Índice

Presentación 5

Indice. 7

1 Introducción a la corriente alterna 13
1.1 *Introducción* 13
1.2 *Generación de corriente alterna* 13
1.2.1 Conductor que se mueve en el seno de un campo magnético, con dirección oblicua a las líneas de fuerza 13
1.2.2 Generación de una fuerza electromotriz senoidal 14
1.2.3 Otras clases de corriente alterna 15
1.3 *Valores fundamentales de la corriente alterna senoidal* 15
1.3.1 Frecuencia 15
1.3.2 Período 16
1.3.3 Valor instantáneo 16
1.3.4 Valor máximo 16
1.3.5 Valor eficaz 16
1.3.6 Valor medio 16
1.3.7 Relaciones entre los valores máximo ($A_{máx.}$), medio ($A_{med.}$) y eficaz (A) de una corriente alterna senoidal 16
1.4 *Representación gráfica* 17
1.4.1 Representación en coordenadas cartesianas 17
1.4.2 Representación vectorial o de Fresnel 18
1.4.3 Fase 18
1.4.4 Angulo de fase 18
1.4.5 Algunos ejemplos de representación de funciones senoidales 19
1.5 *Operaciones con funciones senoidales* 19
1.5.1 Suma y resta 19
1.5.2 Producto y cociente 20

2 Circuitos de corriente alterna 22
2.1 *Introducción* 22
2.2 *Los números complejos* 22
2.2.1 Números complejos. Definición. Clases 22
2.2.2 Comparación de los vectores y los complejos 23
2.2.3 Representación de un número complejo 23
2.2.4 Operaciones con complejos 23
2.3 *Potencia entregada a un receptor* 25
2.3.1 El receptor está alimentado por corriente continua 25
2.3.2 El receptor está alimentado por corriente alterna 25
2.3.3 Factor de potencia 26
2.4 *Elementos pasivos: resistencia, bobina, condensador. Su comportamiento en corriente alterna* 28
2.4.1 Circuito con resistencia pura 28
2.4.2 Circuito con inductancia pura 28
2.4.3 Circuito con capacidad pura 30
2.5 *Circuitos en serie* 31
2.5.1 Circuito en serie RL 31
2.5.2 Circuito en serie RC 33
2.5.3 Circuito en serie RLC 35
2.5.4 Cálculo de circuitos en serie más complejos 37
2.5.5 Resonancia en serie 39
2.6 *Circuitos en paralelo* 39
2.6.1 Valor de la tensión y la corriente 40
2.6.2 Admitancia, conductancia y susceptancia de un circuito en paralelo 40
2.6.3 Resonancia en paralelo 41
2.7 *Circuitos mixtos* 42
2.8 *Mejora del factor de potencia* 43
2.8.1 Cálculo del condensador de corrección del factor de potencia 43

3 Corrientes polifásicas 46
3.1 *Introducción* 46
3.2 *Sistemas polifásicos de fuerzas electromotrices* 46
3.3 *Sistema bifásico de fuerzas electromotrices* 47
3.3.1 Tensiones y corrientes en un sistema bifásico (de tres hilos) 47
3.3.2 Potencias en un sistema bifásico 48
3.4 *Sistema trifásico de fuerzas electromotrices* 48
3.4.1 Conexionado de las bobinas de un alternador trifásico 49
3.4.2 Tensiones y corrientes en un sistema trifásico 49
3.4.3 Corrientes de fase y corrientes de línea en un sistema trifásico 51

3.5 *Proceso de cálculo de los sistemas trifásicos* 52
3.5.1 Carga equilibrada en conexión estrella (Y) 52
3.5.2 Carga equilibrada en conexión triángulo (Δ) 53
3.5.3 Carga desequilibrada en conexión triángulo (Δ) 54
3.5.4 Carga desequilibrada en conexión estrella (sin neutro) 55
3.5.5 Carga desequilibrada en conexión estrella (con neutro) 56
3.6 *Potencia eléctrica en los sistemas trifásicos* 57
3.6.1 Potencia de los sistemas trifásicos equilibrados 57
3.6.2 Potencia en los sistemas desequilibrados 60
3.7 *Mejora del factor de potencia en sistemas trifásicos* 60
3.8 *Transformaciones triángulo a estrella y estrella a triángulo* 60

