de distintas celdas de protección prefabricadas comerciales.

- **CELDA DE MEDIDA:**

A esta celda solamente tendrá acceso la compañía suministradora, irá precintada y estará completamente cerrada.

En ella se alojan los transformadores de intensidad y de tensión colocándose en primer lugar los de intensidad. El número de transformares de medida 2 y 2 ó 3 y 3 depende de la zona de que se trate.

Los contadores y aparatos complementarios estarán situados fuera de la celda de medida, no pudiendo estar en ningún caso a una distancia superior a 12 m (contados en longitud de conductores), de los transformadores de medida. Estos elementos se colocarán dentro de armarios completamente cerrados y precintados, y provistos de cristales para su fácil visualización.

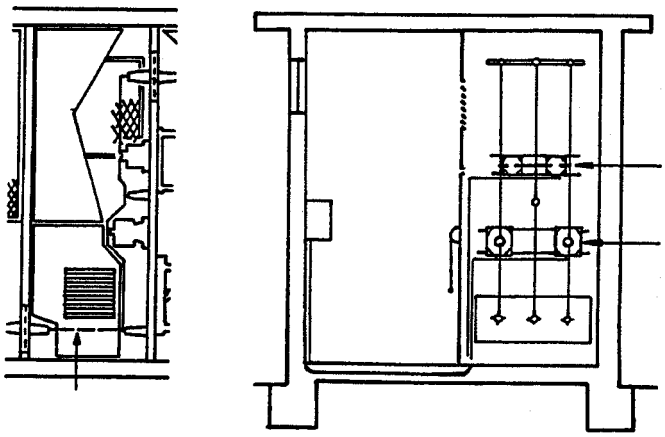


Figura 46. Celda de medida.

En la figura 46 se muestra la sección de una celda de medida. El conexionado de los aparatos de medida se realiza a través de una regleta de conexión, según el esquema indicado en la figura 47. Hay que indicar que la descripción de la celda de medida se ha realizado teniendo en cuenta las normas de HE. En cada caso particular habrá que tener en cuenta las normas de la compañía suministradora de la zona donde se realice la instalación.

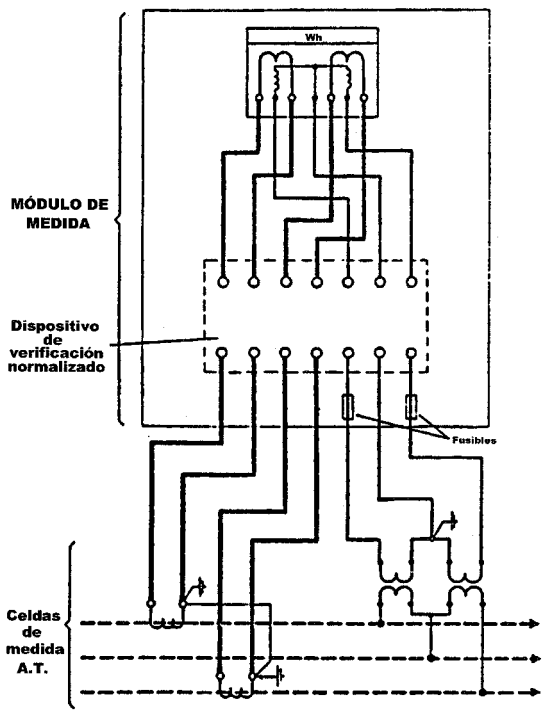


Figura 47. Conexianado de equipos de medida a la celda de medida.

- **CELDA DEL TRANSFORMADOR:**

Se trata de la celda donde se aloja el transformador. Deberá estar suficientemente ventilada y dispondrá por debajo del recinto del transformador de una cuba colectora con capacidad para recoger el liquido del transformador. En la figura 48 puede verse un ejemplo de una celda de transformador.

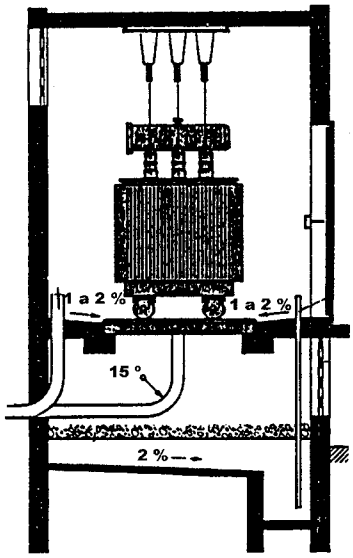


Figura 48. Celda del transformador.

En instalaciones en las que se realice compensación de energía reactiva, es aconsejable preveer en el centro de transformación una celda para alojar a los condensadores. A continuación se muestran distintos tipos de celdas prefabricadas según su función además de un centro de transformación constituido por tales celdas.

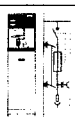
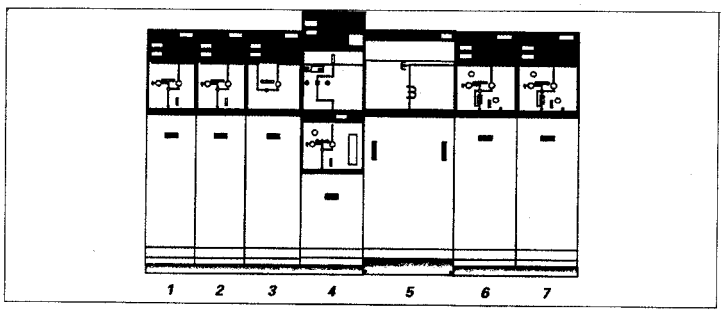
ESQUEMA	DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
	***CML*** (Celda de Línea)	Dotada con un interruptor-seccionador de tres posiciones (en lo sucesivo interruptor), permite comunicar el embarrado del conjunto de celdas con los cables, cortar la corriente nominal, seccionar esta unión o poner a tierra simultáneamente las tres bornas de los cables de Media Tensión.
	***CMP-F*** (Celda de Protección con Fusibles)	Además de un interruptor igual al de la celda de línea, incluye la protección con fusibles, permitiendo su asociación o combinación con el interruptor (☞ **FUNCIONES DE PROTECCIÓN**). Opcionalmente puede incorporar un relé de protección.
	***CMP-A*** (Celda de Interruptor Automático)	Incluye un interruptor automático y un seccionador de tres posiciones. Está dotada de un relé multicurva que permite la realización de protecciones generales o de transformador.
	***CMIP*** (Celda de Interruptor Pasante)	Dispone de un interruptor en el embarrado de la celda, con objeto de permitir la interrupción en carga[1] (separación en dos partes) del embarrado principal del Centro de Transformación.
	***CMM*** (Celda de Medida)	Esta celda, de reducidas dimensiones, permite incluir en un bloque homogéneo con las otras funciones del sistema ***CGM*** los transformadores de medida de tensión e intensidad.
	***CMAL/CMR*** (Celda de Acometida Lateral/ Celda de Remonte)	Envolventes metálicas que protegen el remonte de cables hacia el embarrado (☞ **ACCESORIOS**).

Figura 49. Distintos tipos de celdas prefabricadas comerciales.



REF.	TIPO	CONEX. IZDA.	CONEX. DCHA.	OBSERVACIONES
1	***CML***	Ciega	Tulipas	Línea 1.
2	***CML***	Tulipas	Tulipas	Línea 2.
3	***CMIP***	Tulipas	Tulipas	Separación entre Compañía/Cliente.
4	***CMP-A***	Tulipas	Ciega	Protección general. Salida hacia la CMM con cable.
5	***CMM***	Cable	Cable	Medida. Salida superior con cable.
6	***CMP-F***	Pasatapas	Tulipas	Protección del transformador 1
7	***CMP-F***	Tulipas	Ciega	Protección del transformador 2

Figura 50. Ejemplo de un centro de transformación con celdas prefabricadas.

6.2.5.- Ventilación.

Las pérdidas en el hierro y en el cobre del o de los transformadores ubicados en el C.T., se transforman en energía térmica y en consecuencia actúan como estufas eléctricas que calientan el aire ambiente del local.

Es, pues, necesario para evacuar el calor generado posibilitar una renovación del aire para que éste no alcance una temperatura que podría motivar que los transformadores trabajen a una temperatura superior a la que fija la norma UNE 20.101-82, que en el caso de transformadores secos, con aislamiento clase A es de 60 °C, con aislamiento, clase B de 80 °C y con aislamiento clase F de 100 °C, y si son sumergidos en baño de aceite, con aislamiento clase A, de 65 °C si la circulación del aceite es natural, o forzada no dirigida, o de 70 °C si la circulación del aceite es forzada y dirigida. La renovación del aire puede hacerse por:

- Ventilación natural.
- Ventilación forzada, cuando por las características de ubicación del C.T. es imposible la natural.

La ventilación natural, o por convección, está basada en la reducción del peso específico del aire con la temperatura, por lo que disponiendo unas aperturas por la que pueda entrar el aire del exterior, en la parte baja del local en el que tenemos el C.T. y unas aperturas para la salida del aire en la parte alta, tendremos una renovación permanente de aire del local.

El volumen de aire a renovar es función de las pérdidas totales del o de los transformadores que se tienen en el C.T., de la diferencia de temperaturas que se admite entre el aire a la salida y a la entrada del C.T., como máximo 20 °C (15 °C según el Proyecto tipo UNESA) y de la diferencia de alturas entre el plano medio de la ventana inferior, o del plano medio del transformador y el plano medio de la ventana de salida (figura 51).

El calor específico del aire es 0.24 kcal/ kgC, un m^3 de aire seco a 20 °C tiene un peso de 1.16 kg y que 1 kcal equivale a 4,187 kJ, tendremos que 1 m^3 de aire absorbe por cada grado centígrado de aumento de temperatura:

$$0,24 * 1,16 * 4,17 = 1,15 \text{ kJ} / m^3 {}^{o}C \quad (1)$$

Por lo tanto el volumen de aire necesario por segundo para absorber las pérdidas del transformador, o los transformadores será:

$$Va = \frac{Pt}{1,15\theta a} \ (m^3 / seg.) \quad (2)$$

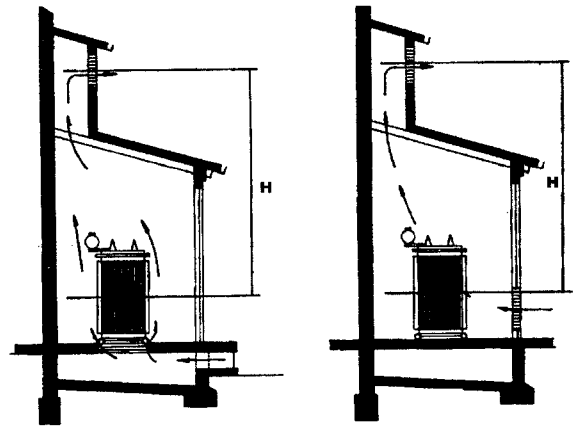


Figura 51. Esquema del circuito de ventilación.

donde:

Pt: Pérdidas totales del, o de los transformadores en kW.

θa: Aumento de temperatura admitido en el aire (máximo 20 °C).

Para evacuar este volumen por las ventanas superiores del C.T. la sección de estas deberá ser:

$$Sv = \frac{Va}{v_s} \ (m^2) \quad (3)$$

siendo:

Va: volumen en m^3/s.

v_s: velocidad de salida del aire en m/s.

La velocidad de salida depende, como se ha indicado, de la diferencia de altura de los planos medios de las ventanas H (m) y del aumento de temperatura del aire, admitido, según la fórmula:

$$v_s = \frac{4.6 * \sqrt{H}}{\theta a} \quad (4)$$

Por último habrá que tener en cuenta que la sección calculada Sv es la sección neta y que es necesario para cumplimentar la instrucción complementaria MIE RAT 14, que las ventanas destinadas a la ventilación deben estar protegidas de forma que impidan el paso de pequeños animales y cuerpos sólidos de más de 12 mm de y estarán dispuestos de forma que en caso de ser directamente accesibles desde el exterior, no puedan dar lugar a contactos inadvertidos con partes en tensión al introducir por ellos objetos metálicos de más de 2,5 mm de diámetro y, además existirá una disposición laberíntica, así como disponer de protecciones precisas, para impedir la entrada del agua (figura 52).

En resumidas cuentas debe disponerse en ellas unas persianas con láminas tipo A con lo cual es lógico que la sección bruta de la ventana deberá ser superior a la sección neta antes calculada. Si designamos por Kv el coeficiente de ocupación de la persiana (del orden del 0,2 al 0,35), la sección bruta de la ventana (S_{TV}) deberá ser:

$$S_{TV} = \frac{Sv}{1 - Kv} \qquad (5)$$

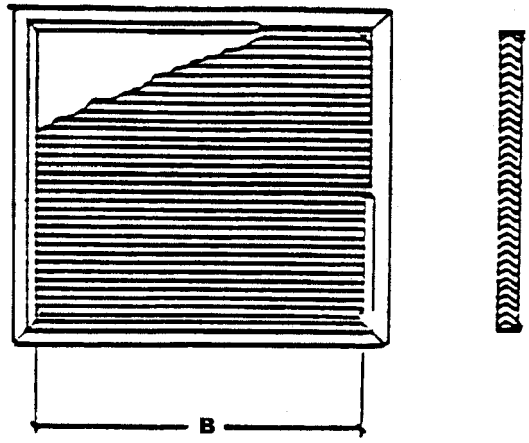


Figura 52. Sección de ventilación.

Se puede también utilizar a título de comprobación el Cuadro de alineaciones de la figura 53, el cual en base al calor producido por las pérdidas (kW) la diferencia de alturas H (m) y la diferencia de temperaturas $\theta a = t_2 - t_1$ (°C) permite determinar el volumen de aire Q (m^3/min) a renovar y la sección neta de la ventana de salida q_2 (m^2), o bien el aumento de temperatura $\theta a = t_2 - t_1$ si se parte de una sección de ventana conocida q_2.

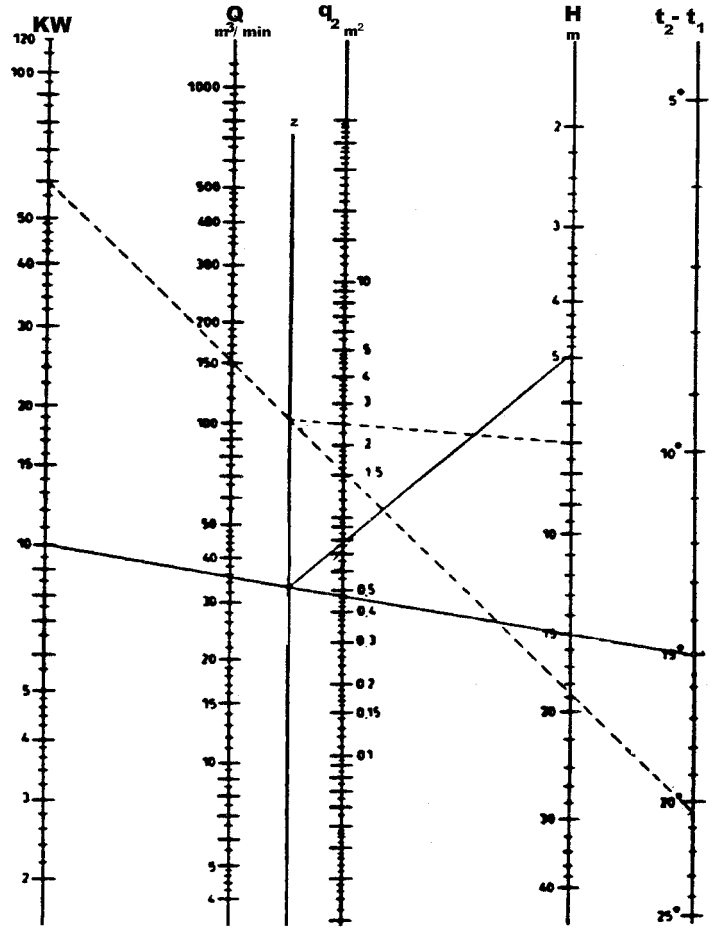


Figura 53. Ábaco para determinar la ventilación de un centro de transformación.

