

Antonio Fayos Alvarez

**LÍNEAS ELÉCTRICAS Y
TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

© Antonio Fayos Álvarez

© 2009, Editorial Universitat Politècnica de València

distribución: Telf.: 963 877 012 / www.lalibreria.upv.es / Ref.: 4062_04_01_10

Maquetación: Triskelion diseny editorial

Imprime: Byprint Percom, sl

ISBN: 978-84-8363-436-3

Depósito Legal: V-2640-2009

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edicion@editorial.upv.es.

Impreso en España

Quien hace lo que ama y ama lo que hace, es afortunado.
Dedicado a mi mujer y mis hijos.

PRÓLOGO

Este libro pretende ayudar a los estudiantes de Ingeniería Eléctrica a ampliar y afianzar sus conocimientos en el campo de las Líneas Eléctricas y por tanto en el Transporte de Energía Eléctrica, teniendo en cuenta que toda obra es mejorable.

Se ha distribuido en siete temas cuyos objetivos son:

- TEMA nº 1:** Justificar que la manera idónea de transportar la energía eléctrica, es bajo la forma de corriente alterna trifásica, esto hasta tensiones de 400 kV y longitudes de línea hasta los 500 km, estos límites son aproximados.
- TEMA nº 2:** Conocer los distintos tipos de cables aislados y sus características, así como el cálculo eléctrico de líneas óhmicas, aquellas líneas en las que son preponderantes los efectos óhmicos.
- TEMA nº 3:** Considerar los efectos inductivos, con la determinación de los coeficientes de autoinducción y en resumen el cálculo eléctrico de líneas con efectos óhmicos e inductivos, por tanto líneas de Baja Tensión de sección considerable y líneas aéreas de Alta Tensión.
- TEMA nº 4:** Determinar las capacidades que aparecen en los conductores de las líneas eléctricas así como el efecto corona y las pérdidas asociadas a este efecto.
- TEMA nº 5:** Cálculo eléctrico de las grandes líneas de Transporte de Energía considerando los efectos: óhmicos, inductivos y capacitivos, bien como cuadripolo o de manera más exacta considerando los parámetros distribuidos de la línea.
- TEMA nº 6:** Se concreta en este tema la regulación de la tensión en las líneas eléctrica para mantener este valor dentro de los límites que marca la legislación vigente.
- TEMA nº 7:** Para finalizar se definen los esfuerzos que aparecen tanto en los conductores, como en los apoyos, por tanto el cálculo mecánico de las líneas aéreas y por ultimo el diseño de los sistemas de puesta a tierra de los apoyos.

Solamente expresar mi agradecimiento a todos los que nos precedieron por sus esfuerzos, haciendo extensivo el mismo a las empresas que se dedican al Transporte de Energía, especialmente a IBERDROLA.

Cualquier mérito de este libro no se puede atribuir al autor y si todos sus errores.

ÍNDICE

TEMA 1. BASES ECONÓMICAS DEL TRANSPORTE DE ENERGÍA	9
1.1. TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	11
1.2. BASES ECONÓMICAS DEL TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA: ECUACIÓN FUNDAMENTAL.....	16
1.3. SECCIÓN MÁS ECONÓMICA DE UN CONDUCTOR: REGLA DE KELVIN.....	24
1.4. INFLUENCIA DE LA NATURALEZA DE LA CORRIENTE EN LA SECCIÓN Y PESO DE LOS CONDUCTORES	28
 TEMA 2. CABLES ELÉCTRICOS. CÁLCULO ELÉCTRICO DE LÍNEAS OHMICAS	 33
2.1. CABLES ELÉCTRICOS: GENERALIDADES.....	35
2.2. COMPONENTES DE UN CABLE ELÉCTRICO.....	38
2.3. RESISTENCIA DE UN CONDUCTOR.....	48
2.4. RESISTENCIA Y REACTANCIA EFECTIVA	52
2.5. CAPACIDAD: REACTANCIA CAPACITIVA	58
2.6. MATERIALES AISLANTES: PARÁMETROS ELÉCTRICOS	63
2.7. PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN LOS CABLES	68
2.8. PARÁMETROS TÉRMICOS DE LOS CABLES	74
2.9. RESISTENCIA TÉRMICA DE UN CABLE.....	81
2.10. CAPACIDAD DE CARGA TÉRMICAMENTE ADMISIBLE.....	83
2.11. CAPACIDAD DE CARGA EN SERVICIO PERMANENTE	84
2.12. CURVA DE CALENTAMIENTO DE UN CONDUCTOR	87
2.13. CAPACIDAD DE CARGA EN SERVICIO DE CORTA DURACIÓN	92
2.14. CAPACIDAD DE CARGA EN SERVICIO INTERMITENTE.....	94
2.15. CAPACIDAD DE CARGA EN CORTOCIRCUITO	95
2.16. DETERMINACIÓN DE LA SECCIÓN POR CAÍDA DE TENSIÓN.....	104
2.17. DESIGNACIÓN DE LOS CABLES	106
2.18. CÁLCULO ELÉCTRICO DE LÍNEAS ÓHMICAS.....	111
2.19. SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES DE UNA LÍNEA ÓHMICA	111
2.20. SECCIÓN MÍNIMA DE UN CONDUCTOR ATENDIENDO A LA ELEVACIÓN DE TEMPERATURA	116

2.21. SECCIÓN DE UN CONDUCTOR ATENDIENDO A LA CAÍDA DE TENSIÓN	118
2.22. SECCIONES MÍNIMAS REGLAMENTARIAS: DENSIDAD MÁXIMA ADMISIBLE	122
2.23. LÍNEAS DE CORRIENTE CONTINUA.....	130
2.24. LÍNEAS DE CORRIENTE ALTERNA MONOFÁSICA.....	132
2.25. LÍNEAS DE CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA	136
2.26. PROTECCIÓN DE LÍNEAS Y CABLES EN BAJA TENSIÓN	137
 TEMA 3. CÁLCULO DE LÍNEAS ELÉCTRICAS CON EFECTOS ÓHMICOS E INDUCTIVOS.....	 147
3.1. LÍNEAS INDUCTIVAS: EFECTOS DEL CAMPO MAGNÉTICO EN LOS CONDUCTORES.....	149
3.2. EFECTO SUPERFICIAL: RESISTENCIA EFECTIVA.....	149
3.3. AUTOINDUCCIÓN EN UN CONDUCTOR	155
3.4. INDUCCIÓN MUTUA EN LOS CONDUCTORES	158
3.5. CAÍDA DE TENSIÓN EN LÍNEAS MONOFÁSICAS Y TRIFÁSICAS: AUTOINDUCCIÓN APARENTE Y FACTOR DE IMPEDANCIA.....	161
3.6. DEDUCCIÓN DE LA FORMULA DEL COEFICIENTE DE AUTOINDUCCIÓN APARENTE EN UNA LÍNEA MONOFÁSICA.....	165
3.7. COEFICIENTE DE AUTOINDUCCIÓN APARENTE EN LÍNEAS TRIFÁSICAS SIMÉTRICAS SENCILLAS	176
3.8. COEFICIENTE DE AUTOINDUCCIÓN APARENTE EN LÍNEAS TRIFÁSICAS SIMÉTRICAS DOBLE.....	181
3.9. LÍNEAS ASIMÉTRICAS SENCILLAS Y DOBLES: TRANSPOSICIÓN DE CONDUCTORES.....	189
3.10. COEFICIENTE DE AUTOINDUCCIÓN EN LÍNEAS CON CONDUCTORES MÚLTIPLES O EN HAZ.....	198
3.11. CÁLCULO ELÉCTRICO DE LÍNEAS CON EFECTOS ÓHMICOS E INDUCTIVOS	202
3.12. RESISTENCIA Y REACTANCIA EFECTIVA PARA CABLES CON PANTALLAS O ARMADURAS	206
3.13. ELEMENTOS DE MANIOBRA Y PROTECCIÓN EN LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN	212
3.14. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA DE LAS PANTALLAS EN LOS CABLES AISLADOS DE A.T.	225
3.15. CÁLCULO DE LAS TENSIONES INDUCIDAS EN LAS PANTALLAS EN LOS CABLES AISLADOS.....	234

TEMA 4. LÍNEAS CAPACITIVAS	241
4.1. EFECTOS DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LOS CONDUCTORES	243
4.2. CAPACIDAD EN LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS	244
4.3. CAPACIDAD ESPECÍFICA EN UNA LÍNEA AÉREA MONOFÁSICA	245
4.4. CAPACIDAD ESPECÍFICA EN LÍNEAS AÉREAS TRIFÁSICAS SENCILLAS Y DOBLES	254
4.5. INFLUENCIA DEL CONDUCTOR DE TIERRA.....	270
4.6. CAPACIDAD EN LÍNEAS SUBTERRÁNEA: CABLES UNIPOLARES, BIPOLARES Y TRIPOLARES	290
4.7. PERDITANCIA.....	302
4.8. EFECTO CORONA EN LAS LÍNEAS AÉREAS: CÁLCULO DE LA TENSIÓN CRÍTICA Y DE LAS PÉRDIDAS ESPECÍFICAS	306
4.9. RECURSOS ANTICORONA.....	316
4.10. CONDUCTORES MÚLTIPLES POR FASE Y CIRCUITO: RADIO EQUIVALENTE.....	317
4.11. ESTUDIO DEL EFECTO DE LA CAPACIDAD EN UNA LÍNEA ABIERTA: EFECTO FERRANTI Y AUTOEXCITACIÓN DE ALTERNADORES.....	320
 TEMA 5. CÁLCULO ELÉCTRICO DE LÍNEAS CAPACITIVAS.....	 325
5.1. CÁLCULO DE LÍNEAS CAPACITIVAS: MÉTODOS DE CÁLCULO	327
5.2. SUSTITUCIÓN DE UNA LÍNEA POR CUADRIPOLOS EQUIVALENTES.....	328
5.3. MÉTODO DEL CUADRIPOLO EN T: DIAGRAMA VECTORIAL A PLENA CARGA, CAÍDA DE TENSIÓN Y POTENCIA APARENTE MÍNIMA	329
5.4. MÉTODO DEL CUADRIPOLO EN JI	338
5.5. CÁLCULO POR YUXTAPOSICIÓN DE CUADRIPOLOS	346
5.6. ESTUDIO ANALÍTICO DE UNA LÍNEA CON PARÁMETROS DISTRIBUIDOS Y RÉGIMEN PERMANENTE: CONSTANTES DE PROPAGACIÓN E IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA.....	347
5.7. POTENCIA CARACTERÍSTICA DE UNA LÍNEA	360
5.8. RELACIÓN TENSIÓN-POTENCIA: POTENCIA MÁXIMA	365
5.9. CÁLCULO DE LÍNEAS RAMIFICADAS ALIMENTADAS POR UNO O DOS EXTREMOS	373

TEMA 6. REGULACIÓN DE LA TENSIÓN EN LAS LÍNEAS DE TRANSPORTE	379
6.1. REGULACIÓN DE LA TENSIÓN EN LAS LÍNEAS DE TRANSPORTE ...	381
6.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE REGULACIÓN.....	382
6.3. CÁLCULO DE LA POTENCIA NECESARIA PARA REGULAR LA TENSIÓN.....	396
6.4. COMPENSACIÓN DE LA LÍNEA CON PARÁMETROS DISTRIBUIDOS...	399
 TEMA 7. CÁLCULOS MECÁNICOS EN LÍNEAS AÉREAS. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.....	 403
7.1. ECUACIÓN GENERAL DE UN CONDUCTOR TENDIDO ENTRE DOS PUNTOS: CATENARIA, VANO Y FLECHA.....	405
7.2. FUERZA TENSORA: LONGITUD DEL CONDUCTOR	421
7.3. ECUACIÓN DE CAMBIO DE CONDICIONES	423
7.4. SOBRECARGAS EN LOS CONDUCTORES: PRESIÓN DEL VIENTO Y PESO DEL MANGUITO DE HIELO.....	425
7.5. RESOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE CAMBIO DE CONDICIONES .	433
7.6. VIBRACIONES EN LOS CONDUCTORES AÉREOS.....	441
7.7. VANO IDEAL DE REGULACIÓN: TABLAS PARA EL TENDIDO DE LÍNEAS	446
7.8. FLECHA MÁXIMA Y VANO MÁXIMO ADMISIBLE.....	459
7.9. DISTANCIAS DE SEGURIDAD	464
7.10. DESVIACIÓN TRANSVERSAL A LÍNEA DE UNA CADENA DE AISLADORES DE SUSPENSIÓN DEBIDA A LA ACCIÓN DEL VIENTO....	469
7.11. DISTRIBUCIÓN Y ALTURA DE LOS APOYOS: CURVAS DE FLECHAS MÁXIMA Y MÍNIMA VERTICAL	482
7.12. CADENA DE SUSPENSIÓN SOMETIDA A SOLICITACIÓN ASCENDENTE	489
7.13. CÁLCULO DE VANOS DE GRAN LONGITUD	495
7.14. NIVEL DE AISLAMIENTO: CÁLCULO MECÁNICO DE AISLADORES...	498
7.15. ESFUERZOS EN LOS APOYOS: CONSIDERACIONES GENERALES ...	511
7.16. APOYOS PARA M.T.: TIPOS Y PARTICULARIDADES DE CÁLCULO...	536
7.17. ESQUEMA PARA EL CÁLCULO DE APOYOS EN LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN	554
7.18. DIAGRAMAS L.N.S.	583
7.19. CÁLCULO DE CIMENTACIONES	595
7.20. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA	609
 BIBLIOGRAFÍA.....	 659

TEMA 1

BASES ECONÓMICAS DEL TRANSPORTE DE ENERGÍA

1.1. TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	11
1.2. BASES ECONÓMICAS DEL TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA: ECUACIÓN FUNDAMENTAL.....	16
1.3. SECCIÓN MÁS ECONÓMICA DE UN CONDUCTOR: REGLA DE KELVIN...	24
1.4. INFLUENCIA DE LA NATURALEZA DE LA CORRIENTE EN LA SECCIÓN Y PESO DE LOS CONDUCTORES.....	28

1.1. TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Actualmente la energía eléctrica constituye la variante energética ideal para la distribución y el transporte de energía desde los sistemas de producción a los de consumo.