4 Máquinas de corriente continua rotativas 63
4.1 *Máquinas de corriente continua rotativas* 63
4.2 *Dinamos* 65
4.2.1 Funcionamiento de un generador elemental 65
4.2.2 Generador de corriente continua 65
4.3 *Fuerza electromotriz producida en una espira* 67
4.4 *Construcción de las dinamos* 68
4.5 *Plano neutro* 70
4.6 *Reacción de inducido* 70
4.6.1 Problemas de la reacción de inducido 70
4.7 *Conmutación* 71
4.7.1 Estudio analítico del proceso de conmutación 71
4.7.2 Mejora del proceso de conmutación 73
4.8 *Tipos de dinamos según su excitación* 73
4.9 *Máquina de corriente continua con excitación independiente. Característica en vacío* 74
4.9.1 Característica exterior de una máquina de c. c. con excitación independiente 74
4.9.2 Característica de regulación 74
4.10 *Máquina de corriente continua con excitación en serie* 75
4.10.1 Característica exterior de una máquina de c. c. con excitación en serie 75
4.11 *Dinamo con excitación en derivación. Máquina shunt* 76
4.11.1 Influencia de las variaciones de velocidad 76
4.12 *Generador en derivación en carga. Característica exterior* 77
4.12.1 Tensiones y corrientes en una dinamo shunt 78
4.13 *Dinamo de excitación compound* 78
4.13.1 Estudio de corrientes y tensiones en la dinamo compound 79
4.14 *Ventajas e inconvenientes de la dinamo en serie, derivación y compound* 79
4.15 *Acoplamiento de las dinamos* 80
4.15.1 Acoplamiento de generadores con excitación independiente 80
4.15.2 Acoplamiento en paralelo de generadores en serie 81
4.15.3 Acoplamiento en paralelo de generadores shunt 81
4.15.4 Acoplamiento de generadores compound 82

5 Motores de corriente continua 84
5.1 *Generalidades* 84
5.1.1 Reversibilidad 84
5.1.2 Inversión del sentido de giro 85
5.2 *Principio de funcionamiento de un motor de corriente continua* 85
5.2.1 Motor elemental de corriente continua 85
5.2.2 Número de escobillas de una máquina de corriente continua 86
5.2.3 Corrientes circulatorias y conexiones de compensación 86
5.3 *Conmutación* 86
5.4 *Reacción de inducido* 87
5.5 *Fuerza contraelectromotriz* 87
5.6 *Par y potencia nominal de los motores de corriente continua* 88
5.6.1 Par 88
5.6.2 Potencia y rendimiento 88
5.7 *Tipos de motores según excitación* 89
5.7.1 Serie 89
5.7.2 Derivación 90
5.7.3 Compound 90
5.8 *Sistemas de arranque de los motores de c. c.* 91
5.9 *Características de funcionamiento de los motores de corriente continua* 92
5.10 *Control de la velocidad de los motores de c. c.* 93
5.10.1 Control reostático 94
5.10.2 Acoplamiento de motores 94
5.10.3 Actuación sobre el campo inductor 94
5.10.4 Control electrónico del motor de c. c. 95
5.11 *Alimentación del motor de c. c. Rectificadores* 96
5.11.1 Rectificador de salida regulable mediante tiristores 96
5.11.2 Rectificación trifásica controlada con puente de SCR 96
5.12 *Frenado dinámico* 97
5.13 *Ventajas e inconvenientes de los motores de c. c. y resumen de los circuitos de regulación* 98
5.13.1 Resumen de los circuitos de regulación 99