Los CC.TT. semi-enterrados y subterráneos requerirán un espacio adicional para el acceso de personas y maquinaria. Para el acceso de maquinaria existirá una trampa o losa practicable de dimensiones mínimas 2,2 x 1,4 m. Para la ventilación se preverán dos patinejos para entrada de aire fresco y salida del aire caliente, cuya superficie mínima en cm^2 se indica en la tabla 2 para transformadores de 250 y 400 kVA.

N° de Transformadores	Potencia de los transformadores [kVA]	Superficie mínima de cada hueco de ventilación [cm2]
1	250	5.000
2	400	8.000
3	400	12.000

Tabla 2. Superficie para la ventilación de un C.T..

La figura 54 nos muestra diferentes soluciones, a título de ejemplo, de este espacio adicional, y la figura 55 las secciones de dos patinejos de ventilación.

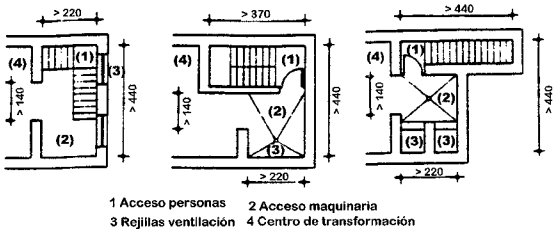


Figura 54. Espacios para accesos y ventilación en locales subterráneos o semienterrados.

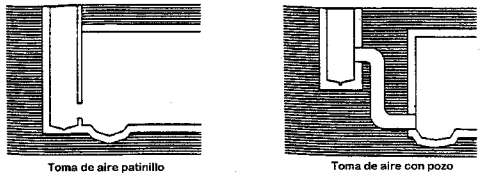


Figura 55. Secciones.

6.2.6.- Características específicas de centros de transformación prefabricados.

Para la realización de instalaciones de media tensión (hasta 36 kV de tensión de servicio), las celdas prefabricadas de distribución constituidas en chapa se emplean cada vez más. Entre sus ventajas tenemos:

- Mayor seguridad de explotación, gracias a la protección contra falsas maniobras.
- Disminución del tiempo de montaje.
- Protección total contra los contactos accidentales.
- Construcción protegida contra el polvo y contra la entrada de animales.
- Posibilidad de entregar las instalaciones completamente montadas y comprobadas.

Veamos a continuación las exigencias que han conducido a estos tipos constructivos:

1) Instalaciones constituidas por elementos prefabricados que pueden ensamblarse en el lugar de montaje con un trabajo mínimo.
2) Construcción sin seccionadores, es decir, que debe evitarse el empleo de seccionadores para evitar falsas maniobras; se obtiene de esta manera el sistema desenchufable.
3) Los interruptores deben ser intercambiables para permitir revisiones periódicas.

4) Enclavamientos mecánicos de funcionamiento seguro para evitar falsas maniobras. Estos enclavamientos imposibilitan retirar el interruptor de la celda para su revisión y mantenimiento, si previamente no se ha producido la desconexión o apertura del circuito.
5) Comprobación del estado de tensión, del poder de ruptura, del estado dinámico y térmico, así como del calentamiento en la celda.

Estas cinco exigencias quedan cumplidas por las celdas de construcción abierta.

6) Revestimiento de las celdas con paneles de chapa, para evitar la extensión de un arco eventual a las otras celdas.
7) Aislamiento de las partes bajo tensión por resina sintética o por tabique de separación, con objeto de hacer prácticamente imposible la aparición de contactos indirectos.

Las siete exigencias anteriores quedan cumplidas por las celdas de construcción blindada o protegida, es decir, por las celdas provistas de recubrimientos aislantes de todas su partes en tensión.

8) Separación suplementaria en las diferentes celdas por tabiques metálicos para formar un espacio reservado al interruptor, otro a las barras colectoras, un espacio destinado al transformador de intensidad y a la conexión de cables, un espacio para el transformador de tensión y un compartimiento para los aparatos de baja tensión.
9) Cobertura automática de los contactos de la parte fija de la celda por dispositivos metálicos puestos a tierra, que se cierran cuando ha salido el interruptor.
10) Cada celda debe poder recibir los cables que necesita la correspondiente corriente nominal, es decir, construcción en una etapa.
11) El transformador de tensión forma un circuito en paralelo con la salida. Por tanto, en caso de una eventual revisión debe ponerse fuera de tensión sin que sea necesario cortar la salida principal.
12) La puesta a tierra de las salidas y la de las barras colectoras debe hacerse sin peligro.

Las 12 exigencias anteriores quedan cubiertas por las celdas de construcción compartimentada o celdas de construcción blindada de alta calidad.

Respecto a su uso en la industria, diremos que las instalaciones abiertas y blindadas se utilizan en lugares en los que las exigencias de la seguridad en el servicio y de mantenimiento son moderadas. Estas instalaciones deben disponerse en locales cerrados y su servicio y mantenimiento ha de encargarse a personal especializado. Las instalaciones compartimentadas se emplean sobre todo en los puestos de nudos importantes, en las instalaciones de distribución de centrales y en instalaciones industriales. Como están totalmente protegidas contra todo tipo de contactos accidentales, no necesitan de personal especializado para su servicio, a diferencia de las anteriores.

- **Prescripciones reglamentarias:**

Las instalaciones eléctricas prefabricadas vienen reguladas por las siguientes I.T.C.:

1.- MIE RAT 16: para conjuntos prefabricados y bajo envolvente metálica hasta 75.5 kV.

2.- MIE RAT 17: para conjuntos prefabricados y bajo envolvente aislante hasta 36 kV.
3.- MIE RAT 18: para instalaciones bajo envolvente metálica y aislados con hexafluoruro de azufre.

En tales I.T.C. se describen las condiciones de servicio para estos tipos de instalaciones. En particular, para las instalaciones con envolvente aislante, entre otras cosas, se fijan las características y dimensiones del material aislante, así como los ensayos a los que debe ser sometido.

7.- PROTECCIÓN DEL TRANSFORMADOR DEL C.T..

La función técnica ejercida por un transformador reductor en un C.T., por su coste relativamente elevado, y la inutilización inmediata de toda la red de B.T. en caso de avería o interrupción de servicio debido a protecciones inadecuadas, hacen que todas las precauciones que tomemos para su protección sean pocas. Las protecciones del transformador deben cumplir múltiples funciones:

- garantizar la seguridad de las personas;
- evitar la destrucción del material como consecuencia de incidentes de explotación;
- permitir al mismo tiempo, todas las maniobras indispensables para el correcto funcionamiento de los equipos.

- **Protección contra los defectos internos. El relé Buchholz:**

Los incidentes eléctricos que pueden afectar a los bobinados sumergidos en un dieléctrico líquido se traducen en un desprendimiento de gases cuya composición es función de la naturaleza de los aislantes líquidos sometidos a la acción del arco de defecto.

La primera acción del relé Buchholz es la recuperación de los gases producidos y la señalización de su aparición. Hay que tener en cuenta que al poner en servicio un transformador se pueden producir desprendimientos de burbujas internas de aire. Este aire proviene de pequeñas burbujas aprisionadas en los bobinados, los radiadores, los tubos y conductos de circulación o refrigeración. La elevación de la temperatura las vibraciones, el movimiento circulatorio del dieléctrico, eliminan poco a poco estas burbujas de aire.

La presencia de un desprendimiento gaseoso no es pues criterio absoluto de incidente es necesario determinar la naturaleza de los gases producidos para descubrir si se trata de un fenómeno de orden eléctrico.

- **Protecciones externas:**

Los incidentes externos que pueden afectar al transformador podemos clasificarlos en:

- sobreintensidades (sobrecargas o cortocircuitos);
- sobretensiones.

- **El termostato**:

Situado sobre la tapa, el termostato está formado por una caña o vaina detectora bañada por el dieléctrico. Por efecto de dilatación de un elemento metálico sensible interior, se produce la acción sobre un contacto eléctrico, a una temperatura preestablecida. Con el contacto, que generalmente es conmutado, se consigue una señal de falta o emisión de tensión. Algunos modelos con dos escalas o niveles permiten prefijar una temperatura de alarma y una temperatura, mas elevada, de disparo o desconexión.

- **El termómetro**:

Basado en la dilatación de un líquido encerrado en un bulbo, el termómetro puede estar situado sobre la tapa del transformador, en un lateral del mismo o en una pared próxima.

Además de señalar, por lectura directa, la temperatura instantánea, algunos tipos de termómetro están equipados con dos contactos, regulables, que permiten:

- accionar una alarma a una temperatura T_1;
- ordenar la desconexión para una temperatura superior T_2.

Algunos modelos están equipados con agujas conducidas que permiten registrarlos límites máximo y mínimo de temperatura en un periodo a partir del instante de una puesta a cero.

De todas formas no hemos de olvidar que estos dispositivos, adecuados para la protección contra sobrecargas medias y mantenidas en el tiempo, son incapaces de detectar un incremento brusco y rápido de la temperatura de los arrollamientos por efecto de fuertes sobreintensidades breves.

8.- PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES.

La seguridad de las instalaciones eléctricas, cualquiera que sea su tensión y servicio requiere, cada vez en mayor medida, una protección suficiente y fiable contra el riesgo de las sobretensiones. Las causas de la presencia de sobretensiones pueden ser, por su origen, de tres tipos:

- Sobretensiones a frecuencia industrial.
- Sobretensiones atmosféricas, o externas.
- Sobretensiones producidas por maniobras en la propia red, o internas.

Las sobretensiones a frecuencia industrial, (sobretensiones dinámicas) son debidas a las variaciones bruscas de carga y a la imposibilidad que las regulaciones mecánicas y de la excitación de los alternadores actúen instantáneamente.

Las sobretensiones producidas por causas atmosféricas pueden ser, por su naturaleza de dos clases:

- Sobretensiones por caída del rayo, bien en un conductor, o en sus proximidades, o en un edificio.
- Sobretensiones por cargas estáticas errantes en las nubes.

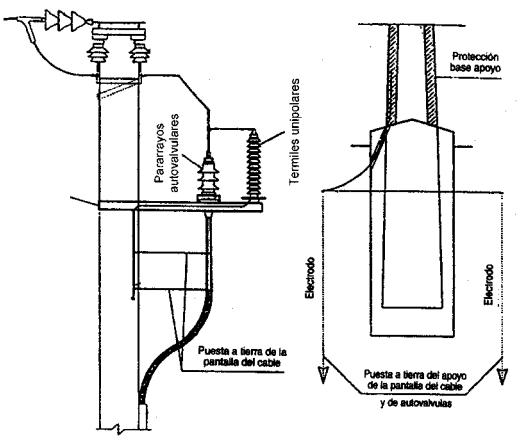


Figura 56. Ejemplo de protección de sobretensiones en una línea aérea con entrada a un centro de transformación.

En cuanto a las sobretensiones de maniobra basta que recordemos que cualquier modificación brusca del esquema de una red en funcionamiento es origen de fenómenos transitorios frecuentemente acompañados de sobretensiones, en particular la ruptura o el cierre de pequeñas corrientes inductivas y la ruptura o la conexión de líneas en vacío.

La protección contra las sobretensiones se consigue mediante el montaje de descargadores de tensión insertados en puntos singulares. Los descargadores de tensión son de hecho puntos débiles desde el punto de vista dieléctrico, en los que su tensión de cebado y las consecuencias del mismo son lo más limitadas posibles. En los edificios, así como en los CC.TT., los descargadores deberán montarse lo más cerca posible a las entradas de las conducciones eléctricas.

En los CC.TT. en edificios, alimentados por líneas aéreas se situarán en el último poste donde la línea aérea se conecta al cable trifásico que enterrado en el suelo llegará al centro de transformación.

En los CC.TT. en casetas al aire libre, se situarán en la cruceta de llegada de la línea aérea sujeta a la caseta.

Los descargadores pueden ser de dos tipos:

- explosores de varillas o de coordinación;
- pararrayos de resistencia variable.

Los explosores constan o bien de dos varillas enfrentadas conectadas una a la línea y la otra a tierra, a través de la instalación de puesta a tierra de protección, separados una cierta distancia a, la cual depende del nivel de aislamiento de la red de M.T., o de dos varillas angulares de separación creciente en altura (figura 57).

Los pararrayos o descargadores de resistencia variable están constituidos por una resistencia, variable con la tensión, a base de carbono de silicio SiC o de óxido de Zinc, ZnO, en serie o no con un explosor.

Las figuras 58 y 59 nos muestra el principio de funcionamiento de estos pararrayos.

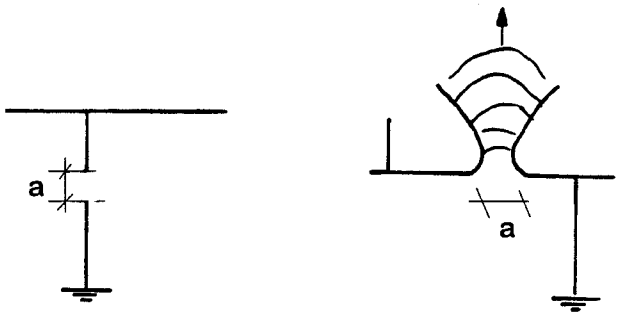


Figura 57. Explosores de un descargador.

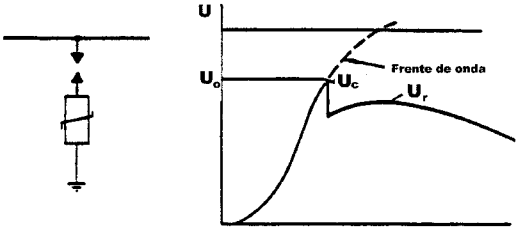


Figura 58. Pararrayos de SiC.

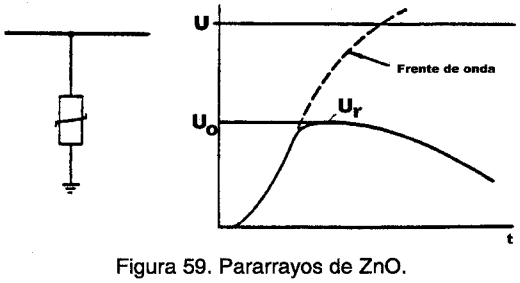


Figura 59. Pararrayos de ZnO.

El pararrayos de SiC, permite un alta corriente de fuga, en tanto que el de ZnO presenta una muy baja corriente de fuga y no necesita explosores.

En los pararrayos de resistencia variable con la tensión aplicada la relación entre la corriente y la tensión aplicada es:

$$I = KU^{\frac{1}{\beta}} \qquad (6)$$

siendo:

K: constante y variable de 0,15 a 0,50 según la naturaleza del metal.

Un pararrayos se caracteriza por:

- El nivel de protección que fija la tensión de cebado, según la forma de la onda y que debe presentar una débil dispersión.
- El poder de descarga, o sea, la intensidad de la corriente de choque que el pararrayos puede derivar a tierra sin deteriorarse.
- La tensión residual Ur que se tiene entre sus bornes durante la descarga de la corriente de choque.
- La tensión a la frecuencia de 50 Hz más elevada bajo la cual puede cortar con seguridad, la corriente subsiguiente a 50 Hz.

El nivel de aislamiento (NA) de la instalación a proteger mantendrá una relación mínima con la tensión residual o nivel de protección (NP) de los pararrayos según la tabla 3.