El objetivo fundamental de un sistema eléctrico de potencia es el de suministrar energía eléctrica a diferentes consumidores y ello hace que este sistema este constituido por los siguientes elementos:

- * Máquinas sincrónicas y asincrónicas.
- * Líneas eléctricas.
- * Transformadores y autotransformadores.
- * Receptores.

Analicemos someramente cada uno de los elementos de un sistema eléctrico de potencia:

* **Maquina sincrónica:** son fundamentalmente los generadores de corriente alterna, denominados también alternadores, que desde el punto de vista constructivo los podemos clasificar en:

- Polos salientes: velocidad reducida empleados en centrales hidráulicas.
- Polos encastrados o turboalternadores: velocidad elevada, empleados en centrales térmicas.

También forman parte de las máquinas sincrónicas, los motores sincrónicos y compensadores, aunque en la actualidad los compensadores sincrónicos están en desuso. La aplicación de dichas máquinas es la regulación de la tensión del sistema eléctrico de potencia y del factor de potencia, con el fin de cuidar la calidad en el suministro de tensión y por tanto mantener el sistema estable. También en un sistema eléctrico de potencia puede aparecer la máquina sincrónica funcionando como motor, es el mismo alternador funcionado de forma reversible, que en los momentos de bajo consumo, por ejemplo por la noche, actúan como motores haciendo girar el rodete de la turbina, que pasa en estas condiciones a funcionar como bomba elevando el agua a su lugar de origen o a un deposito superior y a la vez consumiendo el sobrante de energía. Este funcionamiento es el propio de las centrales de bombeo y de este modo se consigue un doble objetivo: contribuir a la estabilización del sistema y almacenar energía eléctrica.

* **Maquina asincrónica:** son los generadores de corriente alterna empleados en los aerogeneradores, son máquinas asincrónicas de rotor bobinado.

* **Líneas eléctricas:** la no coincidencia de los centros de producción y consumo, hace necesario el transporte de la energía generada y constituyen el medio físico con el que se realiza el transporte de energía, existen dos posibles variantes:

- Líneas aéreas.
- Líneas subterráneas.

* **Transformadores y autotransformadores:** para posibilitar el transporte de grandes potencias a grandes distancias, es necesario elevar la tensión, de aquí la necesidad de conectar transformadores o autotransformadores en principio y final de la línea de transporte de energía eléctrica.

* **Receptores:** son las propias instalaciones que utilizarán la energía eléctrica

Las líneas eléctricas aparecen agrupadas formando lo que se denomina "Redes eléctricas" las cuales se pueden clasificar, según dos aspectos:

- * a) Atendiendo a la tensión de la red.
- * b) Atendiendo a la estructura de la red.

* **a) Atendiendo a la tensión:**

Todo sistema eléctrico de potencia está dividido en cuatro niveles de tensión entrelazados entre si, por medio de las estaciones y subestaciones transformadoras, siendo los siguientes:

- * Generación.
- * Transporte e interconexión.
- * Subtransporte.
- * Distribución.

* **Generación:**

El nivel de tensión de generación, es decir de las centrales productoras de energía eléctrica no suele superar los 25 kV. Estas centrales se conectan a través de las estaciones transformadoras a redes del nivel de transporte o interconexión, aunque en algunos casos pueden estar conectadas al nivel de subtransporte, como ocurre con algunas centrales térmicas convencionales y centrales hidráulicas pequeñas.

* **Transporte e interconexión:**

Es necesario destacar la existencia de estas dos funciones diferentes a pesar de que en la práctica se pueden encontrar superpuestas en una misma línea. Así se dice que una línea es de transporte, o realiza dicha función, cuando une un centro de

producción de energía con un centro de consumo, circulando la potencia en este caso, siempre en el mismo sentido y dependiendo su valor, de la propia demanda de energía del centro de consumo. Una línea es de interconexión, en el caso mas simple, cuando une dos centros compuestos por centro de producción y de consumo por tanto la potencia que circula por dicha línea puede discurrir con sentidos opuestos.

Las líneas de interconexión vienen justificadas por un doble motivo: de tipo económico y de tipo eléctrico. Los niveles de tensión que se utilizan en el transporte e interconexión son:

- **España:** 400 y 220 kV.
- **Francia:** 400, 225 y 150 kV.
- **Inglaterra:** 400, 275 y 150 kV.
- **Alemania:** 400, 220 y 110 kV.
- **Rusia:** 1150, 750, 500, 400, 330 y 220 kV.
- **U.S.A.:** 800, 765, 500, 460, 400, 345, 287 y 230 kV.
- **Canadá:** 735, 315 y 120 kV.

En todos estos países la frecuencia es de 50 Hz a excepción de U.S.A. que es de 60 Hz. hay que tener presente que las líneas de transporte son de gran longitud en la mayoría de los casos, ya que unen centrales importantes, a veces, situadas a centenares de kilómetros de los centros de consumo.

Para mayor información recomendamos ver el mapa de "Red eléctrica de España", puesto que ella es la encargada de gestionar estas redes, estas líneas son las denominadas líneas de categoría especial según el artículo 3 del reglamento.

A tener en cuenta que en Europa el nivel de transporte se fija en 400 kV con el fin de intercambios económicos de energía eléctrica, puesto que la energía eléctrica no puede almacenarse en grandes cantidades.

Los intercambios de energía entre países europeos a través de líneas de interconexión son debidos a:

- Desfases de puntas de consumo. Por ejemplo Francia e Inglaterra.
- Por diferencias de estructuras de medios de producción. Por ejemplo entre Suiza y Alemania o Suiza y Francia.
- Por diferencia de regímenes hidráulicos. Por ejemplo entre Francia y España.

*** Subtransporte:**

Se distribuye la energía eléctrica con unos niveles de tensión que oscilan entre 132 y 30 kV, a dicho nivel están conectados los grandes consumidores y desde el se alimenta la red de distribución, estas líneas pertenecen normalmente a las compañías eléctricas de distribución (Iberdrola, Union-Fenosa, Endesa, etc)

*** Distribución:**

El objetivo final del sistema eléctrico de potencia, la tensión utilizada es de 20 kV y con dicha tensión se alimentan medianos y pequeños consumidores, los cuales a su vez utilizan las subestaciones transformadoras que convierten los 20 kV en 400 V o 230 V, perteneciendo estas redes a las compañías de distribución de energía eléctrica.

*** b) Atendiendo a la estructura:**

Según el tipo de estructura que forman las líneas eléctricas tenemos:

* Radial o abierta.

* Anillo o cerrada.

* Mallada.

*** Red radial o abierta:**

Se caracteriza por tener un centro de alimentación, de el parten varias líneas de transporte que se ramifican en redes de distribución y reparto. La red por tanto será radial o abierta cuando ninguna línea regresa al centro de producción y no tiene redes de interconexión. En general las líneas de transporte que parten del centro no son muy numerosas. Es la red de coste e índice de seguridad mas bajo, empleándose en sistemas receptores de potencia no muy elevada y de densidad muy baja en cuanto a puntos de recepción. Es el tipo de red que inicia un sistema de electrificación recién nacido.

*** Red en anillo o cerrada:**

Presenta diferentes puntos de producción que se interconectan formando una línea cerrada de la que parten las líneas de subtransporte y distribución. Presenta generalmente un solo bucle. El coste es más elevado que en la radial, pero su seguridad es mucho mayor, quedando asegurada la instalación aún en caso de avería en las líneas de interconexión.

*** Red mallada:**

Es el tipo más complejo, presenta las mismas ventajas que las redes en anillo pero acentuadas siendo la más costosa y de mayor seguridad, suponiendo la culminación de una red eléctrica.

Es indicada cuando una red eléctrica presenta una densidad de receptores elevada y la seguridad en el suministro en consecuencia también deberá ser elevada, cubriendo áreas de gran potencia.

La elección será siempre la red radial, pasando a la red en anillo y por último la red mallada. Queda por último por definir cuales son las tensiones normalizadas y las tensiones mas elevadas que se pueden presentar en las líneas eléctricas que van a caracterizar el tipo de línea, dichas tensiones vienen reseñadas en el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias, en concreto en el apartado 1.2 de la ITC-LAT 06 o en el apartado 1.2 de la ITC-LAT 07, ambos son coincidentes, que reproducimos a continuación.

Tabla 1. Tensiones nominales normalizadas

TENSIÓN NOMINAL DE LA RED (U_n) kV	TENSIÓN MAS ELEVADA DE LA RED (U_s) kV
3	3,6
6	7,2
10	12
15	17,5
20*	24
25	30
30	36
45	52
66*	72,5
110	123
132*	145
150	170
220*	245
400*	420

* Tensiones de uso preferente en redes eléctricas de transporte y distribución.

1.2. BASES ECONÓMICAS DEL TRANSPORTE DE ENERGÍA: ECUACIÓN FUNDAMENTAL, PÉRDIDAS Y RENDIMIENTO

En cualquier transporte de energía eléctrica el rendimiento energético deberá ser proporcional a los gastos de inversión a realizar para materializar dicho transporte, esta definición constituye la "**Regla de Oro**", es decir se debe encontrar un punto de equilibrio entre los costes y el rendimiento obtenido.

Interesa invertir obteniendo pérdidas reducidas en el transporte de energía y para ello vamos a obtener una expresión del término potencia pérdida, para cada tipo de línea, con el fin de elegir para cada tipo de transporte, aquellos que nos garanticen un equilibrio entre inversión efectuada y rendimiento energético de la línea.

Teniendo en cuenta que los parámetros que definen un transporte de energía son:

- Longitud de la línea (l).
- Sección (S).
- Potencia (P).
- Tensión (U).

el rendimiento de la misma, vendrá definido por la expresión:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_p}{P_1} = 1 - \frac{P_p}{P_1} = 1 - p_p$$

siendo:

- P_2 = Potencia en final de línea en W.
- P_1 = Potencia en inicio de línea en W.
- P_p = Potencia pérdida en la línea en W.
- p_p = Factor de pérdidas del transporte, que representa el tanto por uno de pérdidas que se producen en el transporte, respecto de la potencia total tomada en origen de la línea.

De donde podemos poner:

$$p_p = 1 - \eta$$

o bien expresándolo en tanto por cien:

$$\boxed{p_p \% = 100 - \eta \%} \quad (1.1)$$

Vamos por tanto a determinar el factor de pérdidas y por tanto el rendimiento, para distintos tipos de líneas, considerando en primera aproximación que las pérdidas de la línea son exclusivamente las pérdidas por efecto Joule, que se originan en los conductores de la misma, realmente en líneas de corriente alterna aparecen otras pérdidas, pero con todo siguen siendo mayoritarias en principio las pérdidas por efecto Joule en la misma, a partir de aquí podremos deducir que tipo de línea es la más ventajosa y será por tanto este el tipo de línea utilizado para hacer posible el transporte de la energía, los tipos de líneas a estudiar son:

1.2.1. Líneas de corriente continua.

1.2.2. Líneas de corriente alterna monofásica.

1.2.3. Líneas de corriente alterna trifásicas.

Para mayor claridad en la comprensión de las ecuaciones y como norma general el subíndice 1 indica valores en origen de línea y el subíndice 2 indica valores al final o extremo de línea.

1.2.1. Líneas de corriente continua

Sea P_1 la potencia tomada en el inicio de la línea, que esta definida por:

$$P_1 = U_1 I \quad I = \frac{P_1}{U_1}$$

por otro lado las pérdidas por efecto Joule en la línea serán:

$$P_p = R I^2 = R \frac{P_1^2}{U_1^2}$$

siendo R la resistencia óhmica de los dos hilos que conforman la línea. El factor de pérdidas de la misma será:

$$p_p = \frac{P_p}{P_1} = \frac{R \frac{P_1^2}{U_1^2}}{P_1} = R \frac{P_1}{U_1^2} = 2 \rho \frac{l}{S} \frac{P_1}{U_1^2}$$

siendo “ l ” la longitud de la línea, por tanto la ecuación fundamental del transporte en corriente continua viene determinada por la expresión:

$$p_p = 2 \rho \frac{l}{S} \frac{P_1}{U_1^2} \quad (1.2)$$

1.2.2. Líneas de corriente alterna monofásica

Sea una línea de corta longitud y por tanto despreciable la capacidad de la misma, la potencia tomada en origen de línea será:

$$P_1 = U_1 I \cos \varphi_1 \quad I = \frac{P_1}{U_1 \cos \varphi_1}$$

y la potencia perdida en la misma es:

$$P_p = R I^2 = R \frac{P_1^2}{U_1^2 \cos^2 \varphi_1}$$

de donde el factor de pérdidas será:

$$p_p = \frac{P_p}{P_1} = \frac{R \frac{P_1^2}{U_1^2 \cos^2 \varphi_1}}{P_1} = R \frac{P_1}{U_1^2 \cos^2 \varphi_1} = \frac{2 \rho}{\cos^2 \varphi_1} \frac{l}{S} \frac{P_1}{U_1^2}$$

y la ecuación fundamental para el transporte de energía con corriente alterna monofásica es:

$$p_p = \frac{2 \rho}{\cos^2 \varphi_1} \frac{l}{S} \frac{P_1}{U_1^2} \quad (1.3)$$

1.2.3. Líneas de corriente alterna trifásica:

Sea una línea de cierta longitud, la potencia tomada en inicio de ella es:

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I \cos \varphi_1 \quad I = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 \cos \varphi_1}$$

de donde la potencia perdida, considerando exclusivamente el efecto Joule es:

$$P_p = 3 R I^2 = 3 R \frac{P_1^2}{3 U_1^2 \cos^2 \varphi_1} = \rho \frac{l}{S} \frac{P_1^2}{U_1^2 \cos^2 \varphi_1}$$

el factor de pérdidas por tanto resulta ser:

$$p_p = \frac{P_p}{P_1} = \frac{\rho}{\cos^2 \varphi_1} \frac{l}{S} \frac{P_1}{U_1^2} \quad (1.4)$$

Comparando las expresiones obtenidas de la ecuación fundamental, para los tres tipos de alimentación, se deduce en general que para cualquier tipo de línea, la ecuación fundamental del transporte será:

$$p_p = K \frac{l}{S} \frac{P_1}{U_1^2} \quad (1.5)$$

siendo:

- K = Coeficiente que depende del tipo de línea.
- l = Longitud de la línea.
- S = Sección del conductor empleado.
- P₁ = Potencia tomada en origen de línea.
- U₁ = Tensión en origen de la línea.