Tensión nominal de la instalación [kV]	Relación NA/NP (mínima)
12	1,7
17,5	1,4
24	1,4
36	1,3

Tabla 3.

La tensión nominal del pararrayos en función de la tensión más elevada del transformador será la indicada en la tabla 4.

Tensión más elevada para el transformador [kV]	Tensión nominal del pararrayos [kV]
12	12
17,5	18
24	24
36	36

Tabla 4.

La intensidad de descarga nominal será de 5 kA, excepto en zonas de gran intensidad del rayo, en la que se instalarán pararrayos de 10 kA. Los pararrayos de 5 kA se elegirán según la norma UNE 21.87 - 1ª Revisión.

Los pararrayos se instalarán lo más cerca posible del elemento a proteger, sin intercalar ningún elemento de seccionamiento. Esta protección contra sobretensiones no se requieren en los CC.TT. de edificios alimentados por redes de M.T. subterráneas, como se tiene en las ciudades.

- **Puesta a tierra de los cables aislados de alta tensión:**

Para evitar tensiones peligrosas transmitidas por las envolventes metálicas exteriores originadas por defectos a masa ocurridos en las instalaciones que unen estos cables de A.T. es necesario una protección.

El tubo de plomo (cables aislados con papel) o la pantalla de cobre (cables aislados con etileno-propileno) se pondrá a tierra en las cajas de empalme y en las cajas terminales.

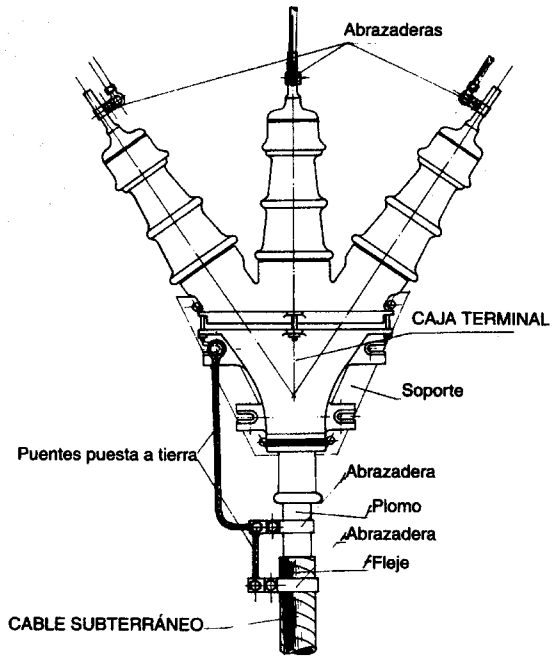


Figura 60. Puesta a tierra de la envolvente metálica exterior del cable de A.T..

9.- PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS.

En los CC.TT. en el que el transformador o los transformadores están refrigerados por aceite líquido inflamable, deberá considerarse la protección contra incendios y la posible propagación de este a los locales colindantes. Esta protección huelga en los CC.TT. con transformadores secos (aislados por resinas sintéticas incombustibles). En los CC.TT. que exigen una protección contra incendios deben considerarse dos sistemas:

- Sistema pasivo.
- Sistema activo.

El sistema pasivo consistirá en la construcción del pozo de recogida de aceite, con apagafuegos y en la obra civil que deberá ser con resistencia al fuego de paredes y techo.

El sistema activo consistirá en un equipo de extinción de fuego de funcionamiento automático, activado por los adecuados sensores o detectores, el cual se deberá instalar cuando se sobrepasen los 600 litros por transformador, ó un volumen total de 2.400 litros para el total de varios transformadores. En edificios de pública concurrencia estos valores quedan reducidos a 400 litros por transformador y 1.500 litros para varios transformadores. El agente extintor más empleado para transformadores es el agua pulverizada.

Al proyectar un C.T. que debe estar dotado de un equipo de protección automática contra incendios tendrán en cuenta los siguientes puntos:

- Separación de la celda del transformador del resto de la instalación.
- Prever el espacio para la instalación de los recipientes del agente extintor.
- Instalación de compuertas de cierre automático en las ventanas de ventilación en caso de incendio.

El equipo automático de extinción del incendio responderá a los tipos especificados en las Normas Básicas de Edificios NBE - CPI - 96.

10.- ALUMBRADO, SEÑALIZACIÓN Y MATERIAL DE SEGURIDAD.

En el interior del C.T. se instalarán las fuentes de luz necesarias para conseguir un nivel medio mínimo de iluminación de 150 lux existiendo por lo menos dos puntos de luz.

Los focos luminosos estarán colocados sobre soportes rígidos y dispuestos de tal forma que se mantenga la máxima uniformidad posible en la iluminación. Se deberá poder efectuar la sustitución de las lámparas sin necesidad de desconectar la alimentación. Los interruptores de alumbrado estarán situados en la proximidad de las puertas de acceso, pudiendo instalarse conmutadores o telerruptores.

Independientemente de este alumbrado podrá existir un alumbrado de emergencia con generación autónoma, el cual entrará en funcionamiento automáticamente ante un corte del servicio eléctrico. Tendrá una autonomía mínima de 2 horas, con nivel luminoso no inferior a 5 lux.

Los CC.TT. deberán cumplir las siguientes prescripciones:

- Las puertas de acceso a los CC.TT. y las puertas y pantallas de protección de las celdas, llevarán el cartel de riesgo eléctrico, según dimensiones y colores que especifica la Recomendación AMYS 1 4.10, modelo AE10.
- En un lugar bien visible del interior del C.T. se situará un cartel con las instrucciones de primeros auxilios a prestar en caso de accidente de una persona. Su contenido se referirá a la forma de aplicar la respiración boca a boca y el masaje cardíaco.
- En aquellos CC.TT. en los que sea necesario realizar maniobras con pértiga estarán equipados con un taburete de aislamiento sobre el que se colocará el operario al utilizar la pértiga.
- La instalación eléctrica de B.T. para el servicio propio de los CC.TT. llevará en su origen un interruptor diferencial de alta sensibilidad (10 mA ó 30 mA) según norma UNE 20.383.

11.- ESPECIFICACIONES DE LOS ELEMENTOS QUE INTEGRAN UN C.T..

- **Transformador de potencia:**

Es la parte más importante del C.T., ya sea por la función de transferir la energía eléctrica entre los diversos circuitos, ó por su costo con relación a las otras partes de la instalación. Las especificaciones más importantes son:

- Potencia nominal.
- Tensiones nominales (relación de transformación).
- Número de fases.
- Tipo de refrigeración.
- Frecuencia.
- Relación de cortocircuito.
- Tipo de instalación.
- Forma de conexión (-Y, etc.).

- **Interruptor automático:**

Es el elemento cuya función es interrumpir el circuito bajo condiciones tanto de corriente nominal, como de cortocircuito. Se especificará:

- Tensión nominal.
- Intensidad nominal.

- Poder de corte.
- Nivel de aislamiento.
- Tipo de instalación.
- Método de estinción del arco.
- Tipo de mando.

- **Seccionadores:**

Se trata de elementos de maniobra capaces de interrumpir o conectar un circuito en forma visible. Son elementos que carecen de poder de corte. Se especificará:

- Tensión nominal.
- Corriente nominal.
- Nivel de aislamiento.
- Número de polos.
- Tipo de instalación.
- Tipo de mando.

- **Transformadores de tensión e intensidad:**

Se utilizarán para la alimentación de los aparatos de medida y protección. Para los transformadores de tensión se especificará:

- Tensión nominal.
- Frecuencia nominal.
- Número de circuitos.
- Relación de transformación.
- Clase de precisión.
- Potencia de precisión.
- Nivel de aislamiento.

Para los de intensidad las especificaciones son las mismas, pero hay que añadir, además, el indice de carga.

- **Pararrayos:**

Cuya misión es cortocircuitar a tierra las sobretensiones de origen atmosférico. Se especificará:

- Tensión nominal.
- Poder de descarga.
- Punto donde será instalado.
- Neutro de la instalación.

- **Aisladores de apoyo:**

Se especificará:

- Tipo de aislador, tipo de montaje.
- Material aislante.
- Tensión nominal.
- Distancia de fuga.
- Esfuerzo en cabeza.

Para los aisladores de paso (pasamuros ó de disco) se especificará además la intensidad nominal.

TEMA 20. PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE BAJA TENSIÓN

1.- CAUSAS DE LOS DAÑOS POR SOBRETENSIONES.

Las instalaciones eléctricas, equipadas con aparatos electrónicos, pueden verse expuestas a peligros derivados de sobretensiones por (figura 1):

- Campos electromagnéticos originados por procesos de conmutación en instalaciones de alta tensión.
- Por impulsos de descargas eléctricas originados por rayos.
- Por explosiones nucleares;
- Por tensiones punta o corrientes punta, se producen en las instalaciones de baja tensión a causa de procesos de conmutación o por descargas electrostáticas.
- Por descargas directas de rayo, que es a su vez, el factor de máxima peligrosidad.

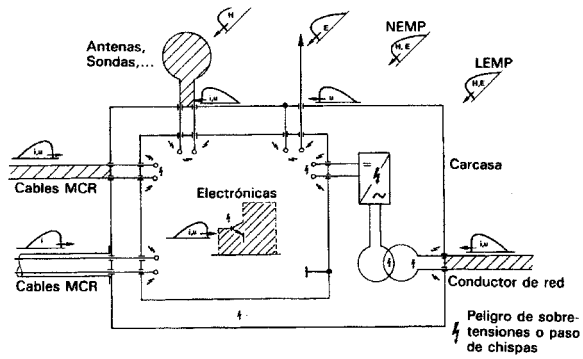


Figura 1. Amenaza para un aparato, equipado con elementos electrónicos a causa de campos electromagnéticos: conmutaciones de las instalaciones de alta intensidad, descargas de rayos (LEMP) y explosiones nucleares (NEMP), y también daños originados en las conexiones de los cables por las corrientes de choque y las tensiones de choque.

1.1.- Sobretensiones ocasionadas por las tormentas.

Las causas de las sobretensiones ocasionadas por las tormentas, pueden clasificarse fundamentalmente en:

- Descargas directas/descargas cercanas.
- Descargas lejanas de rayo (figura 2)

En caso de una descarga directa de rayo (figura 2a), el rayo cae directamente sobre el edificio a proteger. Cuando se trata de una descarga próxima, el rayo cae en alguna parte de una instalación muy extensa, o cae en un conductor (por ejemplo tuberías, o redes de energía o de información), que se encuentran directamente unidas a la instalación a proteger.

a **Descarga directa/próxima:** Descarga en la instalación de protección contra rayos, en el dispositivo de procesos e instalaciones industriales, en cables, etc.

1 Caída de tensión en la resistencia de choque de puesta a tierra R_{st}

2 Tensiones inducidas en bucle (formadas en las redes técnicas de energía e información) a causa de la máxima pendiente de la corriente de rayo $(di/dt)_{máx}$.

b **Descargas lejanas de rayo:**

3 Descarga de rayo en las líneas aéreas de media tensión.

4 Ondas erráticas de sobretensión sobre dichas líneas a consecuencia de descargas de rayos de nube a nube, o respectivamente a causa de descargas en las proximidades de las líneas aéreas de conducción.

5 Campos del canal de rayo

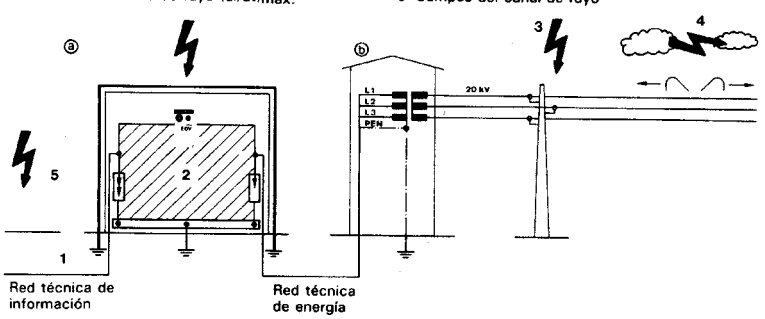


Figura 2. Causas de las sobretensiones en descargas de rayos.

En el caso de una descarga lejana (figura 2 b), se ven afectadas, por ejemplo, líneas aéreas de conducción, de media tensión, a causa de las descargas que se producen de nube a nube y que se propagan como ondas progresivas sobre estas líneas aéreas, o bien se originan las sobretensiones por inducción a causa de descargas de rayos en las proximidades de las instalaciones a proteger.

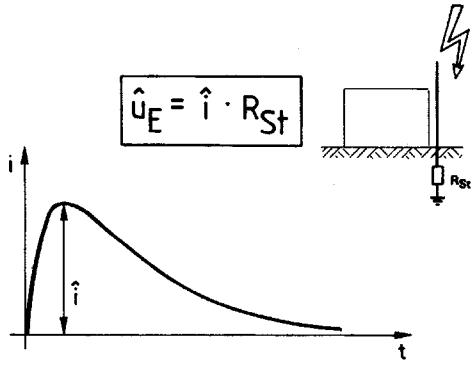
1.1.1.- Descarga directa/Descarga próxima de rayo.

Las sobretensiones que se producen en caso de una descarga directa o próxima de rayo son:

- Caída de tensión en la resistencia de puesta a tierra de choque (1 en la figura 2).
- Tensiones inducidas en bucles metálicos (2 en la figura 2).

1.1.1.1.- Elevación de tensión en la resistencia de puesta a tierra de choque.

Con ayuda del valor máximo I de la corriente de rayo (figura 3) se calcula la caída máxima de tensión U_E, que tiene lugar en la resistencia de puesta a tierra de choque Rst del edificio afectado:



	IEC/TC 81	VG 969 ... Exigencias alta	VG 969 ... Exigencias normal	KTA 2206
Rayo positivo (kA)	200	200	100	500
1. Rayo negativo (kA)				100
Rayo consecutivo negativo (kA)	50	50	25	50

Figura 3. Valores límite de valor máximo i de la corriente de rayo.

Esta elevación de tensión U_E no es peligrosa para la instalación que se ha de proteger, si la compensación de potencial para protección contra rayos está realizada consecuentemente.

En la actualidad, tanto en la normativa nacional, como en las normas internacionales de protección contra rayos, se exige la total compensación de potencial para protección contra rayos, en la que todos los conductores que penetren o salgan de la instalación a proteger deben estar con la instalación de puesta a tierra, bien sea directamente, o bien mediante vías de chispas, o mediante aparatos de protección contra sobretensiones. Cuando tiene lugar la descarga de un rayo, el potencial de toda la instalación se eleva en un valor U_E, pero dentro de la misma instalación no se producen las peligrosas diferencias de potencial.

	IEC/TC 81	VG 969 ... Exigencias alta	VG 969 ... Exigencias normal	KTA 2206
Rayo positivo (kA/µs)	20 durante 10 µs	20 durante 10 µs	10 durante 10 µs	15
1. Rayo negativo (kA/µs)				100
Rayo consecutivo negativo (kA/µs)	200 durante 0,25 µs 300 durante 0,1 µs	200 durante 0,25 µs	100 durante 0,25 µs	200

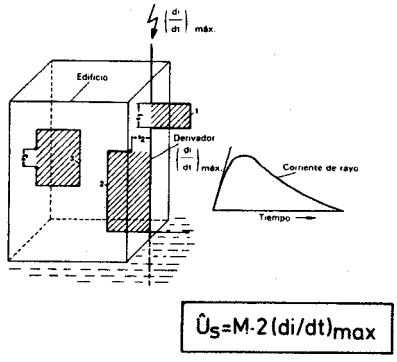


Figura 4. Valores límite para el valor máximo de la corriente de rayo (di/dt)max.