El coeficiente K tiene por valor:

- Líneas de corriente continua: K = 2 ρ.
- Líneas de corriente alterna monofásica: K = 2 ρ / cos² φ₁.
- Líneas de corriente alterna trifásica: K = ρ / cos² φ₁.

Puede observarse que de las expresiones obtenidas, se establecen ventajas e inconvenientes de uno u otro tipo de líneas, que evidentemente van a repercutir sobre el término de pérdidas y por lo tanto, sobre el término económico, es decir inversión del capital.

Comparando las expresiones anteriores, según el factor de potencia en origen tenemos:

- Si $\cos \varphi_1 = 1$ la línea mas ventajosa es la trifásica en la relación 2/1.
- Si $\cos \varphi_1 < 0,7$ la más ventajosa es la línea de corriente continua, sobre las otras dos.

De aquí que los transportes de energía en corriente alterna se efectúen con $\cos \varphi_1 > 0,7$ mejorando el factor de potencia mediante condensadores o compensadores sincrónicos.

Deduzcamos más consecuencias de la ecuación fundamental, vamos a comparar dos líneas de la misma naturaleza, es decir con el mismo tipo de alimentación, con el mismo factor de pérdidas, pero de diferentes características en cuanto a longitud, potencia, sección y tensión en inicio de línea, tenemos:

$$p_p = K \frac{l}{S} \frac{P_1}{U_1^2}$$

$$p'_p = K \frac{l'}{S'} \frac{P'_1}{U'^2_1}$$

por tener igual factor de pérdidas y dividiendo miembro a miembro resulta:

$$\boxed{\frac{l P_1}{l' P'_1} = \frac{S U_1^2}{S' U'^2_1}}$$

al producto de la potencia por la distancia se denomina "Momento Eléctrico" o también "Capacidad de Transporte", a partir de la ecuación anterior y particularizando para diferentes condiciones, tenemos:

1º) Secciones iguales $S = S'$.

$$l P_1 = \frac{l' P'_1}{U'^2_1} U_1^2 = K U_1^2$$

de donde:

$$\boxed{l P_1 = K U_1^2} \quad (1.7)$$

por lo que la capacidad de transporte es directamente proporcional al cuadrado de la tensión.

2º) Tensiones iguales $U_1 = U'_1$

Tenemos que:

$$\frac{l P_1}{l' P'_1} = \frac{S}{S'} \quad l P_1 = S \frac{l' P'_1}{S'} = K S$$

es decir:

$$\boxed{l P_1 = K S} \quad (1.8)$$

la capacidad de transporte es directamente proporcional a la sección.

3º) Potencias y tensiones iguales $P_1 = P'_1 \quad U_1 = U'_1$.

Resulta a partir de la ecuación 1.6 que:

$$\frac{l}{l'} = \frac{S}{S'} \quad l = S \frac{l'}{S'} = K S$$

$$\boxed{l = K S} \quad (1.9)$$

de donde la longitud será proporcional a la sección.

Podemos deducir por tanto las siguientes conclusiones:

- En el caso 1º queda justificado el empleo de elevadas tensiones, tal como las indicadas para las grandes líneas de transporte e interconexión.
- En el caso 2º se comprueba que la línea de mayor capacidad de transporte, será la de mayor sección (igualdad de refrigeración).
- En el caso 3º la longitud de la línea vendrá limitada por el peso total de conductor empleado. Llegará un momento en que dicho peso será máximo, con lo que no podremos aumentar ni la longitud ni la sección, ya que ello provocaría una línea de bajo rendimiento y por lo tanto no rentable, en este caso la solución pasaría por aumentar la tensión de la línea.

Hasta ahora hemos efectuado un estudio del factor de pérdidas, es decir del rendimiento de la línea en función de la capacidad de transporte, pero no solo influye la capacidad de transporte desde el punto de vista económico, que es lo que estamos analizando, sino que también influye la c.d.t. de la línea.

Así pues, la tensión en final de la línea define la "calidad" en el transporte de energía y se dice que una línea tiene una buena calidad de transporte, cuando el suministro de energía se realiza con una tensión que fluctúa entre unos límites aceptables. La máxima fluctuación para ello se fija en el $\pm 7\%$ de la tensión declarada, según el artículo 104.3 del Real Decreto 1955/2000 de 1 de Diciembre. Hay que tener presente que en baja tensión puede ocurrir que un motor asincrónico trifásico de inducción, puede deteriorarse si la tensión aplicada al mismo es insuficiente.

Se define el factor de calidad como la variación de la tensión que se produce respecto al final de la línea. Por otro lado la c.d.t. influye en el factor de pérdidas, es decir en el planteamiento económico.

Hasta ahora solo hemos considerado las pérdidas por efecto Joule, pero es necesario tener en cuenta que aparecen otras pérdidas, como son:

a) Pérdidas producidas por el campo magnético:

Son producidas por la corriente que circula por el conductor, cuando se trata de corriente alterna al inducir campos magnéticos de naturaleza variable, que se traducen en:

- a.1) Efecto pelicular o efecto Skin y efecto proximidad: el conductor se ve sometido a un campo magnético variable engendrado por la corriente que circula por el mismo o por los conductores situados próximos a el, ello ocasiona que la corriente que circula por el conductor circule por la periferia del mismo, produciéndose una reducción de la sección útil o lo que es lo mismo un aumento del valor de la resistencia óhmica, provocando por tanto mayores pérdidas por efecto Joule y empeorando el rendimiento.
- a.2) Provoca pérdidas por fenómenos de histéresis y corrientes de Foucault en los accesorios ferromagnéticos de la línea.
- a.3) Pérdidas por corrientes de Foucault que se producen en cualquier masa, sea o no ferromagnética.

b) Pérdidas producidas por el campo eléctrico:

Aparecen en líneas de muy alta tensión (M.A.T.) y se deben al fenómeno de histéresis dieléctrica y al efecto corona.

c) Pérdidas como consecuencia de la imperfección de los aislamientos:

Aparecen corrientes de fuga en los aislamientos, que origina un calentamiento en los mismos.

Con lo expuesto hasta ahora parece deducirse, que exclusivamente se emplean líneas de corriente alterna trifásica para distribución de energía, esto evidentemente tiene sus límites, en el caso de grandes potencias a grandes tensión de hace necesario el empleo de la Ultra Alta Tensión (que puede ser en corriente alterna HVCA o en corriente continua HVDC), se puede demostrar que la capacidad de transmisión de energía en HVDC se mantienen prácticamente constante independientemente de la distancia, mientras que en HVCA la capacidad de transmisión disminuye con la longitud de la línea debido a los efectos inductivos de la línea, otra dificultad añadida es el desfase producido entre por esta misma inductancia entre los extremos de la línea, puesto que puede conducir a la inestabilidad del sistema, según la gráfica adjunta:

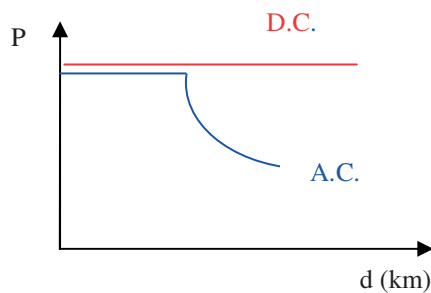


Figura 1.1

Además es preciso tener en cuenta el coste económico de ambos tipos de transmisión, la figura siguiente muestra la relación costes/distancia en los dos posibles sistemas:

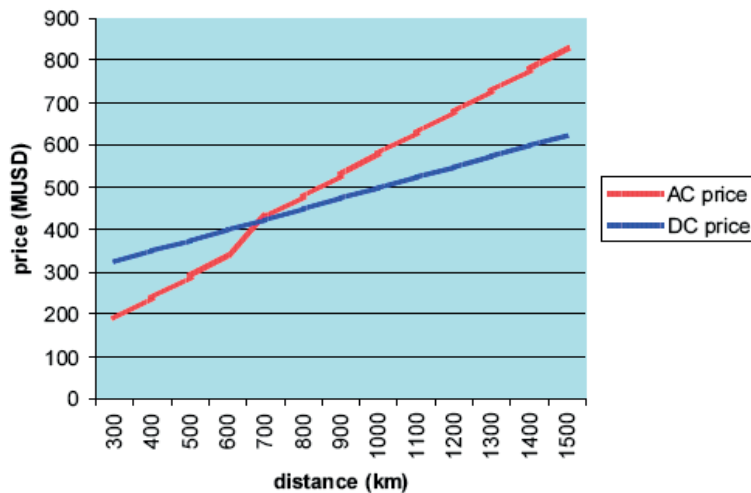


Figura 1.2

Por lo que se puede deducir que hay una distancia crítica a partir de la cual es mas conveniente transportar la energía por medio de líneas HVDC, esta distancia en principio es mayor de 500 km y en el caso español no existen líneas con dicha longitud, esto no ocurre en el caso de cables aislados (enlaces submarinos) por lo que en el caso de España el único enlace con corriente continua es el enlace sistema peninsular con la isla de Mallorca, ± 250 kV.

Se puede concluir que el avance de la tecnología de corriente continua ofrece hoy beneficios en las interconexiones de sistemas eléctricos que no pueden ser obtenidos por otra tecnología. El HVDC transmite potencia entre diferentes sistemas eléctricos ó partes de una red, sin permitir la propagación de disturbios. Al contrario, como se puede controlar la potencia activa/reactiva en forma rápida, una conexión de HVDC aumenta el nivel de transmisión y la disponibilidad del sistema completo. Las diferentes tecnologías de HVDC permiten hoy día encontrar la solución más adecuada a los requerimientos de un enlace.

1.3. SECCIÓN DE UN CONDUCTOR: REGLA DE KELVIN

La regla de Kelvin pretende determinar cual es la sección de conductor a emplear que origina una línea lo mas económica posible. Para ello hay que admitir que una variación en la sección influye exclusivamente sobre el coste de los conductores y la energía pérdida por efecto Joule en la línea eléctrica.

Kelvin estableció la siguiente regla: "La sección más económica de una línea es aquella para la cual el gasto anual de interés o amortización del capital correspondiente al coste del conductor empleado es igual al precio a que se hubiera vendido la energía pérdida por efecto Joule en los conductores".

En efecto vamos a considerar los siguientes factores:

- Pérdidas por efecto Joule en los conductores.
- Coste de la instalación.

ambos factores son opuestos, evidentemente deducimos que si aumentamos la sección de los conductores aumentamos el coste de la instalación (mayor peso de cobre, mayor robustez en los apoyos, mayores aisladores, etc) y sin embargo menores pérdidas y viceversa, intentamos encontrar el punto de equilibrio entre ambos costes.

En efecto, los costes de una línea trifásica por ser el caso más general los podemos desglosar como la suma de:

- 1º) Costes de instalación y amortización.
- 2º) Costes de funcionamiento.

analicemos más detalladamente estos costes, así tenemos:

1º) Costes de instalación y amortización.

El coste de instalación o construcción de una línea, se puede obtener como la suma del coste del conductor más el coste del resto de la instalación (aisladores, apoyos, hilo de guarda, tierras, etc), de donde:

- Precio por volumen de conductor empleado:

Siendo n el precio unitario por volumen de conductor empleado, para una línea trifásica resulta:

$$\text{Coste del conductor} = 3 \cdot n \cdot S \cdot l$$

siendo:

- n = Precio unitario por volumen de conductor expresado en €/dm³.
- S = Sección del conductor empleado en mm².
- l = Longitud de la línea en km.

- Coste del resto de la instalación:

Siendo m el precio por unidad de longitud de los accesorios que hacen posible el funcionamiento de la línea, en el que englobamos: apoyos, crucetas, aisladores, zanjias, etc, resulta:

$$\text{Coste del resto de la instalación} = m \cdot l$$

siendo:

- m = Precio del resto de la instalación en €/km.
- l = Longitud de la línea en km.

de donde el coste anual de dicha línea, que será igual a la anualidad de intereses, capital que no obtenemos al no tenerlo invertido o interés a pagar a las entidades financieras del préstamo solicitado para materializar la línea, será:

$$g = (m \cdot l + 3 \cdot n \cdot l \cdot S) \cdot a / 100$$

siendo “a” la anualidad de amortización.

2º) Coste de funcionamiento.

Por el hecho de transportar una potencia por la línea, en la misma se producen pérdidas por efecto Joule principalmente, de donde el coste de funcionamiento de la misma será:

$$g' = 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot h \cdot p = 3 \cdot \rho \cdot I^2 \cdot h \cdot p \cdot l / S$$

siendo:

- ρ = Resistividad del material conductor empleado expresado en $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$.
- I = Media cuadrática de la corriente que circula por la línea, determinada por:

$$I = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 t_i}{T}} \quad T = \sum t_i$$

- h = Horas de funcionamiento anuales de la línea.
- p = Precio de la energía en €/kWh.
- l = Longitud en km.
- S = Sección del conductor en mm^2 .