1.1.1.2.- Tensiones inducidas en bucles metálicos.

El valor máximo de la pendiente de la corriente de rayo $(di/dt)_{max}$ (figura 4), es el que influye en el valor de las tensiones electromagnéticas inducidas en todos los bucles de instalación, abiertos o cerrados (2 bucles en la figura 2), que se encuentran en las proximidades de conductores atravesados por una corriente de rayo.

Para poder realizar un cálculo de las amplitudes de tensión con que hay que contar en edificios o en instalaciones técnicas, en caso de descarga de rayo, se utilizan las ecuaciones expuestas en la figura 5 para calcular las tensiones máximas inducidas u_s para bucles cuadrados, situados en las cercanías de pararrayos -supuestos como ilimitados en su extensión-.

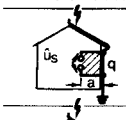
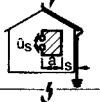
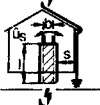
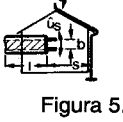
Bucles de la instalación	Tensión inducida máxima	$(di/dt)_{max}$	Magnitudes	$\hat{u}_s$
	$\hat{u}_S = k_{u1} \cdot \left(\frac{di}{dt}\right)_{max}$	100 kA/µs	q = 50 mm² a = 10 m k_{u1} = 15000 $\frac{V}{kA/\mu s}$	1500 kV
	$\hat{u}_S = k_{u2} \cdot \left(\frac{di}{dt}\right)_{max}$		a = 10 m s = 1 m k_{u2} = 5000 $\frac{V}{kA/\mu s}$	500 kV
	$\hat{u}_S = k_{u3} \cdot l \cdot \left(\frac{di}{dt}\right)_{max}$		b = 3 mm s = 1 m l = 10 m k_{u3} = 0,6 $\frac{V}{m \cdot kA/\mu s}$	600 V
	$\hat{u}_S = k_{u4} \cdot b \cdot \left(\frac{di}{dt}\right)_{max}$		b = 3 mm s = 1 m l = 10 m k_{u4} = 0,5 $\frac{V}{mm \cdot kA/\mu s}$	150 V

Figura 5. Tensiones máximas inducidas en bucles de instalación.

Además de los efectos de la inducción en bucles "planos" configurados por los conductores en instalaciones y tendidos eléctricos, interesan también los efectos de la inducción, producidos en bucles muy estrechos, pero muy alargados, que se forman a causa de hilos tendidos en paralelo, no blindados, y entrelazados entre sí, como puede ser el caso de los cables de telecomunicaciones, cuando se encuentran cerca de dispositivos de pararrayos. Estas tensiones transversales, que se forman entre los hilos, son particularmente peligrosas para los componentes electrónicos.

En la figura 6 se muestra la manera en que se forman estos bucles de instalación en edificios: En el edificio se encuentran instalados dos redes, 1 y 2, independientes entre sí. La red 1

es, por ejemplo, la red técnica de energía, y la red 2 es otro tipo de red eléctrica, por ejemplo una red de información: red de datos, o una red de antenas; también puede ser una red no eléctrica, por ejemplo, una red de tuberías de conducción de agua o de gas.

A pesar de disponerse de una protección exterior contra descargas de rayos, y de una compensación de potencial, satisfactoria y completamente realizada según DIN VDE 0185, se pueden inducir entre las entradas de aparatos E_1, y E_2. Estas sobretensiones pueden tener una amplitud de hasta algunos centenares de kilovoltios, y originar, por lo tanto, en el aparato perforaciones eléctricas.

Estas sobretensiones peligrosas en los aparatos (figura 7), con este tipo de tendido de los conductores, y faltando el efecto de blindaje de las paredes de los edificios son inevitables, incluso si se dispone de una protección exterior contra descargas de rayos, y con una compensación de potencial para protección contra rayos totalmente realizada. Cuando se produce una descarga de un rayo en la instalación exterior de protección contra rayos, fluyen por las redes 1 y 2 corrientes parciales de rayo, que alcanzan magnitudes de hasta algunos kiloamperios, y estas corrientes buscan su camino a través del aparato.

Cuando tenga que protegerse un aparato, que se encuentra conectado a dos redes independientes entre sí, hay que tomar una serie de medidas complementarias de protección en la entrada del aparato.

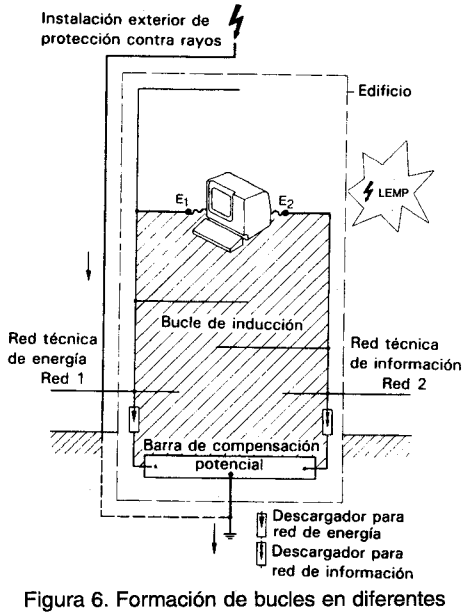


Figura 6. Formación de bucles en diferentes redes.

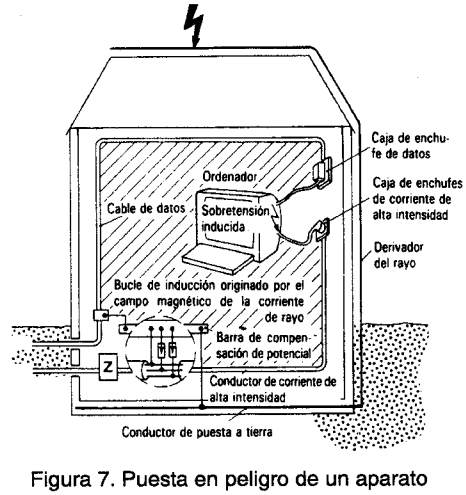


Figura 7. Puesta en peligro de un aparato electrónico a causa de sobretensiones inducidas por descargas de rayo.

1.1.2.- Descarga lejana de rayo.

Cuando tienen lugar descargas lejanas de rayos, pueden suceder dos cosas: o bien se propagan ondas de sobretensiones a la velocidad de la luz a lo largo de los conductores (3 y 4 en la figura 2), o bien el rayo puede descargar junto a la instalación que se trata de proteger (5 en la figura 2), con lo que los campos electromagnéticos del rayo afectan a la instalación a proteger.

A base de los daños producidos durante los años 1985/86 a causa de sobretensiones de tormentas, se ha demostrado que las instalaciones y equipos electrónicos están expuestos a las sobretensiones y sobrecorrientes inducidas o transmitidas por los conductores, y esto hasta una distancia de más de 1 km del punto en que hubo descargado el rayo. Las razones de la extensión de la zona expuesta a peligros por sobretensiones y sobrecorrientes inducidas, radica en la creciente sensibilidad de los componentes electrónicos, en especial en los

aparatos de técnicas de la información, en la cada vez mayor extensión de los conductores que atraviesan los edificios y en la gran complejidad de las redes.

Como ejemplo de la creciente extensión superficial de redes de información, citemos tan solo la longitud autorizada de las conducciones directas de datos entre dos aparatos de tratamiento de datos: Las interfaces fijadas en la época de la introducción del tratamiento electrónico de datos V.24/V.28, precribían unos valores característicos para el accionamiento de los aparatos, que permitían una longitud máxima de los conductores de 15 metros. En la actualidad se dispone de activadores de líneas y de interfaces, que permiten la conexión directa a través de líneas de dos hilos entrelazados con una longitud de línea de hasta 1000 metros.

En las corrientes parciales de rayo en los cables, se producen tensiones transversales y tensiones longitudinales (figura 8). La tensión longitudinal u_1 se presenta entre el hilo y el blindaje metálico del cable, es decir, que afecta al aislamiento de los aparatos conectados entre las bornas de entrada y la caja puesta a tierra. La tensión transversal u_q tiene lugar entre los diversos hilos y afecta a los circuitos de entrada de los aparatos conectados.

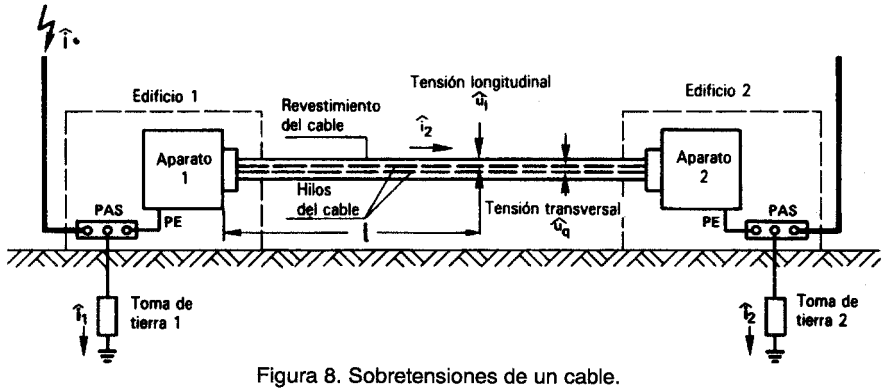


Figura 8. Sobretensiones de un cable.

La tensión longitudinal u_1 puede calcularse, conociendo la corriente parcial de rayo i_2, a través de la resistencia de acoplo R_k del cable.

1.1.3.- Acoplamiento de corrientes punta en los cables de señales.

A continuación vamos a mostrar, con ayuda de algunos ejemplos, la forma en que las corrientes de punta pueden acoplarse, óhmicamente, inductiva y capacitivamente en los cables de señales de instalaciones muy extensas.

1.1.3.1.- Acoplamiento óhmico.

En la figura 9, se muestra como, al producirse la descarga de un rayo en el edificio 1, en la resistencia óhmica de propagación R_{A1} tiene lugar una elevación de tensión de algunos centenares de kV. Estas tensiones son más que suficientes para perforar los aislamientos en los aparatos 1 y 2, de manera que después puede fluir, sin problemas, una corriente de punta óhmica acoplada desde PAS 1 a través del aparato 1, del cable de señales, del aparato 2, de la PAS 2 y de R_{A2}. La magnitud de la corriente de punta acoplada (valor cresta de la corriente: algunos kA) viene determinada por la relación entre las resistencias óhmicas R_{A1} y R_{A2}.

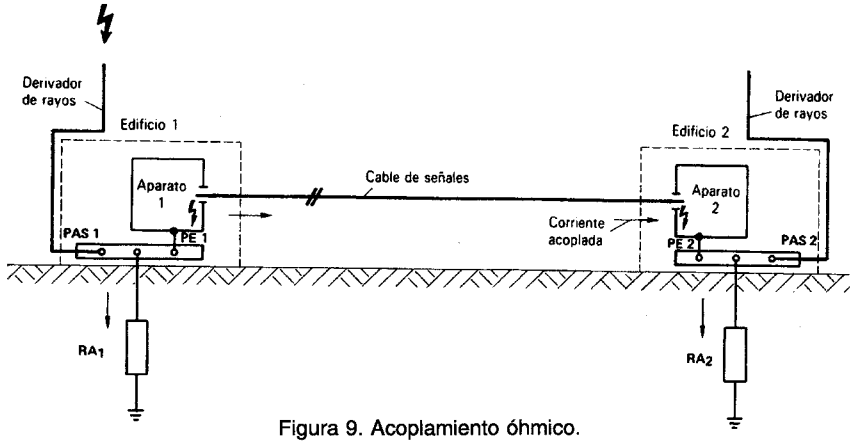


Figura 9. Acoplamiento óhmico.

1.1.3.2.- Acoplamiento inductivo.

Como ya hemos indicado antes, los campos magnéticos que se forman partiendo del canal del rayo o de los conductores recorridos por la corriente de rayo, inducen tensiones en los bucles metálicos.

La figura 10, muestra como el cable de señales de dos hilos que une el aparato 1 con el aparato 2, forma un bucle de inducción en el cual, al descargar un rayo en el edificio 1, se induce una tensión característica ("Tensión transversal" de algunos kV), la cual tiene como consecuencia una corriente acoplada de hasta algunos kA. Estas tensiones y corrientes suponen una carga excesiva para los componentes de las entradas o salidas de los aparatos.

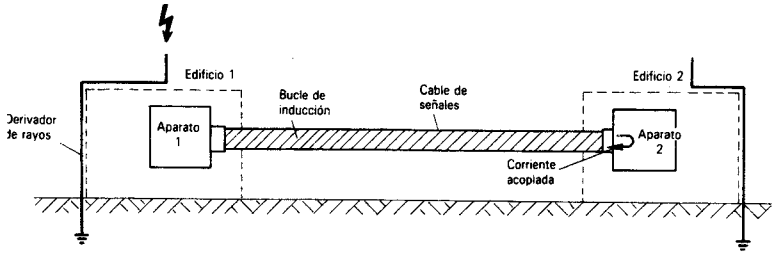


Figura 10. Acoplamiento inductivo.

Otra posibilidad de acoplamiento inductivo, se ha representado en la figura 11. En este caso, el bucle de inducción está compuesto por el cable de señales y el suelo. Al descargar un rayo en el edificio 1, se induce en el bucle una alta tensión (algunas decenas de kV), lo cual tiene como consecuencia la perforación de los aislamientos en los aparatos 1 y 2, y una corriente acoplada de algunos kA.

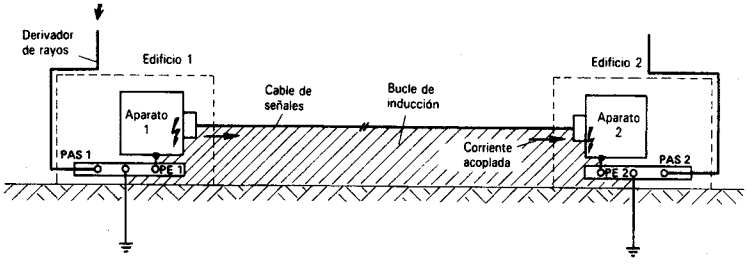


Figura 11. Acoplamiento inductivo.

1.1.3.3.- Acoplamiento capacitivo.

Cuando descarga un rayo sobre la tierra o sobre un pararrayos, el canal del rayo o el derivador de rayos, y como consecuencia de la caída de tensión en la resistencia de propagación R_A experimenta una elevación de tensión de algunos cientos de kV frente al entorno.

El cable de señales entre el aparato 1 y el aparato 2, en la figura 12, está acoplado capacitivamente con uno de esos canales de rayo o con el pararrayos. Las capacidades de acoplamiento (condensadores) se cargan y dan lugar a una corriente acoplada de algunas decenas de A, la cual tras producir perforaciones en los aislamientos de los aparatos 1 y 2, fluye finalmente a tierra.

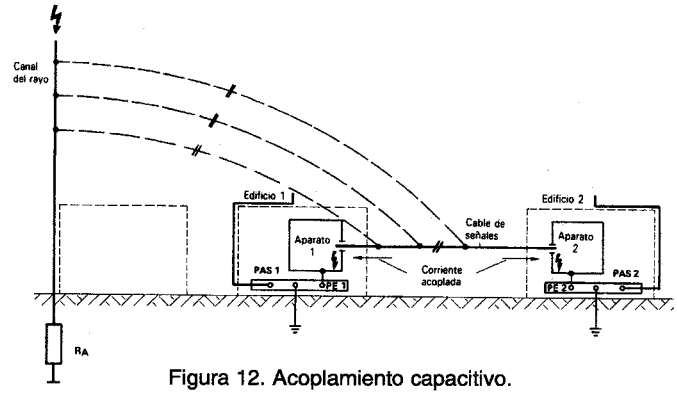


Figura 12. Acoplamiento capacitivo.