De donde la anualidad de gastos de la línea, como suma de costes de instalación y costes de funcionamiento es:

$$G = g + g' = (m l + 3 n l S) \frac{a}{100} + 3 \rho \frac{l}{S} I^2 h p$$

La sección mas económica será aquella para la que la anualidad de gastos sea mínima, por lo que para determinarla derivaremos la anualidad de gastos respecto a la sección e igualaremos a cero siendo dicha función un mínimo, por tanto:

$$\frac{d G}{d S} = \frac{3 n a l}{100} - \frac{3 \rho l I^2 h p}{S^2} = 0$$

de donde:

$$\frac{n a l}{100} = \frac{\rho l I^2 h p}{S^2}$$

o lo que es lo mismo:

$$l n S \frac{a}{100} = \rho \frac{l}{S} I^2 h p$$

ecuación que confirma la regla de Kelvin, despejando la sección resulta:

$$S = 10 I \sqrt{\frac{\rho h p}{n a}} \quad (mm^2) \quad (1.10)$$

y también la densidad más económica vendrá determinada por la expresión:

$$\delta = \frac{1}{10} \sqrt{\frac{n a}{\rho h p}} \quad (A/mm^2) \quad (1.11)$$

Observaciones:

- 1º) La densidad de corriente es independiente de la longitud, de la sección y de la corriente.
- 2º) Puede suceder que el valor de la densidad de corriente o la sección obtenida sea suficiente desde el punto de vista reglamentario, pero además es necesario que verifique la c.d.t. en la línea y que las pérdidas por efecto corona no sean prohibitivas.

Críticas a la regla de Kelvin:

- 1º) El precio de venta de la energía va a depender de la hora del día en que sea demandada, así como de los máximos y mínimos aceptados por el abonado, además anualmente este valor es revisado, de ahí la incertidumbre de suponer un precio medio en el momento de redactar el proyecto.
- 2º) Los porcentajes de interés y amortización del capital invertido en la instalación son muy difíciles de establecer.
- 3º) Una variación en la sección de los conductores lleva consigo una alteración (que puede ser muy importante) en los coste de los apoyos, cimentaciones, etc.
- 4º) La determinación previa de los tiempos de funcionamiento y las corrientes que circulan por la línea no son fácilmente evaluables.

De todo ello se desprende lo difícil que resulta la aplicación de la regla de Kelvin, no obstante debemos considerar el valor determinado por este método, como un valor aproximado de dicha sección, pues su resultado dependerá de los datos iniciales o de partida de que se disponga y ajustarlos finalmente a las sección comercial mas próxima y reglamentaria.

Puede obtenerse dicha sección más económica por un método gráfico sin más que representar las funciones:

$$g = f(S) \quad g' = f'(S) \quad \text{y} \quad G = f(S)$$

el punto de inflexión de la curva $G = f(S)$ determina la sección más económica.

1.4. INFLUENCIA DE LA NATURALEZA DE LA CORRIENTE EN LA SECCIÓN Y PESO DE LOS CONDUCTORES

Estudiaremos la importancia, desde el punto de vista económico, de la naturaleza de la corriente que circula por una línea eléctrica, a tal fin compararemos distintos tipos de líneas, con las siguientes condiciones:

- Un mismo material conductor.
- Una misma longitud de línea de transporte de energía.
- Una misma potencia a transportar.
- Un mismo factor de pérdidas.
- Un mismo nivel de aislamiento.

el estudio lo efectuaremos comparando los pesos necesarios de conductor entre las siguientes líneas:

- 1.4.1. Una línea de corriente continua con una línea de corriente alterna monofásica.
- 1.4.2. Una línea de corriente alterna monofásica con una línea de corriente alterna trifásica.
- 1.4.3. Una línea de corriente continua con una línea de corriente alterna trifásica.

1.4.1. Comparación entre líneas de corriente continua y corriente alterna monofásica

Partiendo de la ecuación fundamental y con las premisas antes definidas estableceremos una relación entre las secciones necesarias para cada tipo de línea, admitiendo que presentan el mismo factor de pérdidas, es decir el mismo rendimiento, así tenemos que la ecuación fundamental es:

$$P_p = K \frac{l}{S} \frac{P_1}{U_1^2}$$

particularizando para los dos tipos de líneas resulta:

$$p_{pcc} = K_{cc} \frac{l}{S_{cc}} \frac{P_1}{U_1^2} = 2 \rho \frac{l}{S_{cc}} \frac{P_1}{U_1^2}$$

$$p_{pca} = K_{ca} \frac{l}{S_{ca}} \frac{P_1}{U_1^2} = \frac{2 \rho}{\cos^2 \varphi_1} \frac{l}{S_{ca}} \frac{P_1}{U_1^2}$$

puesto que ambas líneas deben presentar el mismo factor de pérdidas, podemos igualar ambas expresiones de donde:

$$\frac{1}{S_{cc}} = \frac{1}{\cos^2 \varphi_1 S_{ca}}$$

por lo que tenemos:

$$S_{ca} = \frac{S_{cc}}{\cos^2 \varphi_1} \quad (1.12)$$

siendo γ el peso específico del material conductor, la relación entre los pesos de material conductor empleado es:

$$G_{cc} = \gamma 2 l S_{cc}$$

$$G_{ca} = \gamma 2 l S_{ca}$$

por lo que resulta:

$$\frac{G_{ca}}{G_{cc}} = \frac{\gamma 2 l S_{ca}}{\gamma 2 l S_{cc}} = \frac{1}{\cos^2 \varphi_1}$$

o también:

$$G_{ca} = \frac{G_{cc}}{\cos^2 \varphi_1} \quad (1.13)$$

Podemos considerar los siguientes casos:

- 1.- $\cos \varphi_1 = 1$ de donde $G_{cal} = G_{cc}$.
- 2.- $\cos \varphi_1 < 1$ de donde $G_{cal} > G_{cc}$.

Según estas consideraciones, se observa que la línea monofásica de corriente alterna, desde el punto de vista económico, es menos idónea que la de corriente continua.

De todos modos hay que tener en cuenta, que ambos tipos de líneas, tienen aplicaciones muy concretas, en el caso de líneas de corriente continua su aplicación está limitada exclusivamente a redes de tracción eléctrica ferroviaria, tanto para ferrocarriles urbanos como interurbanos y para interconectar redes aisladas cuyas respectivas estabilidades han de ser independientes, en el caso de líneas de corriente alterna monofásica su única aplicación es alimentar redes de tracción eléctrica en ferrocarriles generalmente interurbanos (caso de las líneas AVE de RENFE).

1.4.2. Comparación entre líneas de corriente alterna monofásica y trifásica

Partiendo de las mismas hipótesis, tenemos:

$$p_{pcaI} = K_{cal} \frac{l}{S_{cal}} \frac{P_1}{U_1^2} = \frac{2 \rho}{\cos^2 \varphi_1} \frac{l}{S_{cal}} \frac{P_1}{U_1^2}$$

$$p_{pcaIII} = K_{caIII} \frac{l}{S_{caIII}} \frac{P_1}{U_1^2} = \frac{\rho}{\cos^2 \varphi_1} \frac{l}{S_{caIII}} \frac{P_1}{U_1^2}$$

igualando ambas expresiones y admitiendo que el factor de potencia en el origen de la línea es el mismo:

$$\boxed{S_{caIII} = \frac{S_{cal}}{2}} \quad (1.14)$$

por lo que la relación de los pesos de ambas líneas es:

$$G_{cal} = \gamma 2 l S_{cal}$$

$$G_{caIII} = \gamma 3 l S_{caIII}$$

por lo que resulta:

$$\frac{G_{caIII}}{G_{cal}} = \frac{\gamma 3 l S_{caIII}}{\gamma 2 l S_{cal}} = \frac{3}{2} \frac{S_{caIII}}{S_{cal}} = \frac{3}{2} \frac{1}{2} = 0,75$$

de donde:

$$\boxed{G_{caIII} = 0,75 G_{cal}} \quad (1.15)$$

se deduce por tanto que en una línea de corriente alterna trifásica, a pesar de tener un hilo conductor mas, se produce un ahorro de material conductor del 25 %.

1.4.3. Comparación entre líneas de corriente continua y corriente alterna trifásica

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, tenemos:

$$p_{pcc} = K_{cc} \frac{l}{S_{cc}} \frac{P_1}{U_1^2} = 2 \rho \frac{l}{S_{cc}} \frac{P_1}{U_1^2}$$

$$p_{pcaIII} = K_{caIII} \frac{l}{S_{caIII}} \frac{P_1}{U_1^2} = \frac{\rho}{\cos^2 \varphi_1} \frac{l}{S_{caIII}} \frac{P_1}{U_1^2}$$

igualando ambas expresiones tenemos:

$$\boxed{S_{caIII} = \frac{S_{cc}}{2 \cos^2 \varphi_1}} \quad (1.16)$$

en relación con los pesos se cumple:

$$G_{cc} = \gamma 2 l S_{cc}$$

$$G_{caIII} = \gamma 3 l S_{caIII}$$

de donde se obtiene:

$$\frac{G_{cc}}{G_{caIII}} = \frac{2 S_{cc}}{3 S_{caIII}} = \frac{2}{3} \frac{S_{cc}}{\frac{S_{cc}}{2 \cos^2 \varphi_1}} = \frac{4}{3} \cos^2 \varphi_1$$

siendo la relación de pesos:

$$G_{caIII} = \frac{0,75}{\cos^2 \varphi_1} G_{cc} \quad (1.17)$$

Consideremos los siguientes casos:

- 1.- $\cos \varphi_1 = 1$ de donde $G_{caIII} = 0,75 G_{cc}$ lo que supone un ahorro del 25 % en cuanto a material conductor empleado.
- 2.- $\cos \varphi_1 = 0,866$ de donde $G_{caIII} = G_{cc}$ de aquí la importancia de mejorar el factor de potencia de las instalaciones.

TEMA 2

CABLES ELÉCTRICOS. CÁLCULO ELÉCTRICO DE LÍNEAS ÓHMICAS

2.1. CABLES ELÉCTRICOS: GENERALIDADES	35
2.2. COMPONENTES DE UN CABLE ELÉCTRICO.....	38
2.3. RESISTENCIA DE UN CONDUCTOR.....	48
2.4. RESISTENCIA Y REACTANCIA EFECTIVA.....	52
2.5. CAPACIDAD: REACTANCIA CAPACITIVA.....	58
2.6. MATERIALES AISLANTES: PARÁMETROS ELÉCTRICOS	63
2.7. PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN LOS CABLES.....	68
2.8. PARÁMETROS TÉRMICOS DE LOS CABLES.....	74
2.9. RESISTENCIA TÉRMICA DE UN CABLE	81
2.10. CAPACIDAD DE CARGA TÉRMICAMENTE ADMISIBLE	83
2.11. CAPACIDAD DE CARGA EN SERVICIO PERMANENTE	84
2.12. CURVA DE CALENTAMIENTO DE UN CONDUCTOR.....	87
2.13. CAPACIDAD DE CARGA EN SERVICIO DE CORTA DURACIÓN	92
2.14. CAPACIDAD DE CARGA EN SERVICIO INTERMITENTE.....	94
2.15. CAPACIDAD DE CARGA EN CORTOCIRCUITO.....	95
2.16. DETERMINACIÓN DE LA SECCIÓN POR CAÍDA DE TENSIÓN.....	104
2.17. DESIGNACIÓN DE LOS CABLES.....	106
2.18. CÁLCULO ELÉCTRICO DE LÍNEAS ÓHMICAS	111
2.19. SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES DE UNA LÍNEA ÓHMICA.....	111
2.20. SECCIÓN MÍNIMA DE UN CONDUCTOR ATENDIENDO A LA ELE- VACIÓN DE TEMPERATURA	116
2.21. SECCIÓN DE UN CONDUCTOR ATENDIENDO A LA CAÍDA DE TENSIÓN.....	118
2.22. SECCIONES MÍNIMAS REGLAMENTARIAS: DENSIDAD MÁXIMA ADMISIBLE.....	122
2.23. LÍNEAS DE CORRIENTE CONTINUA	130
2.24. LÍNEAS DE CORRIENTE ALTERNA MONOFÁSICA	132
2.25. LÍNEAS DE CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA	136
2.26. PROTECCIÓN DE LÍNEAS Y CABLES EN BAJA TENSIÓN	137

2.1. CABLES ELÉCTRICOS AISLADOS: GENERALIDADES

Las redes de distribución de energía eléctrica, así como las instalaciones propiedad de los consumidores, emplean en general, cables eléctricos aislados.

En el caso de redes de distribución, las ventajas técnicas con respecto a las líneas aéreas desnudas son evidentes, especialmente cuando se requieren sistemas de elevada seguridad para las personas, continuidad en el servicio y distribución de grandes volúmenes de energía en lugares de espacio restringido, el problema de la utilización de cables aislados, es el coste de la obra, superior al de una línea aérea.

Por ejemplo, en la red subterránea de distribución de una ciudad, el reparto de las inversiones podría ser:

- Obra civil, zanjas, etc: 35 %.
- Cables de B.T. y accesorios: 30 %.
- Cables de M.T. y accesorios: 20 %.
- Transformadores y equipos: 15 %.

Además, para el correcto diseño de un sistema eléctrico es necesario determinar los siguientes datos:

- 2.1.a) Previsión de cargas.
- 2.1.b) Estructura de la red.
- 2.1.c) Sobrecargas, sobretensiones y cortocircuitos previsibles.

○ 2.1.a) Previsión de cargas:

La previsión de cargas para una instalación determinada dependerá de: localización geográfica, tipo de utilización de la energía y la regularidad en el suministro. En primera aproximación, podemos estimar la siguiente previsión de cargas en función de la localización geográfica.

ZONA	MVA/km ²
Urbana	50 - 200
Suburbana	5 - 50
Rural	2 - 5

Es necesario, también definir:

- Carga instalada: suma de las potencias nominales de los servicios conectados al cable.

- Demanda de energía: es la carga media en los terminales receptores de la instalación, tomados en un tiempo determinado.
- Demanda máxima: es la demanda instantánea mayor, que se presenta en una carga, en un tiempo previamente establecido, generalmente 24 horas.

Aparece un nuevo concepto, que se denomina factor de utilización o de demanda (K_d) que es la relación entre la demanda máxima y la energía total instalada, como valores orientativos, tenemos:

* Edificios residenciales:

- Viviendas sin aire acondicionado: 40 %.
- Hoteles y residencias sin aire acondicionado: 40 %.
- Templos: 45 %.
- Oficinas sin aire acondicionado: 45 %.
- Hospitales y asilos: 50 %.
- Viviendas con aire acondicionado: 55 %.
- Hoteles y residencias con aire acondicionado: 55 %.

* Edificios comerciales:

- Locales de enseñanza: 45 %.
- Organismos oficiales: 50%.
- Farmacias y droguerías: 50 %.
- Bancos: 55 %.
- Restaurantes: 60 %.
- Centros comerciales: 65 %.
- Instalaciones industriales: 70 - 80 %.

El cable de una instalación debe estar dimensionado para satisfacer la demanda máxima, que impone las condiciones de carga y caída de tensión más severa. Sin embargo, en el caso de que un cable pueda suministrar a varios consumidores, puede ser que sus demandas no coincidan en el tiempo, por lo que habrá que aplicar el denominado factor de simultaneidad, relación entre la demanda máxima del conjunto y la suma de las demandas máximas de cada consumidor. (ver R.E.B.T.).

Otro dato a tener en cuenta es la tasa de crecimiento de la carga, la experiencia y datos históricos detallados, permitirá determinar con la suficiente exactitud la tasa de crecimiento.

○ **2.1.b) Estructura de la red:**

Los tipos de estructura de la red pueden ser:

- Radial.
- Anillo.
- Mallada.

Se ha reflejado desde la más sencilla a la más complicada y que asegura el funcionamiento de los receptores y supone la culminación del sistema eléctrico.

○ **2.1.c) Sobrecargas, sobretensiones y cortocircuitos previsibles:**

Es preciso proteger los cables y las instalaciones contra cada uno de estos posibles defectos según el tipo de anomalía. Dada la complejidad de las posibles soluciones remitimos al lector a tratados específicos o a consultar con los fabricantes de cada uno de los componentes de un sistema eléctrico.

Por último, también podemos clasificar los cables eléctricos atendiendo a diferentes criterios como son:

*** Atendiendo a la tensión:**

- Cables de muy baja tensión, hasta 50 V.
- Cables de baja tensión (B.T.), hasta 1000 V.
- Cables de media tensión (M.T.), hasta 30 kV.
- Cables de alta tensión (A.T.), hasta 66 kV.
- Cables de muy alta tensión (M.A.T.), por encima de 66 kV.

*** Atendiendo a la naturaleza de sus componentes:**

- Cables con conductores de cobre o aluminio.
- Cables aislados con:
 - a) Materiales termoplásticos.
 - b) Elastómeros.
 - c) Papel impregnado.
 - d) Aceite fluido.
- Cables protegidos con pantallas, armaduras, etc.

*** Atendiendo a aplicaciones específicas:**

- Cables para redes de distribución de energía urbana o interurbana.
- Cables para instalaciones en el interior de edificios.
- Cables de señalización, telefonía, radiofrecuencia, etc.
- Cables de aplicaciones especiales:
 - Minas.
 - Construcción naval civil y militar.
 - Ferrocarriles.
 - Industrias aeronáuticas, etc.

2.2. COMPONENTES DE UN CABLE ELÉCTRICO AISLADO

En un cable aislado se distinguen tres elementos fundamentales:

- 2.2.a) Conductor.
- 2.2.b) Aislamiento.
- 2.2.c) Protecciones.

En la figura siguiente, se observa la disposición general de un cable eléctrico aislado de M.T.

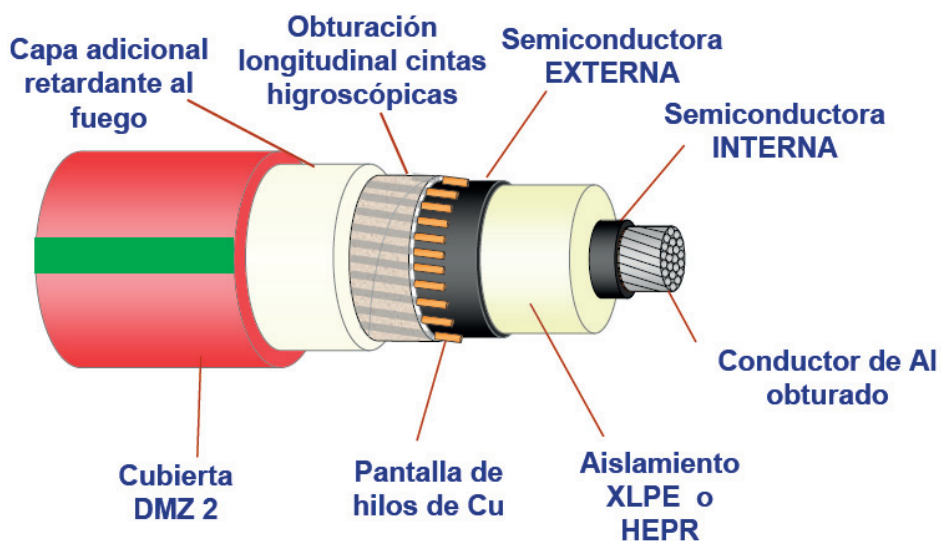


Figura 2.1

○ **2.2.a) Conductor:**

El material conductor empleado en la fabricación de los cables eléctricos, esta normalizado por la norma UNE EN 60228:2005, que se corresponde con la IEC 228 y con el Documento de Armonización HD 383 de CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica).

Se explicita en dicha norma que el material conductor puede ser:

- Cobre recocido, desnudo o recubierto de una capa metálica.
- Aluminio, o aleación de aluminio, desnudo o recubierto de una capa metálica.

y según el grado de flexibilidad dicha norma, determina cuatro tipos de clases de menor a mayor grado de flexibilidad, como es natural, cuanto mayor es el grado de flexibilidad el diámetro de los alambres que constituye el conductor es menor, por lo que tenemos:

- Clase 1: Conductores de un solo alambre.
- Clase 2: Conductores de varios alambres, de cobre o aluminio.
- Clase 5: Conductores de varios alambres de cobre.
- Clase 6: Conductores de varios alambres de cobre.

a continuación reproducimos las tablas 1, 2, 3 y 4 de la citada norma que determinan las características de dichas clases.

Tabla 1
Conductores de un solo alambre (clase 1), para cables unipolares y multiconductores

1	2	3	4
Sección nominal mm ²	Resistencia máxima del conductor a 20 °C		
	Conductor de cobre recocido, circular		Conductor de aluminio y aleación de aluminio, circular o sectoral ^c
	desnudo Ω/km	recubierto Ω/km	
0,5	36,0	36,7	—
0,75	24,5	24,8	—
1,0	18,1	18,2	—
1,5	12,1	12,2	—
2,5	7,41	7,56	—
4	4,61	4,70	—
6	3,08	3,11	—
10	1,83	1,84	3,08 ^a
16	1,15	1,16	1,91 ^a
25	0,727 ^b	—	1,20 ^a
35	0,524 ^b	—	0,868 ^a
50	0,387 ^b	—	0,641
70	0,268 ^b	—	0,443
95	0,193 ^b	—	0,320 ^d
120	0,153 ^b	—	0,253 ^d
150	0,124 ^b	—	0,206 ^d
185	0,101 ^b	—	0,164 ^d
240	0,0775 ^b	—	0,125 ^d
300	0,0620 ^b	—	0,100 ^d
400	0,0465 ^b	—	0,0778
500	—	—	0,0605
630	—	—	0,0469
800	—	—	0,0367
1 000	—	—	0,0291
1 200	—	—	0,0247

^a Solamente conductores circulares de aluminio de 10 mm² a 35 mm² (véase el apartado 5.1.1c).

^b Véase nota del apartado 5.1.1 b).

^c Véase nota del apartado 5.1.2.

^d Para cables unipolares, pueden ensamblarse cuatro conductores sectoriales en un único conductor circular. La resistencia máxima del conductor ensamblado debe ser del 25% de los componentes individual del conductor.

Figura 2.2

Tabla 2
Conductores de varios alambres cableados de clase 2 para cables unipolares y multiconductores

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sección nominal mm ²	Número mínimo de alambres en el conductor						Resistencia máxima del conductor a 20 °C		
	Circular		Circular compactado		Sectoral		Conductor cobre recocido		Conductores de aluminio o aleación de aluminio ^c
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	alambres desnudos	alambres recubiertos de una capa metálica	
							Ω/km	Ω/km	Ω/km
0,5	7	—	—	—	—	—	36,0	36,7	—
0,75	7	—	—	—	—	—	24,5	24,8	—
1,0	7	—	—	—	—	—	18,1	18,2	—
1,5	7	—	6	—	—	—	12,1	12,2	—
2,5	7	—	6	—	—	—	7,41	7,56	—
4	7	—	6	—	—	—	4,61	4,70	—
6	7	—	6	—	—	—	3,08	3,11	—
10	7	7	6	6	—	—	1,83	1,84	3,08
16	7	7	6	6	—	—	1,15	1,16	1,91
25	7	7	6	6	6	6	0,727	0,734	1,20
35	7	7	6	6	6	6	0,524	0,529	0,868
50	19	19	6	6	6	6	0,387	0,391	0,641
70	19	19	12	12	12	12	0,268	0,270	0,443
95	19	19	15	15	15	15	0,193	0,195	0,320
120	37	37	18	15	18	15	0,153	0,154	0,253
150	37	37	18	15	18	15	0,124	0,126	0,206
185	37	37	30	30	30	30	0,0991	0,100	0,164
240	37	37	34	30	34	30	0,0754	0,0762	0,125
300	61	61	34	30	34	30	0,0601	0,0607	0,100
400	61	61	53	53	53	53	0,0470	0,0475	0,0778
500	61	61	53	53	53	53	0,0366	0,0369	0,0605
630	91	91	53	53	53	53	0,0283	0,0286	0,0469
800	91	91	53	53	—	—	0,0221	0,0224	0,0367
1 000	91	91	53	53	—	—	0,0176	0,0177	0,0291
1 200	b						0,0151	0,0151	0,0247
1 400 ^a	b						0,0129	0,0129	0,0212
1 600	b						0,0113	0,0113	0,0186
1 800 ^a	b						0,0101	0,0101	0,0165
2 000	b						0,0090	0,0090	0,0149
2 500	b						0,0072	0,0072	0,0127

^a Estas medidas no son preferentes. Esta norma no contempla otras medidas no preferentes y utilizadas en alguna aplicación especializada.

^b Para estas medidas el número mínimo de alambres no está especificado. Estas medidas pueden construirse a partir de 4, 5 ó 6 segmentos idénticos (Milliken).

^c Para conductores de aleación de aluminio cableados de la misma sección nominal que un conductor de aluminio, el valor de la resistencia debe acordarse entre fabricante y comprador.

Figura 2.3

Tabla 3
Conductores flexibles de cobre de clase 5 para cables unipolares y multiconductores

1	2	3	4
Sección nominal mm ²	Diámetro máximo de los alambres en el conductor mm	Resistencia máxima del conductor a 20 °C	
		Alambres desnudos Ω/km	Alambres recubiertos de una capa metálica Ω/km
0,5	0,21	39,0	40,1
0,75	0,21	26,0	26,7
1,0	0,21	19,5	20,0
1,5	0,26	13,3	13,7
2,5	0,26	7,98	8,21
4	0,31	4,95	5,09
6	0,31	3,30	3,39
10	0,41	1,91	1,95
16	0,41	1,21	1,24
25	0,41	0,780	0,795
35	0,41	0,554	0,565
50	0,41	0,386	0,393
70	0,51	0,272	0,277
95	0,51	0,206	0,210
120	0,51	0,161	0,164
150	0,51	0,129	0,132
185	0,51	0,106	0,108
240	0,51	0,0801	0,0817
300	0,51	0,0641	0,0654
400	0,51	0,0486	0,0495
500	0,61	0,0384	0,0391
630	0,61	0,0287	0,0292

Figura 2.4

Tabla 4
Conductores flexibles de cobre de clase 6 para cables unipolares y multiconductores

1	2	3	4
Sección nominal mm ²	Diámetro máximo de los alambres en el conductor mm	Resistencia máxima del conductor a 20 °C	
		Alambres desnudos Ω/km	Alambres recubiertos de una capa metálica Ω/km
0,5	0,16	39,0	40,1
0,75	0,16	26,0	26,7
1,0	0,16	19,5	20,0
1,5	0,16	13,3	13,7
2,5	0,16	7,98	8,21
4	0,16	4,95	5,09
6	0,21	3,30	3,39
10	0,21	1,91	1,95
16	0,21	1,21	1,24
25	0,21	0,780	0,795
35	0,21	0,554	0,565
50	0,31	0,386	0,393
70	0,31	0,272	0,277
95	0,31	0,206	0,210
120	0,31	0,161	0,164
150	0,31	0,129	0,132
185	0,41	0,106	0,108
240	0,41	0,0801	0,0817
300	0,41	0,0641	0,0654

Figura 2.5

○ **2.2.b) Material aislante:**

El material aislante, colocado alrededor del conductor, debe presentar una serie de cualidades como son:

- Características eléctricas: las estudiaremos mas adelante.
- Características químicas:
 - Absorción de agua y resistencia a la humedad.
 - Grado de polimerización, vulcanización o reticulación.

- Resistencia al ozono.
- Resistencia a la acción solar.
- Resistencia a la radiación ultravioleta.
- Resistencia a la radiación gamma.
- Resistencia a la oxidación.
- Resistencia a los hidrocarburos.
- Resistencia a los agentes corrosivos.
- Resistencia a los ambientes salinos, alcalinos, etc.

- Características físicas:
 - Termoplasticidad.
 - Cristalización.
 - Resistencia al agrietamiento o gelificación.
 - Resistencia al calor y al frío.
 - Resistencia al fuego.
 - Temperatura máxima de servicio y de emergencia.
 - Temperatura de cortocircuito.

- Características mecánicas:
 - Resistencia a la tracción.
 - Carga de rotura.
 - Alargamiento a la rotura.
 - Resistencia al alargamiento permanente.
 - Resistencia a la abrasión.
 - Resistencia al envejecimiento, etc.