1.1.4.- Magnitud de las sobretensiones de rayo.

En el caso de las descargas de rayo lejanas, se trata en primer lugar del peligro que suponen sobretensiones de algunas decenas de kV. Las intensidades, que aparecen aquí, son relativamente pequeñas. Cuando se trata de descargas directas de rayo, están en primer plano los elevados parámetros de las corrientes de rayo: hay que contar en este caso con intensidades de 150 kA y aún más, pudiendo aparecer, al mismo tiempo, puntas de tensión de algunos cientos de kV.

Al peligro de algunas decenas de kV en caso de descargas lejanas de rayo, o al peligro de algunos centenares de kV en caso de descarga directa de rayo, se oponen las tensiones de punta de perforación de tan sólo algunos kV en las instalaciones de baja tensión (tabla 1). La resistencia a la tensión de algunos componentes electrónicos, empleados en estas instalaciones es únicamente de algunos V.

Resumiendo, el peligro causado por sobretensiones derivadas de la descarga de rayos, es por lo tanto unas 100 hasta 10.000 veces superior a las tensiones de las instalaciones convencionales de baja tensión que éstas pueden soportar sin destruirse.

En consecuencia, estos elevadísimos valores de las sobretensiones originadas por descargas de rayo, deberán reducirse a valores tolerables, claramente por debajo de las tensiones de descarga o de perforación, mediante el empleo de los adecuados aparatos de protección contra sobretensiones. Si se tratara de conseguir una protección, incluso en el caso de descarga directa de rayo, los aparatos de protección contra sobretensiones empleados, deberán estar en condiciones de derivar, sin destruirse, elevadas corrientes parciales de rayo.

Aparatos/Cables/Conducciones		Sobretensión de choque/ Sobretensión de descarga de choque (1,2/50)
Frente a carcasa/Tierra	Aparatos de corriente de alta intensidad	5...8 kV
	Aparatos de telecomunicaciones	1...3 kV
Tensiones transversales entre las bornas de entrada de aparatos/circuitos electrónicos	Circuitos con componentes discretos (Resistencias, condensadores, etc.)	0,5...5 kV
	Circuitos integrados Técnica bipolar (TTL)	50...100 V*)
	Circuitos integrados Técnica bipolar High Level HTTL Amplificadores operacionales	50...300V*)
	Circuitos integrados Técnica MOS	70...100V
Cable de Telecomunicaciones		5...8kV
Cable de señal y de medida, cables de corriente de alta intensidad		Hasta 20 kV
Cables de corriente de alta intensidad		Hasta 30 kV

Tabla 1. Tensiones de aislamiento o perforación en circuitos e instalaciones eléctricas de B.T.

2.- MEDIDAS DE PROTECCIÓN.

Para el dimensionado de las medidas de protección, es de importancia primordial la determinación de si el aparato o el sistema ha de ser protegido contra destrucción solamente, o también contra averías y fallos. Así como las averías en los aparatos están en primer plano de las consideraciones "clásicas" sobre "Compatibilidad electromagnética" (EMV), en las consideraciones relativas a la protección contra sobretensiones tiene prioridad la posible destrucción del aparato.

Contrariamente a las averías o perturbaciones electromagnéticas habituales, las descargas de rayo y las explosiones nucleares son fenómenos relativamente escasos y de corta duración. Por lo tanto, en general, habrá que limitarse a poder proteger a un aparato contra la destrucción originada por sobretensiones, asumiendo, a cambio, errores o falseamiento a corto plazo, en las señales y su propagación. Así se procederá, por lo regular, en las instalaciones de baja tensión, en muchos sectores de la técnica de medida, regulación y control, en la técnica de telecomunicaciones y en el tratamiento electrónico de datos. Tan sólo en casos excepcionales, como por ejemplo en los controles y regulaciones de las centrales nucleares, en las instalaciones avisadoras de peligro y en instalaciones militares de disponibilidad operativa inmediata y constante, no deben producirse falseamientos de las señales como consecuencia de descargas de rayos o de explosiones nucleares. Entretanto se está planteando la tarea de combinar la protección contra descargas de rayo con la protección contra sobretensiones de conmutación, contra descargas electrostáticas y contra impulsos electromagnéticos nucleares.

Las medidas que se van a describir en las páginas siguientes, como p. ej.: protección exterior contra rayos, protección interior contra rayos, apantallamiento, blindaje, limitación de sobretensiones, etc, son medidas que en la actualidad se superponen y se complementan. Todas estas medidas deben ser tomadas en consideración, si ello es posible, al planificar la construcción de las instalaciones; pero también pueden incorporarse, en parte, a posteriori a edificaciones, construcciones o instalaciones eléctricas ya existentes.

2.1.- Protección exterior contra rayos.

Tanto en DIN VDE 0185, como también en la normativa internacional de protección contra rayos se hace una clara diferenciación entre "protección exterior contra rayos" y la "protección interior contra rayos", o respectivamente entre "Instalación exterior de protección contra rayos" y la "Instalación interior de protección contra rayos".

Se denomina "protección exterior contra rayos" a la totalidad de todos los dispositivos e instalaciones en el exterior, encima y adosados a la instalación que se ha de proteger, para captar y derivar la corriente de rayo a la instalación de puesta a tierra (figura 13).

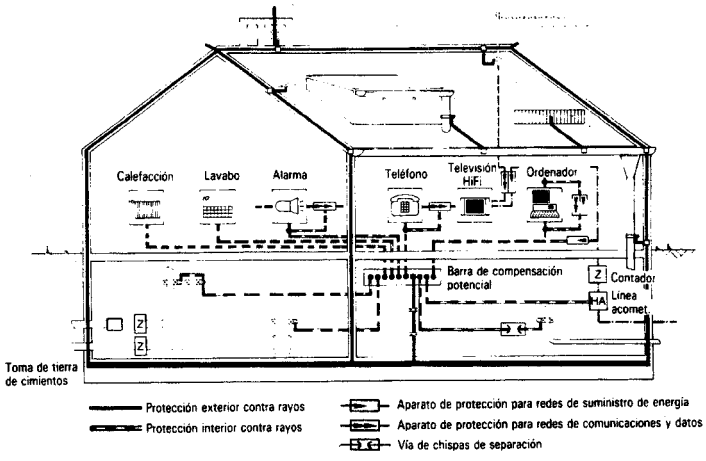


Figura 13. Protección interior y exterior contra descargas de rayos, según DIN VDE 0185.

2.1.1.- Dispositivos pararrayos.

Se denominan dispositivos pararrayos a la totalidad de los elementos o piezas metálicos, situados encima, al lado, lateralmente, o cerca de la instalación que se trata de proteger, y que sirven como puntos para descarga del rayo.

El espacio de protección es el espacio considerado como protegido por un dispositivo de pararrayos frente a las descargas de rayo. En la Directriz VDE de protección contra rayos se subordina a los dispositivos de pararrayos de una altura de hasta 20 metros sobre el nivel del suelo, un espacio de protección, dentro del cual se considera que las construcciones e instalaciones se encuentran protegidas.

Para una línea captadora de pararrayos única, dispuesta horizontalmente, se define un ángulo de protección de 45° (medido en relación con la vertical). El espacio de protección así definido, incluye un espacio en forma de pabellón situado por debajo de la línea de pararrayos, y finaliza en los extremos del conductor de pararrayos en un cono inferior a 45°, cuyo extremo superior viene representado por la linea captadora de pararrayos misma. Análogamente se expresa el espacio de protección de una punta captadora de hasta 20 metros de altura, por medio de un cono por debajo de 45°(medido frente a la vertical), y cuya punta superior coincide con el extremo de la punta captadora. La forma más convencional del tendido de conductores de tejado sobre la superficie de la terraza (o superficie) del remate de un edificio, muy extendido, se describe en forma de un dispositivo pararrayos, en forma de malla, cuya abertura de mallas no debe ser mayor de 10 m x 20 m. Todo el espacio

del edificio situado por debajo de esta estructura, puede considerarse como protegido (figura 14). Según esta directriz VDE, y tal como se muestra en la figura 15 los edificios de altura superior a 30 metros, se protegen en las paredes laterales del edificio mediante líneas captadoras dispuestas en las paredes exteriores del edificio horizontalmente, para prevenir las descargas laterales de rayos, (a partir de 30 metros de altura, hay que instalar estas líneas cada 20 metros).

En los últimos años se ha impuesto, internacionalmente, el denominado procedimiento de esfera de rayo para determinar el espacio verdaderamente protegido contra descargas de rayos. Este procedimiento se puede aplicar en general, y en los objetos a proteger que presenten las más variadas y complejas formas, y también con una estructura cualquiera de los dispositivos pararrayos por muy sofisticados y complejos que éstos sean. El procedimiento se basa sobre la física de la descarga del rayo y tiene en cuenta, naturalmente, todas las condiciones marginales físicas en la determinación del espacio protegido.

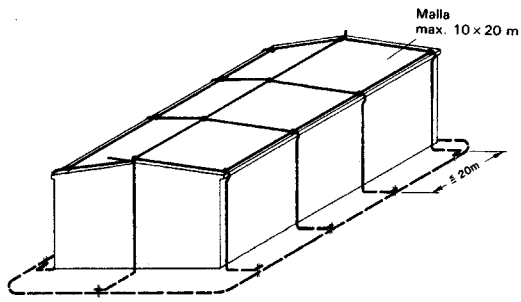


Figura 14. Dispositivos pararrayos en forma de malla (máxima abertura 10*20 m) y derivadores situados a distancia unos de otros, de 20 m como máximo.

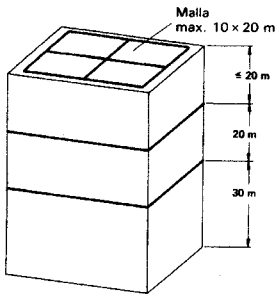


Figura 15. Conductores pararrayos dispuestos en edificios de más de 30 m de altura.

Por lo general, se procede de la forma que describimos a continuación para realizar la determinación del espacio protegido, según el procedimiento del rayo de bola (esfera):

Se reproducen los objetos a proteger, p. ej. edificios, estadios deportivos, o instalaciones industriales, y los dispositivos de pararrayos previstos, en un modelo (p. ej. a una escala de 1:100 hasta 1:500). Después se construye una esfera, de acuerdo con la escala, con un radio que equivale a la longitud postulada de la descarga de captación del rayo. El modelo electrogeométrico se basa en considerar que el centro de la esfera se corresponde con la cabeza del rayo directriz, el cual se ha aproximado tanto a la tierra que la descarga de captación, que se produce desde el objeto puesto a tierra más próximo a él, da lugar a la unión con el rayo. En la práctica se aplican radios de esfera de 30 hasta 60 metros, sin olvidar que la seguridad de la protección se va reduciendo conforme se hace mayor el radio.

La "esfera de rayo" se hace pasar rodando, alrededor de todo el modelo (figura 16), y también en todas las posiciones posibles. Si al hacer esto, la esfera solamente toca los dispositivos pararrayos, ello indica que el

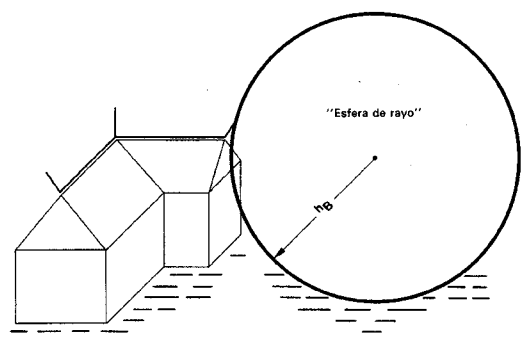


Figura 16. Método para determinar el efecto de protección de las puntas y líneas captadoras, instalados en un edificio.

objeto a proteger se encuentra totalmente situado dentro del espacio de protección. Si no se tocan algunos de los dispositivos pararrayos, éstos pueden considerarse superfluos. Si la bola, al hacerla girar por encima del modelo toca el objeto a proteger en algún punto, dicho objeto se encuentra insuficientemente protegido en este punto, y hay que completar la instalación de los elementos pararrayos de forma que la bola toque solamente a éstos. Cuando se trate de configuraciones muy sencillas de los dispositivos de pararrayos, como pueden ser p. ej. únicas puntas captadoras, o líneas captadoras, puede prescindirse de la realización de un modelo o maqueta, y verificando el efecto de protección mediante el análisis de la situación, basándose sobre el efecto antes indicado de la "esfera de rayo".
Instalaciones y equipos eléctricos y de maquinaria, de ascensores, instalaciones de aire acondicionado, etc., en los tejados, no deben unirse a los dispositivos pararrayos, en prevención de eventuales daños producidos por corrientes parciales de rayo. Instalaciones eléctricas de menores dimensiones, instaladas en los tejados, p. ej. ventiladores, pueden protegerse mediante la colocación de puntas captadoras, instaladas junto a dichos equipos, tal y como se muestra en la figura 17.

Instalaciones de aire acondicionado y de ventilación de mayores dimensiones, situadas en los tejados o terrazas, se protegen más efectivamente por medio de líneas captadoras, dispuestas sobre dichas instalaciones, como se muestra en la figura 18.

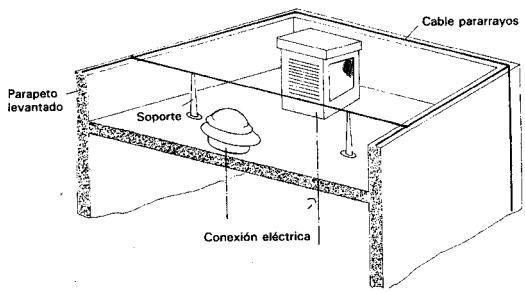


Figura 17. Disposición de un plano de mallas "elevado" para tejados con elementos accionados eléctricamente en el tejado.

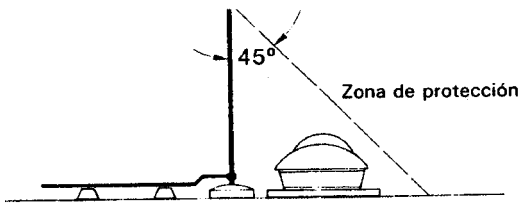


Figura 18. Protección de un ventilador de tejado, mediante una punta captadora según DIN VDE 0185.

2.1.2.- Derivadores.

Se conoce con el nombre de derivadores a conexiones conductoras eléctricas, instaladas entre los dispositivos pararrayos y la instalación de puesta a tierra. En la directriz VDE de protección contra rayos se recomienda la instalación de las líneas captadoras y de los derivadores a unas distancias entre 5 hasta 7 metros, cuando se trata de proteger instalaciones amplias de redes de comunicaciones o de proceso de datos. Además, en estas instalaciones se deben incluir los armados de todos los techos, paredes y suelos en la instalación de protección contra rayos.

2.1.3.- Instalación de toma de tierra.

La instalación de toma de tierra es el conjunto de todas las tomas de tierra locales, conectadas entre sí eléctricamente, o de las piezas de metal que actúan como tomas de tierra y de los cables de puesta a tierra. Según DIN VDE 0800, parte 2, para los edificios de nueva construcción se recomienda la instalación de toma de tierra de cimientos, que se encuentra empotrada, protegida contra la corrosión en los cimientos del edificio, y que rodea a la construcción en forma anular. La toma de tierra de cimientos debe estar provista de suficientes

banderolas de conexión, para poder efectuar la conexión en el exterior de las derivaciones (situadas por ejemplo a una distancia de 5 metros entre sí), y en el interior del edificio para conexión de la compensación de potencial para protección contra rayos de la compensación de potencial principal (según DIN VDE 0100, parte 410), y del colector de puesta a tierra (según DIN VDE 0800, parte 2). Los armados de los cimientos de un edificio se conectan a la instalación de toma de tierra. Si no fuera posible efectuar la instalación de una toma de tierra de cimientos, la mejor solución en estos casos es efectuar una toma de tierra circular.