Se han indicado los materiales aislantes más comunes, su temperatura de servicio y de cortocircuito y la tensión de empleo mas elevada.

Material aislante	Tensión más	Temperatura máxima	
	elevada en kV	Servicio	Cortocircuito
Aislamiento de papel:	66	80	160
Impregnado no migrante	750	90	250
Aceite fluido			
Aislamiento seco:			
a) Termoestables:			
Goma SBR	11	75	200
Goma EPR	150	90	250
Goma silicona	1	200	300
Polietileno reticulado	250	90	250
b) Termoplásticos	6	70	160

También indicamos de un modo esquemático, las principales características de los aislamientos secos mas utilizados:

Tipo de instalación	Propiedad	EPR	PVC	XLPE
Intemperie	Resistencia al ozono	E	B	B
Sobrecarga y c.c.	Resis. alta temperaturas	E	R	E
Ambientes húmedos	Resistencia al agua	E	B	R
Zonas muy frías	Resistencia al frío	B	R	B
Peligro de incendio	Resistencia al fuego	R	R	M
Servicios móviles	Flexibilidad	B	R	M
Media y alta tensión	Descargas parciales	E	E	B
Grandes redes de A.T.	Factor de potencia	B	M	E

siendo: E = excelente; R = regular; M = malo.

○ **2.2.c) Protecciones:**

La misión de las protecciones es proteger al cable frente a distintos tipos de agresiones, los cables pueden o no disponer de protecciones. Se distinguen dos tipos de protecciones:

- Protección contra daños de origen eléctrico.

➤ 2.2.c.1) Capas semiconductoras.

➤ 2.2.c.2) Pantallas.

- Protección contra daños de origen mecánico.

➤ 2.2.c.3) Armaduras.

➤ 2.2.c.4) Cubiertas.

○ 2.2.c.1) Capas semiconductoras.

Se trata de unas delgadas capas de polímero, generalmente de la misma composición básica que el material aislante, que se ha mezclado con productos conductores, tales como el negro de humo, para reducir su resistencia de aislamiento, que se coloca en los cables de aislamiento seco de tensión superior a 1,8/3 kV en el caso de polietileno reticulado (XLPE) y a partir de los 3,6/6 kV en el caso de goma de etileno-propileno (EPR) y cuya misión es evitar que puntos huecos del cable estén sometidos a intensos campos eléctricos, en los que la presencia de aire o vapor de agua originen descargas parciales. Existen dos tipos de capas semiconductoras:

- Interna.

- Externa.

- Capa semiconductor interna: En contacto íntimo con el conductor y por lo tanto a su mismo potencial, se obtiene una superficie perfectamente cilíndrica al rellenar los huecos del cableado, reduciéndose el valor del campo eléctrico y el riesgo de formación de puntos de ionización. En los cables con aislamiento de papel impregnado se consigue el mismo efecto colocando sobre la cuerda conductora una cinta de papel de carbón.

- Capa semiconductor externa: Situada en la parte exterior del aislante cumple la misma finalidad que la anterior y esta puesta a tierra y por tanto a potencial cero. En aquellos cables que fácilmente es separable de la capa aislante se les designa con las letras "SF" que algunos identifican con "separación fácil" o "separable en frío" esto tiene importancia a la hora de efectuar los empalmes. En los cables de papel impregnado el tubo de plomo, constituye esta capa. En

las tensiones inferiores el fenómeno de las descargas parciales no se presenta en los cables de papel impregnado, por lo que en el caso de los cables tripolares, hasta $U_0/U = 8,7/15$ kV, no se coloca ninguna capa semiconductora sobre el aislamiento de cada fase. El tubo de plomo cubre el conjunto de las tres fases reunidas con sus rellenos correspondientes. A partir de las tensiones 12/20 kV, el conjunto está formado por la reunión de tres cables unipolares cada uno de los cuales está provisto de su tubo de plomo y el conjunto fajado con una armadura de fleje de hierro que mantiene unidos los tres cables y protege al plomo de daños exteriores.

Las tres capas que cubren al conductor de un cable seco: la semiconductora interna, el aislamiento y la semiconductora externa se aplican en una misma fase en el proceso de fabricación, por lo que a este proceso industrial de mucha mayor fiabilidad, se le denomina de triple extrusión (TE).

○ 2.2.c.2) Pantallas.

Son elementos metálicos con función de protección eléctrica, protegiendo los cables contra interferencias exteriores electrostáticas o electromagnéticas. Pueden estar constituidos por una simple cinta de papel metalizado (pantalla electrostática), una trenza de hilos de cobre o trenza mixta de hilos de cobre y textiles (pantalla electromagnética), una corona de hilos de cobre en los cables para obras públicas y minería o un tubo de plomo en los de papel impregnado. Las pantallas están puestas a tierra.

○ 2.2.c.3) Armaduras.

Son elementos metálicos cuya función es la protección mecánica, protegiendo el cable contra esfuerzos cortantes, roedores, etc pudiendo estar constituida normalmente por:

➤ Para cables tripolares:

- Dos flejes de hierro (tipo F).
- Una corona de alambres de aluminio y sus aleaciones (tipo M).

➤ Para cables unipolares:

- Dos flejes de aluminio y sus aleaciones (tipo FA).
- Una corona de alambres de aluminio y sus aleaciones (tipo MA).

La armadura de hierro, sólo se puede emplear en cables que incluyen el conductor de retorno, ya que en otro caso por corrientes de Foucault y fenómenos de histéresis originaría calentamientos excesivos que podrían destruir el cable.

○ 2.2.c.4) Cubiertas.

Son elementos no metálicos que protegen al cable de agentes dañinos exteriores: químicos, biológicos, atmosféricos, abrasivos, etc.

Según la norma UNE 21123 en su página 46 indica:

a) Termoplásticos.

- V = Policloruro de vinilo (PVC).
- E = Polietileno termoplástico (PE).
- Z1 = Poliolefina termoplásticas.

b) Termoestables

- N = Policloropreno (PCP) (neopreno).
- I = Polietileno clorosulfonado (CSP) (hypalon).

2.3. RESISTENCIA DE UN CONDUCTOR

La resistencia de un conductor, que se suele expresar en Ω/km , a 20°C y alimentado por corriente continua, viene determinada por la expresión:

$$R_{20CC} = \rho_{20} \frac{l}{S} \quad (\Omega / m) \quad (2.1)$$

en donde:

- ρ_{20} = Resistividad del material a 20°C en $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$.
- l = Longitud del conductor en m.
- S = Sección del conductor en mm^2 .

Para el cobre de conductividad 100 % a 20°C su resistividad es de $17,24 \cdot 10^{-3} \Omega\text{mm}^2/\text{m}$. El cobre normalmente utilizado para conductores eléctricos presenta una conductividad del 98 %, por lo que su resistividad es de $17,6 \cdot 10^{-3} \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, para el aluminio a la misma temperatura de 20°C su resistividad es de $28,6 \cdot 10^{-3} \Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

La norma UNE 60228:2005 especifica el valor de la resistencia óhmica que deben presentar los conductores de las secciones normalizadas a 20°C , valores reseñados en las tablas de las figuras 1.2 a 1.5 anteriormente representadas.

Sabemos además, que las pérdidas por efecto Joule van a originar un aumento en la temperatura del conductor y este aumento, un incremento notable de la resistencia del mismo, de acuerdo con la expresión:

$$R_{tcc} = R_{20cc} \left[1 + \alpha_{20} (\theta - 20) \right] (\Omega / m) \quad (2.2)$$

en donde", es el coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura, cuyo valor es a 20 °C:

- $\alpha_{20} = 0,0039 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para el cobre.
- $\alpha_{20} = 0,0040 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para el aluminio.

Es evidente que la resistividad seguirá la misma expresión de variación de la resistividad con la temperatura, tenemos por tanto que la resistividad de un conductor a la temperatura de funcionamiento es:

$$\rho_{\theta} = \rho_{20} \left[1 + \alpha_{20} (\theta - 20) \right] (\Omega \text{ mm}^2 / m) \quad (2.3)$$

Hasta ahora hemos determinado la resistencia de los conductores recorridos por corriente continua, pero al ser sometidos a una corriente alterna, se genera un campo magnético variable y se induce en él una fuerza electromotriz en el mismo o en los conductores situados en su proximidad. Este fenómeno origina una distribución no uniforme de la corriente en el conductor, tendiendo esta a circular por la periferia del conductor, que se conoce con el nombre de efecto pelicular o efecto Skin y así mismo dicho campo magnético de conductores próximos origina el "efecto proximidad" y ambos efectos conjugados se traduce en un aumento de la resistencia del conductor con respecto al que tiene en corriente continua.

La norma UNE 21144-1-1:1997 en su apartado dos, determina la fórmula que permite calcular la resistencia de un conductor recorrido por c.a. según:

$$R_{tca} = R_{tcc} \left[1 + y_s + y_p \right] (\Omega / m) \quad (2.4)$$

siendo:

- y_s = Incremento debido al efecto pelicular.
- y_p = Incremento debido al efecto de proximidad.

A tener en cuenta que el efecto pelicular es mucho más acusado que el efecto de proximidad, siendo sus valores:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 x_s^4} \quad x_s^2 = \frac{8 \pi f}{R_{tcc}} 10^{-7} k_s \quad (2.5)$$

El efecto proximidad queda determinado para cables de sección circular por las expresiones siguientes según el tipo de cable empleado:

- Cables bipolares o dos cables unipolares:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 2,9 \quad x_p^2 = \frac{8 \pi f}{R_{tcc}} 10^{-7} k_p \quad (2.6)$$

siendo:

- d_c = Diámetro del conductor en mm.

- s = Distancia entre los ejes de los conductores próximos en mm.

- Cables tripolares o tres cables unipolares:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8 x_p^4} + 0,27} \right] \quad (2.7)$$

$$x_p^2 = \frac{8 \pi f}{R_{tcc}} 10^{-7} k_p$$

siendo:

- d_c = Diámetro del conductor en mm.

- s = Distancia entre ejes de conductores en mm, en el caso de estar dispuestos los cables en capa d, es el intervalo entre fases adyacentes, cuando el intervalo entre dos fases adyacentes no es igual, se tomará la distancia:

$$s = \sqrt{d_1 d_2} \quad (mm)$$

Los valores de k_s y k_p están determinados por la tabla 2 de la mencionada norma que reproducimos seguidamente:

Tabla 2
Efectos pelicular y de proximidad
Valores experimentales de los coeficientes k_s y k_p para conductores de cobre
(Los valores correspondientes para los conductores de aluminio están en estudio)

1	2	3	4
Tipo de conductor	Secado e impregnado o no	k_s	k_p
Circular, cableado	SI	1	0,8
Circular, cableado	NO	1	1
Circular, compacto	SI	1	0,8
Circular, compacto	NO	1	1
Circular, segmentado*		0,435	0,37
Hueco, cableado helicoidal	SI	**	0,8
Sectoral	SI	1	0,8
Sectoral	NO	1	1

* Los valores dados se aplican a los conductores que tienen cuatro segmentos (con o sin canal central) y a las secciones de hasta 1 500 mm². Estos valores se aplican a los conductores en los que todas las capas de hilos van en el mismo sentido. Estos valores son provisionales estando sujetos a estudio.

** La fórmula siguiente es la que deberá utilizarse para el cálculo de k_s :

$$k_s = \frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i} \left(\frac{d'_c + 2 d_i}{d'_c + d_i} \right)^2$$

donde

d_i es el diámetro interior del conductor (canal central) (mm);

d'_c es el diámetro exterior del conductor de sección llena equivalente que tenga el mismo canal central (mm).

NOTA — Aunque hasta la presente no se haya aceptado ningún resultado experimental especialmente aplicable a los conductores cableados de aluminio, se recomienda a los usuarios aplicar a los conductores de aluminio cableado concéntrico los mismos métodos y los mismos coeficientes que los indicados para los conductores cableados de cobre análogos. El error estará entonces del lado de la seguridad.

De donde la expresión de la resistencia en c.a. de un conductor a la temperatura Θ de funcionamiento será:

$$R_{ica} = R_{tc} \left(1 + \frac{x_s^4}{192 + 0,8 x_s^4} + y_p \right) \quad (\Omega / m) \quad (2.8)$$

estas expresiones no deben emplearse para cables de secciones superiores a los 300 mm².

En los cables con envolventes metálicas, pantallas o armaduras se originan en ellas unas corrientes parásitas o de magnetización, que ocasionan unas pérdidas adicionales, que a la hora de la determinación de la caída de tensión en el cable, se cuantifican introduciendo el concepto de resistencia adicional, de donde la expresión de la resistencia en corriente alterna de un conductor con pantalla será:

$$R'_{tca} = R_{tca} (1 + \Delta R) \quad (\Omega / m) \quad (2.9)$$

Más adelante determinaremos el valor del incremento de la resistencia, reiteramos que únicamente a la hora de la determinación de la c.d.t y no cuando se determine el rendimiento.

2.4. RESISTENCIA Y REACTANCIA EFECTIVA

Sabemos que el coeficiente de autoinducción aparente de un cable de una línea aérea, tanto monofásicas, como trifásicas, viene dado por:

$$L_{aK} = (0,5 + 2 \ln \frac{d}{r}) 10^{-4} \quad (H / km) \quad (2.10)$$

siendo:

- d = Distancia entre los dos conductores en el caso de líneas monofásicas, o la distancia media geométrica entre conductores en el caso de líneas trifásicas en mm.

$$d = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}} \quad (mm)$$

- r = Radio del conductor en mm.

Por tanto la reactancia inductiva será:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{aK} \quad (\Omega / km) \quad (2.11)$$

Esta expresión valida para líneas aéreas, en el caso de cables aislados, no tiene en cuenta, que si el cable presenta una pantalla, en ella se induce una f.e.m. y por tanto unas corrientes que van a modificar el valor del coeficiente de autoinducción aparente, que cuantificaba la propia autoinducción del conductor, como la inducción mutua de los demás conductores.

Por tanto en el caso de cables aislados, la reactancia aparente se obtendrá al restar, a la reactancia del cable un término similar de naturaleza inductiva.

En efecto, sean dos conductores unipolares con recubrimiento metálico, el flujo creado por uno de los conductores corta al propio conductor, a su pantalla y al otro conductor y recubrimiento, y viceversa.

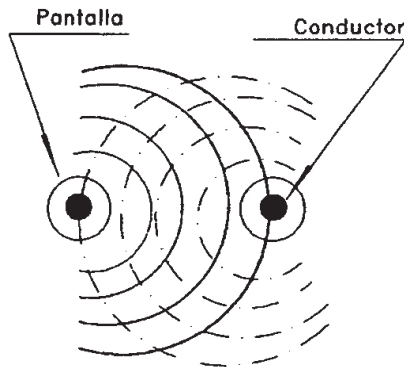


Figura 2.6

Aparece en estas condiciones unas inductancias mutuas entre el conductor y el recubrimiento metálico que pueden representarse por el siguiente esquema equivalente:

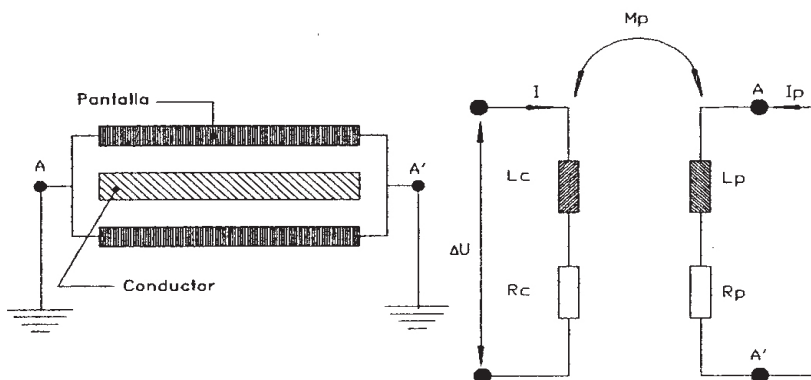


Figura 2.7

Pues bien el coeficiente de inducción mutua entre conductor y pantalla por kilómetro de conductor es:

$$M_p = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{d}{r_p} \quad (H / km) \quad (2.12)$$

- d = Distancia entre centros de recubrimientos para líneas monofásicas, o distancia media geométrica entre centros de recubrimientos metálicos en el caso de las trifásicas en mm, en resumen distancias entre cables.
- r_p = Radio medio de los recubrimientos metálicos en mm.

Por otro lado como el coeficiente de autoinducción de la pantalla será prácticamente igual al coeficiente de inducción mutua ($L_p \approx M_p$) puede calcularse el valor de la corriente de la pantalla, por medio de:

$$\vec{I} \cdot w \cdot M_p = \vec{I}_p \sqrt{R_p^2 + (w \cdot L_p)^2}$$

por tanto:

$$\vec{I} \cdot w \cdot M_p = \vec{I}_p \sqrt{R_p^2 + (w \cdot M_p)^2}$$

de donde:

$$\vec{I}_p = \frac{\vec{I} \cdot w \cdot M_p}{\sqrt{R_p^2 + (w \cdot M_p)^2}} \quad (A) \quad (2.13)$$

Conocido el valor de la corriente inducida en el recubrimiento metálico, podemos evaluar las pérdidas por efecto Joule, que se originan en el mismo y que originan un calentamiento extra en el cable:

$$P_{JP} = R_p \cdot I_p^2 = R_p \frac{I^2 \cdot w^2 \cdot M_p^2}{R_p^2 + w^2 \cdot M_p^2} \quad (W / m) \quad (2.14)$$

siendo:

- R_c = Resistencia del conductor a la temperatura de funcionamiento en Ω/m .
- I = Intensidad que circula por el conductor en amperios.
- R_p = Resistencia de la pantalla en Ω/m .
- M_p = Coeficiente de inducción mutua entre conductor y pantalla en H/m.

Es necesario evaluar las tensiones generadas por efecto inductivo en las pantallas o recubrimientos metálicos que pueden ser de importancia en algunos casos, a partir del esquema equivalente del conductor y pantalla, resulta que la c.d.t. por unidad de longitud en el conductor vale:

$$\Delta \vec{U} = \vec{U}_{1f} - \vec{U}_{2f} = \vec{I} (R_c + j \cdot w \cdot L_c) + \vec{I}_p \cdot w \cdot M_p \quad (V)$$

por otro lado, puesto que los extremos de los recubrimientos metálicos, están conectados a tierra, tenemos que en la pantalla la c.d.t. será:

$$0 = \vec{I}_p (R_p + j \cdot w \cdot L_p) + \vec{I} \cdot j \cdot w \cdot M_p$$

por lo que despejando de la ecuación anterior el valor de de la corriente en la pantalla, resulta:

$$\vec{I}_p = \frac{-\vec{I} \cdot j \cdot w \cdot M_p}{R_p + j \cdot w \cdot L_p}$$

sustituyendo el valor de la corriente en la pantalla y recordando que $L_p \approx M_p$ tenemos:

$$\Delta \vec{U} = \vec{I} (R_c + j \cdot w \cdot L_c) + \frac{-\vec{I} \cdot j \cdot w \cdot M_p}{R_p + j \cdot w \cdot L_p} (j \cdot w \cdot M_p) \quad (V)$$

operando tenemos:

$$\Delta \vec{U} = \vec{I} (R_c + j \cdot w \cdot L_c) + \frac{\vec{I} \cdot w^2 \cdot M_p^2}{R_p + j \cdot w \cdot M_p} \quad (V)$$

multiplicando el segundo término de la ecuación por el conjugado del denominador resulta:

$$\Delta \vec{U} = \vec{I} (R_C + j \cdot w \cdot L_C) + \frac{\vec{I} \cdot w^2 \cdot M_P^2 \cdot (R_P - j \cdot w \cdot M_P)}{R_P^2 + w^2 \cdot M_P^2} =$$

$$= \vec{I} (R_C + j \cdot w \cdot L_C) + \vec{I} \left(\frac{w^2 \cdot M_P^2 \cdot R_P}{R_P^2 + w^2 \cdot M_P^2} - j \frac{w^3 \cdot M_P^3}{R_P^2 + w^2 \cdot M_P^2} \right)$$

por tanto la impedancia del conductor es por definición:

$$\bar{Z}_C = \frac{\Delta \vec{U}}{\vec{I}} = (R_C + j \cdot w \cdot L_C) + \left(\frac{w^2 \cdot M_P^2 \cdot R_P}{R_P^2 + w^2 \cdot M_P^2} - j \frac{w^3 \cdot M_P^3}{R_P^2 + w^2 \cdot M_P^2} \right) (\Omega / km)$$

ordenando términos:

$$\bar{Z}_C = (R_C + R_P \frac{w^2 \cdot M_P^2}{R_P^2 + w^2 \cdot M_P^2}) + j (w \cdot L_C - \frac{w^3 \cdot M_P^3}{R_P^2 + w^2 \cdot M_P^2}) (\Omega / km)$$

puesto que la impedancia es la suma vectorial de una parte real (resistencia) y una parte imaginaria (reactancia inductiva), se denomina **resistencia efectiva** al término:

$$R_{efectiva} = (R_C + R_P \frac{w^2 \cdot M_P^2}{R_P^2 + w^2 \cdot M_P^2}) (\Omega / km) \quad (2.15)$$

o también:

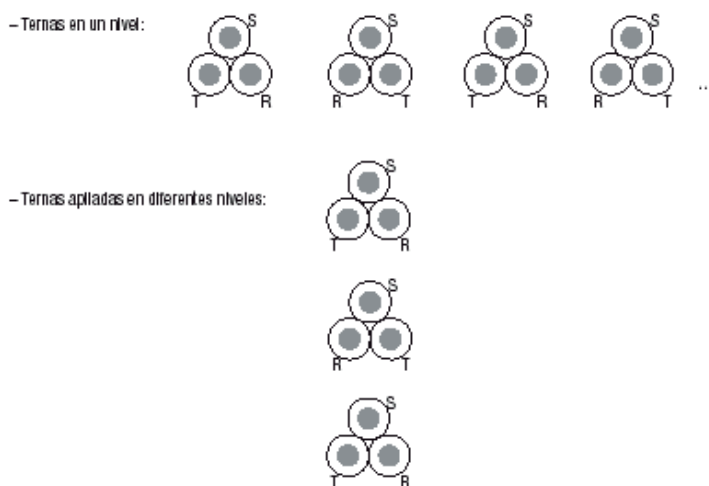
$$R_{efectiva} = R_C \left[1 + \frac{R_P \cdot w^2 \cdot M_P^2}{(R_P^2 + w^2 \cdot M_P^2) R_C} \right] = R_C [1 + \Delta R] (\Omega / km) \quad (2.16)$$

de igual modo la **reactancia efectiva** de un cable apantallado o armado, será:

$$X_{efectiva} = w \cdot L_C - \frac{w^3 \cdot M_P^3}{R_P^2 + w^2 \cdot M_P^2} (\Omega / km) \quad (2.17)$$

Las expresiones obtenidas para la resistencia y reactancia efectivas son válidas exclusivamente para conductores apantallados ó armados, puestas a tierra las pantallas y/o armaduras en ambos extremos y para líneas monofásicas o trifásicas, con los conductores situados en los vértices de un triángulo equilátero. Cuando la corriente es muy elevada, es preciso emplear varios cables en paralelo por fase, la resistencia y reactancia efectiva deberá ser la misma para todos ellos, lo que implica un adecuado reparto de la corriente.

Para obtener dicho adecuado reparto de la corriente, existen dos posibles soluciones: emplear varios cables tripolares en paralelo y cada cable tripolar se conectará a las tres fases o en el caso de utilizar varios cables unipolares por fase, lo idóneo es acoplar los cables por ternas, estando conectados los cables de una terna a cada una de las fases y disponer los cables en los vértices de un triángulo equilátero. Cuando se desee disponer los cables en capa empleando cables unipolares, se deben agrupar por ternas, estando los cables pertenecientes a una terna más próximos entre si que las ternas adyacentes efectuando transposiciones, tal y como indica la ITC-BT 07 en su apartado 2.1.6 y como ejemplo de disposición idónea tenemos:



Otros métodos para reducir las corrientes en las cubiertas metálicas, pero que como soluciones son más complejas son:

- Transponer las armaduras o pantallas, permaneciendo fijos en su posición los conductores.
- Transponer los conductores, permaneciendo fijas en su posición las armaduras o pantallas.

NOTA: A tener en cuenta que la resistencia efectiva se emplea exclusivamente a la hora del cálculo de la variación de tensión en la línea y no a la hora de evaluar las pérdidas en los cables eléctricos, ya que se estudiarán las pérdidas que se originan en cada una de las partes constitutivas del cable eléctrico.

2.5. CAPACIDAD: REACTANCIA CAPACITIVA

En los cables eléctricos aparece un efecto capacitivo, puesto que se conforman unos condensadores. En efecto las armaduras del condensador están constituidas por dos cables eléctricos o un cable eléctrico y la pantalla o armadura y el dieléctrico es el propio aislante del cable. De tal suerte que la capacidad viene dada por:

○ Cables unipolares:

$$C_e = \frac{0,0555 \cdot \epsilon_r}{\ln \frac{r_2}{r_1}} 10^{-6} \quad (F / km) \quad (2.18)$$

siendo:

- ϵ_r = Constante dieléctrica relativa del aislante.
- r_1 = Radio del conductor en mm.
- r_2 = Radio de la pantalla o envolvente en mm.

○ Cables bipolares:

$$C_e = \frac{0,0277 \cdot \epsilon_r}{\ln \frac{k \cdot d}{r_1}} 10^{-6} \quad (F / km) \quad (2.19)$$

siendo:

- ϵ_r = Constante dieléctrica relativa del aislante
- k = constante

$$k = \frac{R^2 - a^2}{R^2 + a^2}$$

- R = Radio de la pantalla en mm.
- a = Radio del manguito aislante que envuelve a un cable en mm.
- d = Distancia entre centros de conductores en mm.
- r = Radio del conductor en mm.

○ **Cable tripolar:**

$$C_e = \frac{0,0555 \cdot \epsilon_r}{\ln \frac{k \cdot d}{r_1}} 10^{-6} \quad (F / km) \quad (2.20)$$

siendo:

- ϵ_r = Constante dieléctrica relativa del aislante
- k = constante

$$k = \frac{2 (R^2 - a^2)}{2 \cdot R^2 + a^2}$$

- R = Radio de la pantalla en mm.
- a = Radio del manguito aislante que envuelve a un cable en mm.
- d = Distancia entre centros de conductores en mm.
- r = Radio del conductor en mm.

Estas capacidades crean una reactancia capacitiva de valor:

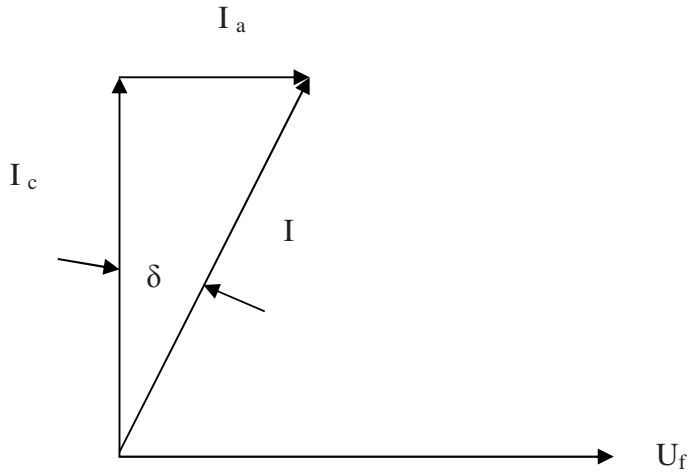
$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_e} \quad (\Omega / km) \quad (2.21)$$

por tanto aparecerá una corriente de tipo capacitiva, que adelantará 90° respecto a la tensión, de valor:

$$I_c = \frac{U_f}{X_c} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_e \cdot U_f \quad (A / km) \quad (2.22)$$

siendo U_f la tensión simple o de fase.