2.2.- Protección interior contra rayos.

La protección interior contra rayos es el conjunto de todas las medidas adoptadas contra las repercusiones de la corriente de rayo y de sus campos eléctricos y magnéticos sobre instalaciones y equipos eléctricos, dentro de un edificio.

Las normas para la protección interior contra rayos, se especifican en DIN VDE 0185, DIN VDE 0800, parte 1, DIN VDE 0800, parte 2, DIN VDE 0845 y IEC-81.

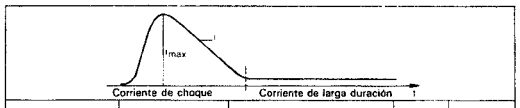
La supresión de las diferencias de potencial, originadas con motivo de una descarga de rayo, requiere determinadas medidas, que van más allá de las exigencias según DIN VDE 0100, parte 410 y 540 y de DIN VDE 0190, y que se denominan compensación de potencial para protección contra descargas de rayos.

La realización de una compensación de potencial para protección contra rayos, completa y total, es una exigencia ineludible para conseguir el objetivo de una perfecta protección interior contra rayos, o respectivamente para protección contra sobretensiones causadas por descargas de rayo; imprescindible para los equipos e instalaciones eléctricas y sobre todo electrónicas, de técnicas de información y de proceso de datos en los edificios. Mediante estas medidas, todas las instalaciones eléctricas de un edificio (incluidos los conductores de tensión de las instalaciones eléctricas que son receptores de sobretensiones) se elevan uniformemente al potencial que se presenta en la instalación de toma de tierra al producirse la descarga de un rayo: entre ellos no aparecen así peligrosas diferencias de potencial. La base de dimensionado para los materiales, componentes, piezas (como barra de compensación de potencial, bornas, etc.) dentro del marco de la compensación de potencial para protección contra rayos, al igual que el dimensionado de los derivadores de sobretensiones, son los parámetros de la corriente de rayo.

Los parámetros de peligrosidad de la corriente de rayo, en caso de descarga directa de rayo, se recogen en las normas siguientes:

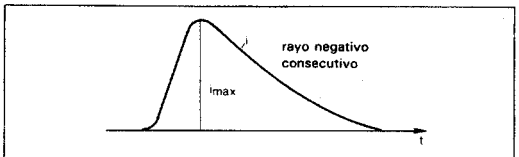
- Normas para aparatos de defensa VG 96.901 (para exigencias normales y para exigencias elevadas).
- Reglas de la Comisión Técnica Nuclear KTA 2.206 (para rayos positivos y negativos, al igual que para rayos negativos múltiples; en preparación).
- Norma Internacional de protección contra rayos IEC 81 (está previsto incluir una diferenciación para las diferentes clases de protección).
- DIN 48810.

Los parámetros más importantes se recogen en las tablas 2 y 3.



Parámetro	Unidad	VG 96901 normal	VG 96901 alto	KTA 2206 positivo	KTA 2206 primer rayo negativo	KTA 2206 rayo negativo múltiple	IEC TC81 alto	DIN 48 810 anexo
i_{max}	kA	100	200	500	100		200	100
Q	As	50	100	800	(29)		100	10
W/R	MJ/Ω	2,5	10	100	(1,4)		10	0,5
T_1	µs	10	10	50	5			
T_2	µs	350	350	500	200			
$Q_{máximo}$	As	100	200				(200)	50
$T_{máximo}$	ms	500	500					200
Q_{ges}	As	(150)	(300)			200	300	(60)
W/R_{ges}	MJ/Ω	(2,5)	(10)	(100)		5	(10)	(0,5)

Tabla 2. Parámetros de la corriente del rayo en caso de descarga directa ("parámetros de energía").



Parámetro	Unidad	VG 96901 normal	VG 96901 alto	KTA 2206	IEC TC 81 alto	IEC TC 81 normal
i_{max}	kA	25	50	50		
T_1	µs	0,25	0,25	0,25		
T_2	µs	100	100	150		
$\Delta i/\Delta t$	kA/µs				200	100
Δt	µs				0,25	0,25

Tabla 3. Parámetros de la corriente del rayo en caso de descarga directa ("parámetros de pendiente de la corriente").

En la actualidad, la compensación de potencial para protección contra rayos (figura 19) es algo considerado como imprescindible; representa la conexión de todas (sin excepción) las tuberías y conducciones metálicas que penetran en el edificio, es decir, también de los conductores de alimentación de B.T. y de los cables de telecomunicaciones, a la instalación de toma de tierra para protección contra rayos, por medio de conexiones directas, o a través de vías de chispas de separación y de descargadores de sobretensiones cuando se trate de cables conductores de tensión. Esta compensación de potencial para protección contra rayos se suele tener a nivel de suelo, lo más cerca posible al punto de entrada de los conductores (que en el caso ideal deberían penetrar todos por el mismo punto), y se efectúa con ayuda de una así llamada Barra colectora de compensación de potencial. En combinación con la compensación de potencial según las directrices VDE, sobre todo según DIN VDE 0100, 0190, 0800 y según 0845, se asegura que toda la instalación de tuberías metálicas de un edificio, se encuentren conectadas a la barra de compensación de potencial, con lo que están incluidas en la instalación de protección contra rayos.

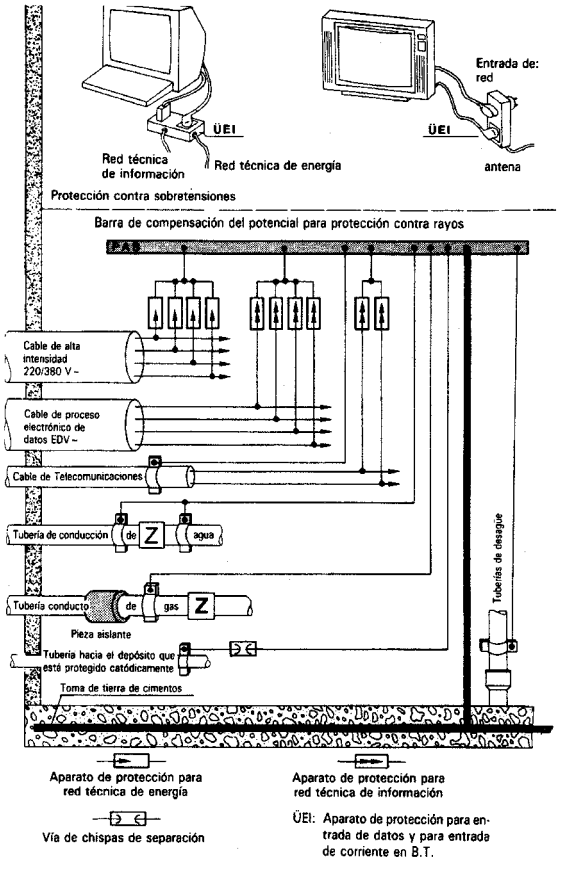


Figura 19. Protección contra rayos. Compensación de potencial y protección contra sobretensiones.

Conductores, instalaciones y tuberías metálicas, que penetran en una construcción, y que se conectan a la barra de compensación de potencial para protección contra rayos, son p. ej.:

- Tomas de tierra de telecomunicaciones.
- Tomas de tierra según DIN VDE 0141.
- Tomas de tierra auxiliares.
- Tomas de tierra de medida.
- Conductores blindados.
- Cables de telecomunicaciones.
- Cables de antena.
- Cables de energía (tomando en consideración DIN VDE 0100.
- Cañerías y tuberías de agua.
- Tuberías de calefacción.
- Tuberías del suministro de gas.
- Conductos de aire acondicionado.

Elementos y conductores metálicos, dentro de un edificio, que deben ser conectados a la barra de compensación de potencial para protección contra rayos, son:

- Tuberías y cañerías de conducción de agua.
- Tuberías de gas.
- Tuberías de calefacción.
- Tuberías para dispositivos extintores de fuego.
- Guía y carriles de los ascensores.
- Equipos o instalaciones de grúas.
- Canales de ventilación y de acondicionamiento de aire.

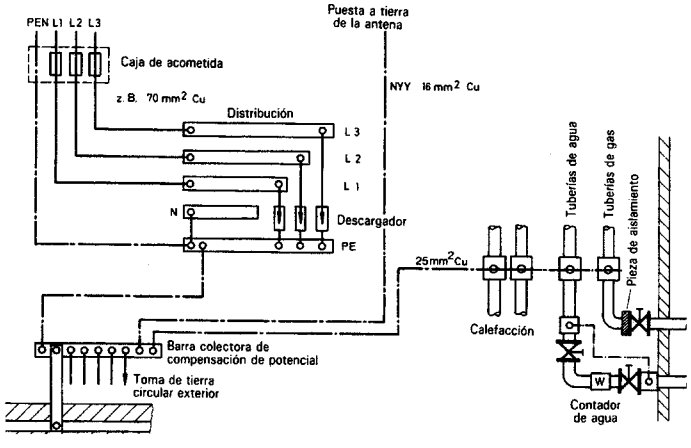


Figura 20. Compensación de potencial con neutro unido (redes TN).

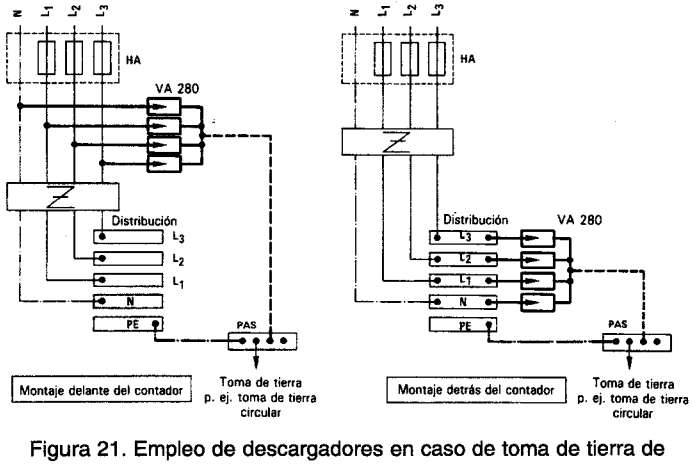


Figura 21. Empleo de descargadores en caso de toma de tierra de protección (redes TT).

Según DIN VDE 0185, parte 1, se deben conectar a través de descargadores (figuras 20 y 21), los siguientes elementos:

- Conductores y cables baja tensión (conductores activos) de la instalación de corriente de baja tensión, con tensiones nominales hasta 1000 V.
- Conductores neutros (conductor N), en los que no esté autorizada la puesta a tierra.

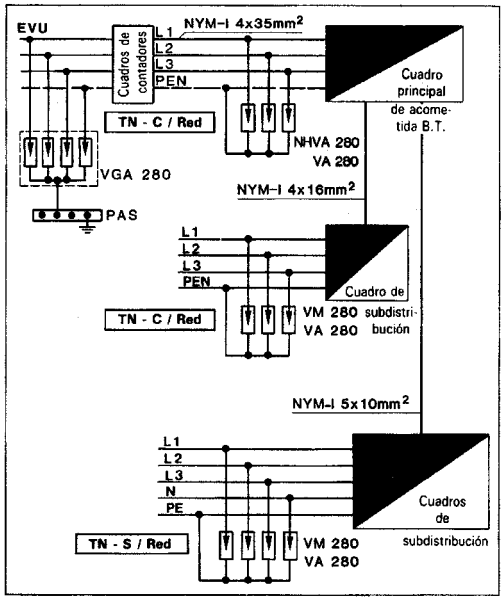


Figura 22. Posibilidad de montaje de descargadores de baja tensión en redes TN.

En la figura 23 se ha representado la compensación de potencial de protección contra rayos en una instalación industrial.

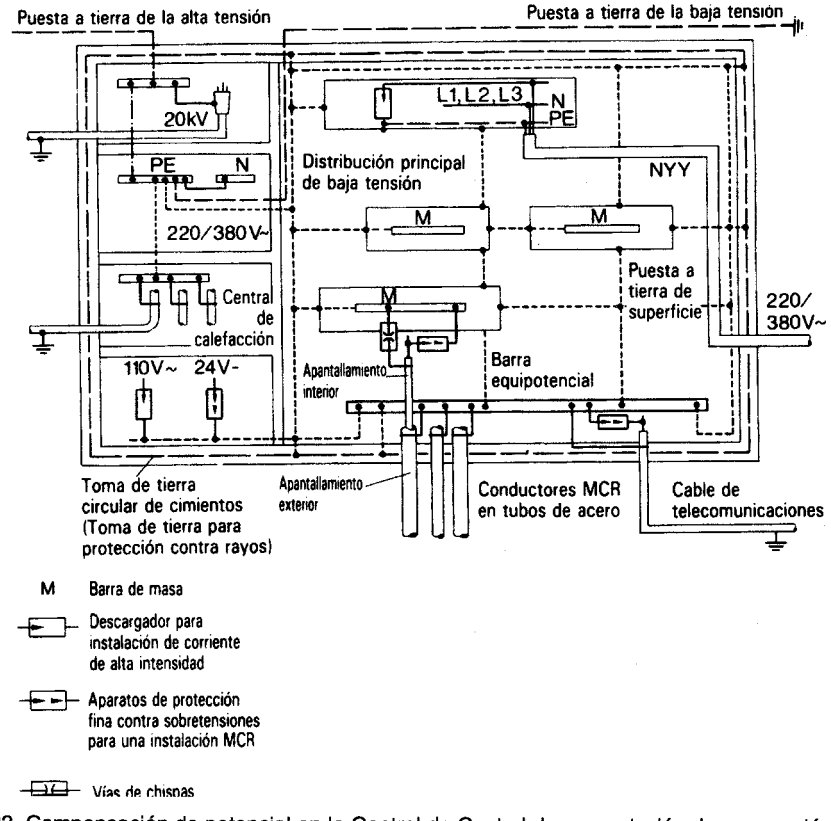


Figura 23. Compensación de potencial en la Central de Control de una estación de compresión de gas.

2.3.- Blindaje.

El blindaje o apantallamiento de edificios, locales y aparatos se encuentra entre las medidas preventivas para evitar formación de sobretensiones en el interior de los mismos. Las medidas de apantallamiento o blindaje, han de ser previstas, ya, al realizar el proyecto de la construcción, pues simplifican y facilitan la adopción de otras medidas posteriores de protección, p. ej. el empleo de aparatos de protección contra sobretensiones.

Un blindaje contra los campos electromagnéticos debe realizarse, siempre que sea posible, en forma de envolturas cerradas de superficies. Los conductores o cables eléctricos que penetren a través de este blindaje o apantallamiento se introducen a través de tubos de entrada metálicos, a los que se unen los blindajes metálicos de los cables, y en los que los conductores interiores de los cables se equipan con aparatos de protección contra sobretensiones, antes del punto de entrada.

2.3.1.- Blindaje de edificios.

Mediante la interconexión y la puesta a tierra de todos los componentes metálicos de un edificio (p. ej. elementos metálicos de las fachadas, armaduras de acero del hormigón, vigas y otros elementos portantes metálicos), se consigue un blindaje electromagnético de bastante importancia.

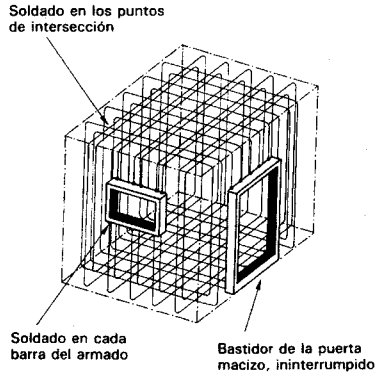


Figura 24. Representación esquemática de un apantallamiento realizado con armados de hormigón, con orificios.