Por otro lado el dieléctrico constituido por el material aislante, no es perfecto y a través de él circula una corriente de pérdidas de naturaleza activa (I_a) y por tanto en fase con la tensión aplicada, de donde el diagrama vectorial que tiene en cuenta ambas corrientes es:



de donde la intensidad a través del aislante es:

$$\vec{I} = \vec{I}_c + \vec{I}_a \quad (A/km) \quad (2.23)$$

en el diagrama vectorial, se ha definido un ángulo δ , tal que:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c}$$

a la relación entre ambas corrientes activa y reactiva, es decir a la tangente de δ , se denomina factor de pérdidas del dieléctrico, puesto que determina la bondad del mismo en cuanto a sus propiedades.

Dichas corrientes generan unas potencias activas y reactivas de valor:

$$P_{\text{aislante}} = U_f \cdot I_a = I_c \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot U_f = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_e \cdot U_f^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (W/km) \quad (2.24)$$

$$Q_{\text{aislante}} = U_f \cdot I_C = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_e \cdot U_f^2 \quad (\text{VAR/km}) \quad (2.25)$$

a tener en cuenta que en estas dos expresiones la capacidad debe ser expresada en F/m.

A continuación se detallan según la norma UNE 21144-1-1:1997, los valores numéricos de la constante dieléctrica relativa o permitividad relativa ϵ_r y del factor de pérdidas $\text{tg } \delta$ de los materiales normalmente utilizados y de las tensiones de empleo en kV, a partir de las que se deberá tener en cuenta las pérdidas en el dieléctrico.

Hay que recordar el hecho, de que los cables aislados con materiales sintéticos extrusionados, PVC, EPR y XLPE instalados en ambientes húmedos o mojados sufren una degradación en sus cualidades aislantes con el paso del tiempo, que se estabiliza al cabo de pocos meses en el caso del EPR en valores muy próximos a los iniciales, pero que sigue agravándose en el caso del XLPE lo que obliga a una severa protección contra el agua en los cables aislados con este material, que puede llegar al caso de requerir el empleo de cubiertas metálicas herméticas.

Tabla 3

Valores numéricos de la permisividad relativa y del factor de pérdidas de los aislamientos utilizados en los cables de alta tensión y media tensión a la frecuencia industrial

1	2	3																						
Tipo de cable	ϵ	$\text{tg } \delta''$																						
<i>Cables aislados con papel Impregnado</i>																								
Tipo "sólido", de impregnación total, preimpregnado o impregnado con materia no migrante	4	0,01																						
De aceite fluido, con cubierta metálica ¹⁾ Hasta $U_0= 36$ kV	3,6	0,0035																						
Hasta $U_0= 87$ kV	3,6	0,0033																						
Hasta $U_0= 160$ kV	3,5	0,0030																						
Hasta $U_0= 220$ kV	3,5	0,0028																						
De presión de aceite, tipo en tubo ²⁾	3,7	0,0045																						
De presión externa de gas ³⁾	3,6	0,0040																						
De presión interna de gas ⁴⁾	3,4	0,0045																						
<i>Cables aislados con otros materiales⁵⁾</i>																								
Goma butílica	4	0,050																						
EPR	3	0,020																						
Cables de tensiones inferiores o iguales a 18/30 (36) kV	3	0,005																						
Cables de tensiones superiores a 18/30 (36)kV	8	0,1																						
PVC	2,3	0,001																						
PE (HD y LD)																								
XLPE	2,5	0,004																						
Cable de tensiones inferiores o iguales a 18/30 (36) kV (no "cargado")	2,5	0,001																						
Cables de tensiones superiores a 18/30 (36) kV (no "cargado")	3,0	0,005																						
Cables de tensiones superiores a 18/30 (36) kV ("cargados")																								
* Valores de seguridad relativos a la máxima temperatura admisible, y aplicable a la mayor tensión normalmente especificada para tipo de cable.																								
1) Véase CEI 141-1.																								
2) Véase CEI 141-4.																								
3) Véase CEI 141-3.																								
4) Véase CEI 141-2.																								
5) Véase UNE 21123.																								
NOTA — Deberá tenerse en cuenta las pérdidas dieléctricas para valores de U_0 iguales o superiores a los siguientes:																								
<table><tr><th>Tipo de cable</th><th>U_0 (kV)</th></tr><tr><td colspan="2"><i>Cables aislados con papel impregnado</i></td></tr><tr><td>Tipo "sólido"</td><td>38</td></tr><tr><td>Con aceite fluido y presión de gas</td><td>63,5</td></tr><tr><td colspan="2"><i>Cables aislados con otros materiales</i></td></tr><tr><td>Goma butílica</td><td>18</td></tr><tr><td>EPR</td><td>63,5</td></tr><tr><td>PVC</td><td>6</td></tr><tr><td>PE (HD y LD)</td><td>127</td></tr><tr><td>XLPE (no "cargado")</td><td>127</td></tr><tr><td>XLPE ("cargado")</td><td>63,5</td></tr></table>			Tipo de cable	U_0 (kV)	<i>Cables aislados con papel impregnado</i>		Tipo "sólido"	38	Con aceite fluido y presión de gas	63,5	<i>Cables aislados con otros materiales</i>		Goma butílica	18	EPR	63,5	PVC	6	PE (HD y LD)	127	XLPE (no "cargado")	127	XLPE ("cargado")	63,5
Tipo de cable	U_0 (kV)																							
<i>Cables aislados con papel impregnado</i>																								
Tipo "sólido"	38																							
Con aceite fluido y presión de gas	63,5																							
<i>Cables aislados con otros materiales</i>																								
Goma butílica	18																							
EPR	63,5																							
PVC	6																							
PE (HD y LD)	127																							
XLPE (no "cargado")	127																							
XLPE ("cargado")	63,5																							

2.6. MATERIALES AISLANTES: PARÁMETROS ELÉCTRICOS

Cuando un cable eléctrico aislado es sometido a tensión, se generan en el seno de su aislamiento una serie de fenómenos que se traducen en una corriente de fuga, puesto que la resistencia de aislamiento no es infinita, y en la presencia de un campo eléctrico no uniforme que limita la tensión de aplicación al cable y se define:

2.6.1. Resistencia de aislamiento

Es la resistencia (R_i) que se opone al paso de la corriente entre los conductores y tierra, a través del aislante y suele expresarse en $M\Omega/km$.

Llamando:

- l = Longitud de cable en km.
- r = Radio del conductor en mm.
- R = Radio del cable aislado en mm.
- ρ_D = Resistividad del aislante en $M\Omega$.

Por tanto la resistencia de aislamiento de un cable de longitud " l " será la suma de la resistencia de cada una de las coronas elementales de radio medio " x " y espesor " dx " que se pueden definir dentro del aislante por tanto tenemos:

$$R_i = \int_r^R \frac{\rho_D}{2 \cdot \pi \cdot x \cdot l} = \frac{\rho_D}{2 \cdot \pi \cdot l} \ln \frac{R}{r} = \frac{2,3 \cdot \rho_D}{2 \cdot \pi \cdot l} \lg_{10} \frac{R}{r}$$

llamando:

$$K_i = \frac{2,3 \cdot \rho_D}{2 \cdot \pi} = 0,367 \cdot \rho_D$$

por tanto resulta finalmente que la resistencia de aislamiento vienen dada por:

$$R_i = \frac{K_i}{l} \lg_{10} \frac{R}{r} \quad (M\Omega / km) \quad (2.26)$$

Los valores mínimos aceptables de K_i en $M\Omega/km$ a $20^\circ C$ son:

- Policloruro de vinilo: $36,7 M\Omega/km$.
- Goma etileno-propileno: $3670 M\Omega/km$.

Debe tenerse en cuenta que la resistencia de aislamiento es inversamente proporcional a la longitud. Cuando la longitud medida es distinta de un kilómetro, deberá ajustarse el valor de la resistencia obtenida en el ensayo a la longitud específica y así determinar la resistencia específica de aislamiento.

Ejemplo: En un tramo de 30 m se ha medido una resistencia de aislamiento de 400 MΩ de donde la resistencia específica de aislamiento es: $R_i = 400 \times 0,03 = 12 \text{ M}\Omega/\text{km}$.

En los cables aislados con PVC pueden aceptarse resistencias de aislamiento de algunas decenas de MΩ/km. Sin embargo, debe destacarse que los valores de K_i para el EPR o el XLPE deben de ser cien veces mayores que los del PVC, por lo que en consecuencia los cables aislados con dichos aislantes deben presentar resistencias de aislamiento del orden de 1000 MΩ/km o superiores.

2.6.2. Constante dieléctrica relativa

También conocida con el nombre de permitividad (ϵ_r), es la relación existente entre la densidad de flujo que en presencia de un campo eléctrico, atraviesa un aislamiento determinado y la que se obtendría si el dieléctrico fuese el aire. Es un factor primordial para determinar la capacidad electrostática de un cable.

2.6.3. Rigidez dieléctrica

Es la tensión máxima en voltios o kilovoltios, que soporta entre sus caras una placa de material aislante, de espesor (l en metros) sin llegar a perforarse. Por lo tanto es el campo eléctrico mínimo que medido en V/m (o kV/cm) perfora el aislamiento.

2.6.4. Gradiente eléctrico

Es la relación existente entre la tensión presente entre dos puntos de un aislamiento y la distancia que los separa, se mide por tanto en V/m (o kV/cm).

El gradiente eléctrico definido como la relación entre la d.d.p. aplicada entre las dos caras de unas placas de material aislante, es válida para el caso de que se trate de una lámina plana. En el supuesto de un cable, el gradiente de potencial no tiene un valor constante, sino que es inversamente proporcional al radio de la curvatura del campo eléctrico, ya que el aislamiento está limitado por dos superficies cilíndricas concéntricas.

En efecto, la intensidad de campo eléctrico (E) creada por un conductor a una distancia "x" del centro del mismo vienen dada por:

$$E(x) = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot x}$$

por otro lado la d.d.p. respecto a tierra del conductor será:

$$U_f = U_{cond} - U_{pantalla} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \ln \frac{R}{r}$$

pero puesto que la pantalla, está puesta a tierra resulta que $U_{pant} = 0$ por tanto resulta finalmente que el gradiente eléctrico, vale:

$$E(x) = \frac{U_f}{x \ln \frac{R}{r}} \quad (V/m) \quad (2.27)$$

siendo:

- U_f = Tensión del conductor respecto a tierra o tensión simple en V.
- R = Radio de la pantalla en mm.
- r = Radio del conductor en mm.
- x = Punto donde se desea determinar el campo eléctrico, cuya distancia al centro del conductor viene medida en m.

El valor del campo eléctrico E(x) será máximo, cuando x tenga su valor mínimo, esto es cuando $x = r$ por tanto estamos considerando un punto en la periferia del conductor o en la superficie interna del aislamiento. En este punto la intensidad de campo eléctrico o gradiente eléctrico no debe ser superior a la décima parte del valor de la rigidez dieléctrica del material de que se trate.

Por tanto resulta que la distribución del gradiente eléctrico en el aislamiento es de la forma indicada en la figura, máximo en la superficie interna del aislamiento y mínimo en la superficie externa del aislamiento.

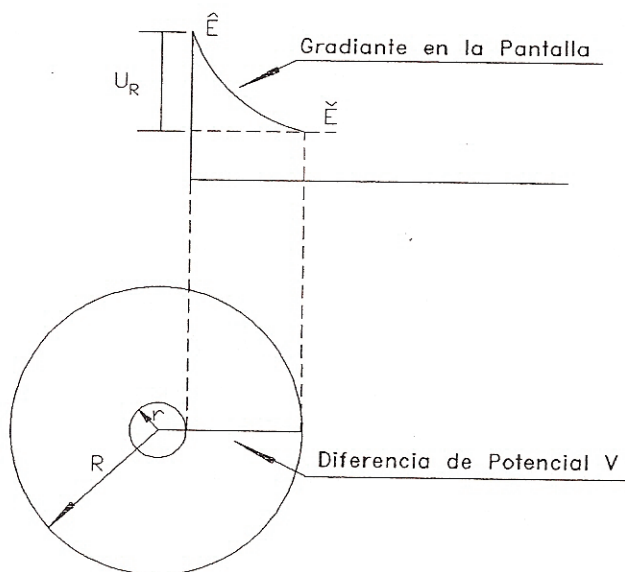


Figura 2.8

El orden de magnitud del valor de $E(x)$ puede ser de 5 kV/mm llegando a los 10 kV/mm en algunos cables de muy alta tensión (M.A.T.).

2.6.5. Descargas parciales

Sabemos que el gradiente eléctrico presente en el seno del aislamiento, puede alcanzar valores de 5 kV/mm. Ahora bien sabemos que con valores del orden de 1 kV/mm se pueden producir descargas parciales en el seno de un gas. Por lo tanto es posible que si en el seno del aislamiento han quedado vacíos en el proceso de fabricación, al ser sometido el gas ocluido en su seno, normalmente aire o vapor de agua, a un gradiente de tensión superior al de su ionización, se provoque la formación de iones a partir de los átomos de dicho gas. Estos iones acelerados por el campo eléctrico presente, si tienen suficiente espacio de recorrido libre, adquieran una velocidad y en consecuencia una energía cinética que puede ser capaz de arrancar nuevos átomos de las paredes de las burbujas, que a su vez se ionizan, convirtiéndose en nuevos proyectiles y provocando una avalancha de partículas cargadas, que se conocen con el nombre de descargas parciales.

Las descargas parciales se pueden producir en cualquier lugar del cable, entre el conductor y el aislamiento (efecto corona en las líneas aéreas), en el seno del aislamiento (descargas parciales internas) o en la superficie del aislamiento (descargas parciales externas).

Para seguir leyendo haga click aquí