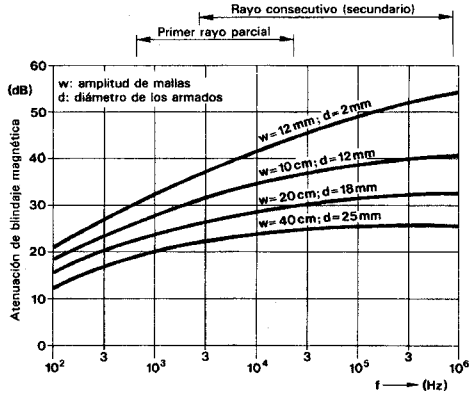


Figura 25. Medida de la atenuación de blindaje de un apantallamiento realizado con armados de hormigón.

En la figura 24, se muestra la forma de aprovechar la armadura de las estructuras metálicas del hormigón armado para el apantallamiento o blindaje del edificio. En la figura 25 se representa gráficamente la medida alcanzable de atenuación en el blindaje, en dependencia de la amplitud de mallas, del diámetro de los armados de acero en el hormigón y de la frecuencia.

En la figura 26 se ha representado la medida de atenuación de blindaje en el centro de un local apantallado, detrás de huecos.

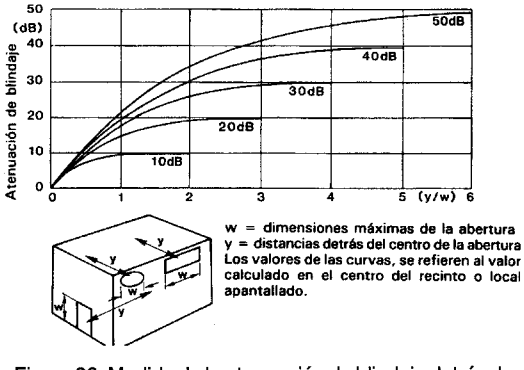
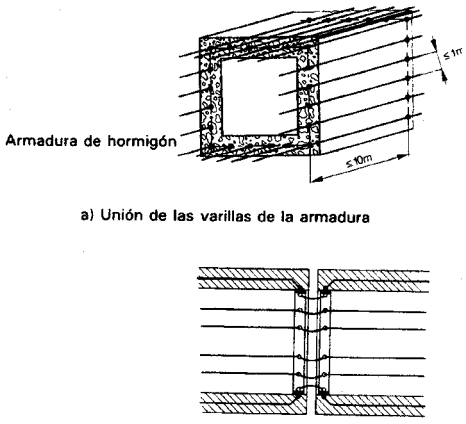


Figura 26. Medida de la atenuación de blindaje detrás de los orificios o aberturas en un local o recinto apantallado.

Cuando se conecten las instalaciones vecinas por medio de cables o conductores de energía o de información, éstos deben ser, de acuerdo con DIN VDE 0845, parte 1:

- Cables con estructura de protección contra rayos.
- Deben estar introducidos en tubos de acero de protección.
- Se habrán de introducir en canales para cables realizados en hormigón, con armadura de acero continua y conectada (figura 27).



a) Unión de las varillas de la armadura

b) Unión de las juntas de dilatación

Figura 27. Utilización de las armaduras del hormigón en canales de cables realizados en hormigón armado.

2.3.2.- Blindaje de locales.

Dentro de edificaciones constructivas, los recintos o locales en los que se encuentran dispositivos o equipos electrónicos muy sensibles, p. ej. equipos de proceso electrónico de datos, pueden protegerse con dispositivos de apantallamiento o blindaje que, con frecuencia, pueden instalarse a posteriori.

En la figura 28 se muestra, por ejemplo, un recinto en el que se encuentra una instalación de proceso de datos con 4 aparatos unidos entre sí por medio de conductores en forma de malla, y estando el local deficientemente apantallado o blindado. Los aparatos son alimentados por una red de energía exterior. A la instalación de datos llega un cable de señales apantallado, pero con un blindaje de realización desconocida y otro cable de señales sin blindaje alguno. Los cables de energía y de señales que entran en el recinto, lo hacen por puntos distintos del recinto de datos.

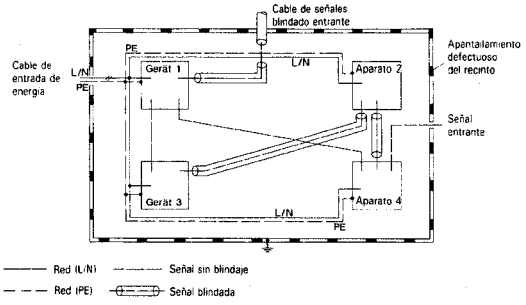


Figura 28. Instalación de datos con entrada incontrolada de cables.

En un primer paso, deberá optimizarse el apantallamiento del recinto de datos (figura 29). Por lo regular, el recinto suele estar rodeado por hormigón armado. El apantallamiento existente puede mejorarse y completarse en muchos casos; por ejemplo, uniendo el armado de piezas aisladas unas de otras realizadas en hormigón pretensado, o cerrando las aberturas de las ventanas por medio de rejas de malla ancha.

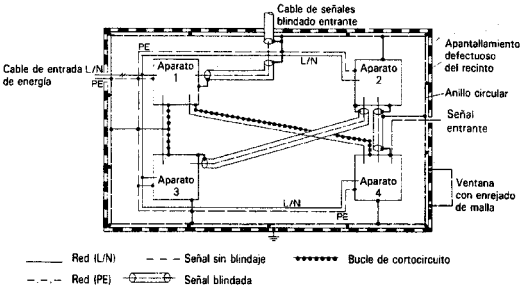


Figura 29. 1er Paso: Mejora del blindaje del recinto: colocación de un anillo circular. 2º Paso: Compensación de potencial superficial mediante bucles de cortocircuito.

En la parte interior del recinto resulta muy conveniente disponer un carril circular como barra de compensación de potencial continua, que deberá ser unida, con la mayor frecuencia posible, al apantallamiento del recinto.

En un segundo paso deberán enlazarse, lo más intensamente posible, las carcasas de los aparatos y los racks de aparatos, uniéndolos así mismo con el carril (barra) circular y con el apantallamiento del local. El conductor de protección (PE) del conductor de energía debe incluirse en el entrelazado de protección; con ello se logran automáticamente bucles de cortocircuito paralelos a los conductores activos de energía. Debe intentarse tender los cables internos de señales lo más próximos posible a las uniones conductoras puestas a tierra. Si se utilizaran cables de señales blindados, los blindajes deben conectarse en sus dos extremos.

Con las medidas que acabamos de indicar, se consigue una multitud de bucles de cortocircuito puestos a tierra, y con ello se logra una compensación de potencial en forma de mallas entrelazadas (figura 29).

En un tercer paso, los cables de energía y de señales entrantes se incluirán en la compensación de potencial con ayuda de la conexión de aparatos de protección contra sobretensiones dispuestos en el lugar de entrada de dichos cables, en el recinto de datos (figura 30).

Estos aparatos tienen la misión de controlar las sobretensiones y sobrecorrientes transmitidas por las líneas, para lo que se precisa una capacidad suficiente para soportar corrientes punta de choque.

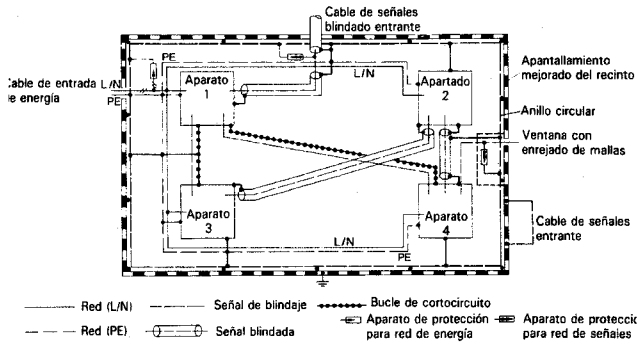


Figura 30. 3er Paso: Tratamiento de los cables entrantes.

En un cuarto paso se procederá al tratamiento de los cables de señales internos y de las entradas y salidas de datos (figura 31). Las entradas y salidas de las platinas electrónicas, deben estar equipadas, ya de fábrica, con elementos de protección fina (p. ej. diodos de transorción). Estos elementos de protección son necesarios, en cualquier caso, al efectuarse la conexión de cables o líneas procedentes del exterior, al igual que en el tendido de cables interiores no blindados, y en caso necesario, habrán de ser preconectados en las salidas o entradas correspondientes. Una protección adicional final en los aparatos resulta superflua cuando los cables interiores de señales están blindados suficientemente en los dos lados (de entrada y de salida).

El concepto que hemos expuesto aquí, sobre la base de una compensación de potencial entrelazada para entradas de cables incontroladas a un recinto de tratamiento de datos, representa un compromiso entre las exigencias relativas a la compatibilidad electromagnética de la instalación de proceso de datos para las averías o fallos causados por rayos o por procesos de

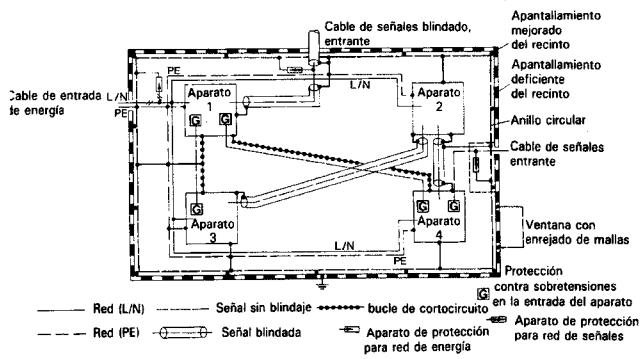


Figura 31. 4º Paso: Tratamiento de los cables internos de señales.

conmutación, y las prácticas de instalación más usuales, entre los instaladores de los equipos de proceso de datos, o respectivamente los usuarios de dichas instalaciones.

Al igual que en la técnica de la protección exterior contra rayos se ha impuesto la más amplia y extensa compensación de potencial, acreditándose como la medida de protección más efectiva, análogamente en la protección interior contra rayos, la interconexión lo más amplia posible de todas las partes de la instalación puestas e tierra, incluido el blindaje del recinto, es una exigencia asumible en la práctica, previa a la instalación y utilización de aparatos de protección contra sobretensiones.

2.3.3.- Apantallamiento de aparatos.

En primer lugar hay que asegurarse de que todos los aparatos que tengan componentes sensibles a las sobretensiones, y todas las líneas o cables de señales entre estos aparatos, estén rodeados de un "blindaje" continuo, estando realizado este blindaje mediante carcasas metálicas y revestimientos metálicos de los blindajes o apantallamientos de los cables.

Hay que prestar especial atención a que todas las entradas de los cables de red a los aparatos estén protegidas mediante conexión de los cables al "blindaje" por medio de aparatos de protección contra sobretensiones (figura 32). Las entradas y salidas de los cables de señales sólo habrán de ser equipadas con dispositivos de protección contra sobretensiones, cuando las tensiones transversales o longitudinales alcancen valores demasiado elevados.

Cuando se conecten entre sí aparatos, mediante cables no blindados, se hace necesaria una protección adicional, excesivamente costosa. Todos los hilos de los cables han de protegerse contra la carcasa, y también entre sí, mediante aparatos de protección contra sobretensiones (figura 32).

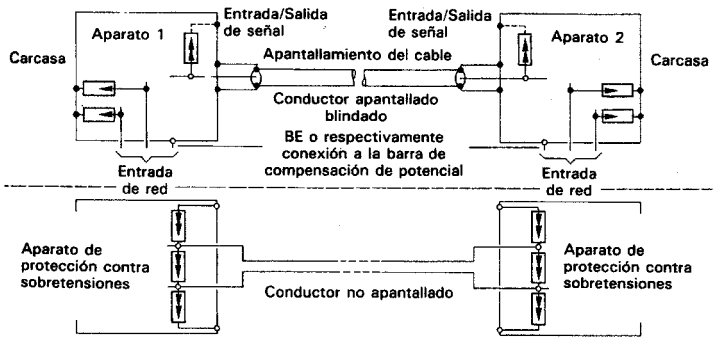


Figura 32. Protección contra sobretensiones para aparatos.

Cuando se realice la metalización de las superficies por los más diversos procedimientos (metalización por evaporación, precipitados metálicos químicos, lacados, procedimiento de metalización por proyección, etc.), para la consecución de blindajes metálicos, hay que asegurarse de que existe una aplicación suficiente del blindaje y que las características mecánicas cumplan las exigencias requeridas.

2.3.4.- Blindaje de conductores (líneas).

Para conseguir, precisamente en las redes de señales, que las tensiones longitudinales alcancen valores muy pequeños, la resistencia de choque de acoplo de los blindajes de los conductores debe ser lo suficientemente pequeña. Hay que tener en cuenta que la resistencia de choque de acoplo, en un blindaje, sólo puede ser efectiva si se encuentra correctamente conectada, y es bien conductora, a lo largo de todo el sentido longitudinal del cable; y además, en los dos extremos del blindaje, éste debe encontrarse conectado a la compensación de potencial para protección contra rayos.

Puede conseguirse un blindaje continuo tendiendo los cables en canales para cables realizados en hormigón, y cuyos armados de hierro estén correctamente unidos.

En los edificios se consigue así mismo un blindaje suficiente, mediante la interconexión de caballetes metálicos para cables, y el recubrimiento con tapas de chapas de acero unidas entre sí. El uso de estos sistemas de blindaje, que comporta altos gastos, o bien el inclinarse preferiblemente por aparatos limitadores de tensión (que con frecuencia han de utilizarse de todos modos para limitar las tensiones transversales) es algo que habrá de decidirse para cada caso en particular.

3.- ELEMENTOS Y APARATOS PARA LA PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES FUNCIONAMIENTO Y CAMPO DE APLICACIÓN.

Los aparatos de protección contra sobretensiones (denominados,"Descargadores de sobretensiones" en la norma DIN VDE 0845), son los elementos, circuitos de protección y aparatos que limitan las sobretensiones que se puedan presentar en las instalaciones, a valores permitidos.

Los elementos constructivos que se emplean en la actualidad para circuitos de protección y en los aparatos de protección contra sobretensiones, son:

- Vías de descarga.
- Varistores.
- Diodos supresores.

4.- COORDINACIÓN DEL AISLAMIENTO EN INSTALACIONES DE BAJA TENSIÓN.

Según las disposiciones IEC 664 y 664 A, así como según las normas DIN VDE 0109 y 0110, la coordinación del aislamiento es la sincronización de las propiedades eléctricas de los aislamientos de los medios de servicio de una instalación, con el objeto de evitar daños, provocados por fallos en el aislamiento, que podrían dar lugar a daños en vidas humanas y a daños materiales, llevando la protección hasta el máximo técnico alcanzable y económicamente defendible. Este objetivo puede conseguirse, entre otras cosas, p. ej. mediante un dimensionado de los tendidos aéreos de acuerdo con las sobretensiones que se pudieran esperar, y teniendo en cuenta los valores característicos de los aparatos de protección contra sobretensiones eventualmente utilizados. Indicativo para el dimensionado de los tendidos de líneas son las tensiones de choque según la tabla 4. Las tensiones de choque para dimensionado se calculan entonces de acuerdo con la clase de sobretensiones y según el ámbito de la tensión nominal del medio de servicio.

Para la coordinación de los medios de servicio a los distintos tipos de sobretensiones, hay que tener en consideración:

- sobretensiones, que penetran desde el exterior en el medio de servicio a través de las bornes de conexión;

- sobretensiones generadas en el medio de servicio mismo, y que se producen en las bornes de conexión.

Tensiones Conductor-Tierra en V Derivadas de Tensiones Nominales de red de hasta Ueff y U	Dimensionado de Tensión de choque en V para clases de sobretensiones			
	I	II	III	IV
50	330	500	800	1500
100	500	800	1500	2500
150	800	1500	2500	4000
300	1500	2500	4000	6000
600	2500	4000	6000	8000
1000	4000	6000	8000	12000

Tabla 4. Dimensionado de tensiones de choque, según DIN VDE 0110.

Según DIN VDE 0110, parte 2, el valor de sobretensión prevista en un determinado medio de servicio se fija como sigue:

1º. Medios de servicio con valor de sobretensiones I: están previstos para utilización, únicamente en aparatos o en instalaciones en las que no se pueden presentar sobretensiones, o que se encuentren protegidos especialmente contra sobretensiones por medio de descargadores de sobretensiones, filtros o capacidades.

Observación: los medios de servicio de esta clase suelen funcionar con pequeñas tensiones.

2º. Medios de servicio con valor de sobretensiones II: para empleo en instalaciones o partes de instalaciones en las que no hay que tener en consideración las sobretensiones de rayo.

Observación: Entre los aparatos de esta clase, se incluyen los electrodomésticos.

3º. Medios de servicio con valor de sobretensiones III: destinados al empleo en instalaciones en las que no es necesario tener en cuenta las sobretensiones de rayo, pero en las que, debido a las exigencias especiales a dichos medios de servicio o a las redes dependientes de ellos con respecto a la seguridad y disponibilidad, se hace necesaria la adopción de medidas especiales de protección.

Observación: a este grupo pertenecen medios operativos o de servicio para instalaciones fijas, p. ej.: dispositivos de protección, relés, contactores, interruptores, enchufes y cajas de enchufes.

4º. Medios de servicio con valor de sobretensiones IV: destinados al empleo en instalaciones en las que hay que tener en cuenta el peligro de las sobretensiones de rayo.

El informe IEC 664 contiene una representación esquemática, muy clara, de las exigencias y disposiciones anteriores (figura 33).

Según las normas citadas las sobretensiones que se puedan producir en una instalación de este tipo en los puntos de intersección, o puntos de enlace, pueden ser controladas e influenciadas por medio de los adecuados dispositivos de protección contra sobretensiones.

Está autorizado, incluso, el dimensionar líneas aéreas, de acuerdo con la categoría de sobretensiones inmediatamente inferior, si las sobretensiones transitorias que se produzcan pueden limitarse con ayuda del montaje de aparatos de protección contra sobretensiones, que limiten dichas sobretensiones a los valores autorizados para la categoría en cuestión.

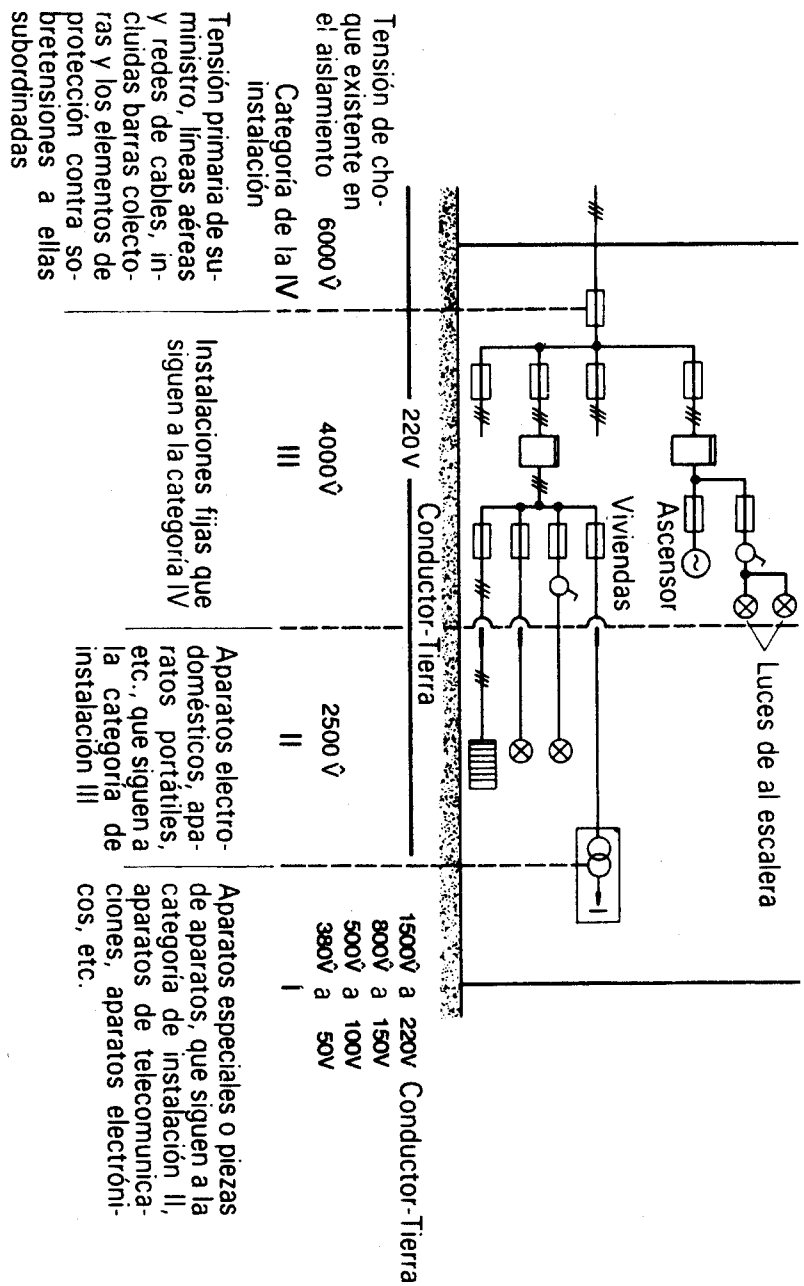
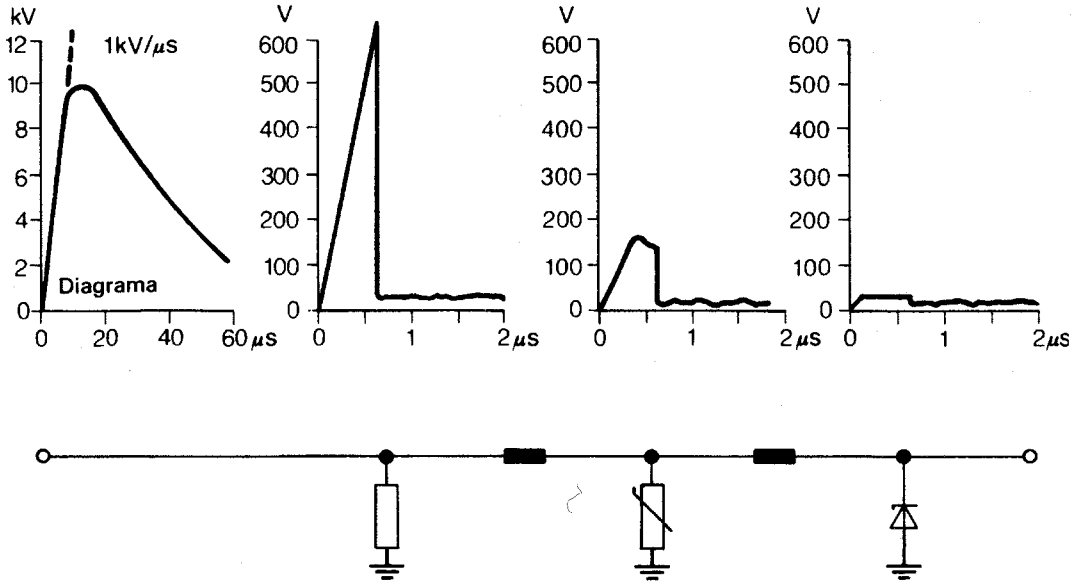


Figura 33. Valores preferenciales para tensiones de choque en las diferentes categorías de instalaciones según IEC, publicación 664 equivalente a DIN VDE 0110.

4.1.- Coordinación de los elementos de protección.

Los elementos de protección -vía de chispas, varistor, diodo supresor fundamentalmente contra sobretensiones pueden utilizarse coordinados en forma de protección escalonada aprovechado su distinto comportamiento. De esta forma se consiguen los una protección escalonada, con los niveles de protección regulados y adaptados, tal y como se muestra en la figura 34.



	Vía de chispas	Varistor (MOV)	Diodo-Supresor
Corriente de choque de derivación hasta	50 kA	5 kA	0,2 kA
Tiempo de respuesta	500 ns	< 25 ns	< 10 ps
U/I- Característica	simétrica		asimétrica
Nivel de protección	65 V hasta 12000 V	20 V hasta 2000 V	6 V hasta 190 V
Capacidad de absorción de la energía	hasta 60 J	hasta 1800 J	hasta 1 J
Carga continuada	– – –	hasta 1,2 W	hasta 1 W
Capacidad	1 pF hasta 7 pF	40 pF hasta 15000 pF	300 pF hasta 12000 pF
Corriente de fuga	< 15 μA	< 0,2 mA	< 5 μA

Figura 34. Protección escalonada.

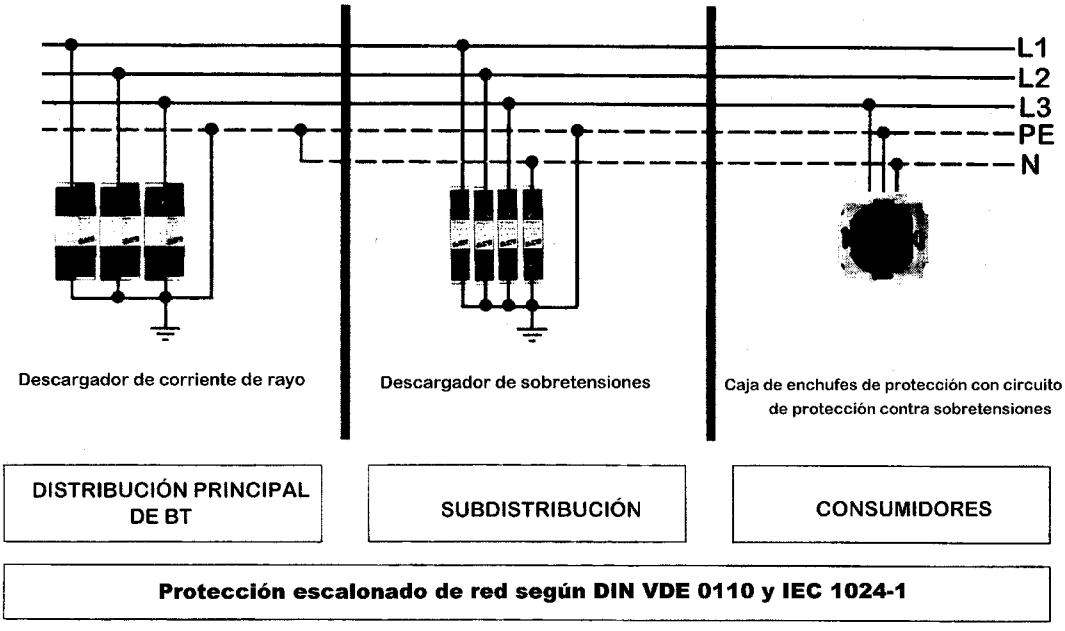


Figura 35. Ejemplo de protección escalonada con descargadores de B.T..

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Allen J. Wood. *'Power generation operation and control'.* Ed. Wiley Interscience, 1996.
- Arrillaga J. and C.P. Arnold. *'Computer analysis of power systems'.*Ed. Wiley, 1995.
- Catálogos de interruptores automáticos de ABB Metron S.A., Unelec, Siemens, Groupe Schneider, Medex, ect..
- CEI 781: *Guía de aplicación para el cálculo de las corrientes de cortocircuito sobre redes de baja tensión radiales.*
- CEI 909: *Cálculo de las corrientes de cortocircuito en redes trifásicas de corriente alterna.*
- Cervera A. y Roger J. 'Centrales eléctricas II. Protección e instalaciones eléctricas en media y alta tensión'. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia 1987.
- Cortes Cherta. *'Curso de aparamenta eléctrica de maniobra'.* Centro de formación de Merlin Gerin, 1990.
- Fraile Mora, Jesús. *'Introducción a las instalaciones eléctricas'.* Ed. Colección Escuelas, Enero 1993.
- Guerrero Alberto 'Instalaciones eléctricas en las edificaciones'. Ed. Mc Graw Hill. Madrid 1996.
- Hörning/Schneider. *'Normas VDE 0100 de protección eléctrica'.* Ed. Marcombo.
- Jornadas Técnicas sobre corrección del factor de potencia. C.Y.D.E.S.A., 1993.
- Llorente Antón M. 'Cables eléctricos aislados'. Ed. Paraninfo. Madrid 1994.
- López A. y Guerrero Strachan. 'Instalaciones eléctricas para proyectos y obras'. Ed. Paraninfo. Madrid 1993.
- Marc Serpinet y Robert Morel. *'La selectividad energética en baja tensión'.* Groupe Schneider.
- Martín Sánchez, F.. *'Instalaciones eléctricas y de transporte'.* Tomos I, II. Ed. Escuela de edificación, 1989.
- Mila Enrique. *'Interruptores automáticos limitadores'.* Merlin Gerin
- Mila Enrique. *'Cálculo práctico de la corriente de cortocircuito'.* Merlin Gerin.
- Mila Enrique. *'Selectividad de las protecciones de baja tensión'.* Merlin Gerin.
- Montané, Paulino. *'Protección en las instalaciones eléctricas'.* Ed. Marcombo. 1993.
- Moreno Clemente, Julián. *'Instalaciones de puesta a tierra en centros de transformación'.* Málaga, 1991.
- Normas Tecnológicas de Edificaciones: Instalaciones Eléctricas, Centros de Transformación y Puesta a tierra.
- Peter Hasse. *'Protección contra sobretensiones en baja tensión'.* Ed. Paraninfo. Madrid 1991.

- Proyecto tipo UNESA- Centros de Transformación en edificios.
- Ramírez Vázquez, José. *'Instalaciones eléctricas generales'.* Ed. Enciclopedia Ceac de la electricidad.
- Recomendaciones UNESA- RU6404A- RU5201C RU6302A- RU3407B - RU3401B- RU3405B.
- Reglamento de verificaciones eléctricas.
- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión. Ministerio de Industria y Energía.
- Reglamento de acometidas eléctricas.
- Reglamento sobre condiciones Técnicas y Garantías de Seguridad en Centrales, Subestaciones y Centros de Transformación.
- Roeper, Richard. *'Corrientes de cortocircuito en redes trifásicas'.* Ed. Marcombo. 1985.
- Smith, Alan. *'Handbook of Eletrical Installation Practice'.* Ed. Blackwell Science, 1995.
- Syed A. Nasar. *'Sistemas eléctricos de potencia'.* Ed. McGRAW-HILL, 1990.
- Thiriet Zuza, Armado. *'Cálculo de redes abiertas y malladas por el método de momentos eléctricos.* Universidad de Sevilla.
- Toledano Gasca José C. y Martínez Requena Juan J.. 'Puesta a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas'. Ed. Paraninfo. Madrid 1997.
- Toledano Gasca José C. y Luna Alonso A. 'Acometidas eléctricas'. Ed. Paraninfo. Madrid 1996.
- UNE 20.460: Instalaciones eléctricas en edificios.
- Weedy B.M. *'Sistemas eléctricos de gran potencia'.* Ed. Reverté, 1982.