6 Máquinas de corriente alterna rotativas 101
6.1 *Introducción* 101
6.1.1 Características comunes de las máquinas síncronas 101
6.1.2 Número de fases del inducido y clase de rotores de las máquinas síncronas 102
6.2 *Principio de funcionamiento de un alternador* 103
6.2.1 Alternador trifásico 104
6.2.2 Valor de la f. e. m. generada por fase en una máquina síncrona 104
6.3 *Polos inductores* 105
6.4 *Excitación de las máquinas* 106
6.5 *Bobinados del estator* 106
6.6 *Características generales* 107
6.6.1 Tensión nominal 107
6.6.2 Velocidad 107
6.6.3 Límites de la variación de tensión 107

6.6.4 Ensayo de cortocircuito brusco 107
6.6.5 Sobrevelocidad 108
6.6.6 Devanados estatóricos 108
6.6.7 Excitación principal 108
6.7 *Características de los alternadores refrigerados por aire* 108
6.7.1 Potencia 108
6.7.2 Factor de potencia y relación de cortocircuito 108
6.7.3 Refrigeradores de aire 108
6.8 *Ensayo de saturación en vacío* 108
6.8.1 Curva característica 109
6.9 *Ensayo de cortocircuito trifásico permanente* 109
6.9.1 Curva característica 109
6.10 *Ensayo de cortocircuito brusco* 110
6.10.1 Otras clases de ensayos 110
6.11 *Determinación de la reactancia síncrona longitudinal a partir de las curvas de saturación de vacío y cortocircuito permanente* 110
6.11.1 Determinación de la relación de cortocircuito 111
6.12 *Diagrama de Potier* 111
6.12.1 Determinación de la intensidad nominal de excitación por medio del diagrama de Potier 111
6.13 *Diagrama de Behn-Eschenburg* 112
6.14 *Acoplamiento de alternadores* 112
6.14.1 Sincronoscopios 113
6.15 *Reparto de carga entre generadores que trabajan acoplados en paralelo* 114
6.15.1 Reparto de la carga entre dos generadores trifásicos síncronos que trabajan acoplados en paralelo 114
6.15.2 Reparto de la potencia reactiva 114

7 Campo giratorio 116
7.1 *Definiciones del campo y campo giratorio* 116
7.2 *Concepto geométrico con aplicación en electricidad y magnetismo* 117
7.3 *Efecto del campo giratorio sobre un rotor* 117
7.3.1 Reflexión de ambas experiencias 117
7.4 *Campo creado por un sistema de corrientes equilibradas senoidales* 117
7.4.1 Intensidades e inducciones instantáneas producidas en un sistema polifásico 118
7.4.2 Descomposición del campo giratorio en otros dos 118
7.5 *Campo giratorio trifásico* 119
7.5.1 Valor del campo giratorio producido por un sistema de corrientes trifásicas 119
7.6 *Representación del campo giratorio* 120
7.7 *Campo producido por una corriente monofásica* 121
7.8 *Campo producido por una corriente bifásica* 122
7.9 *Aplicaciones de los campos giratorios* 122
7.10 *Velocidad de sincronismo* 123

8 Motores de corriente alterna 124
8.1 *Generalidades* 124
8.1.1 Clasificación de los motores eléctricos 125
8.2 *Motor asíncrono trifásico: fundamento y construcción* 125
8.3 *Rotor en cortocircuito o jaula de ardilla y rotor bobinado* 126
8.3.1 Rotor en cortocircuito 126
8.3.2 Rotor bobinado 126
8.3.3 Motor de rotor mixto 126
8.4 *Deslizamiento y frecuencia del rotor* 126
8.4.1 Deslizamiento 126
8.4.2 Frecuencia del rotor 127
8.5 *Campo giratorio* 128
8.6 *Principio de funcionamiento y ff. ee. mm. del rotor y estator* 128
8.6.1 Rotor en reposo 129
8.6.2 Rotor en movimiento 129
8.7 *Par motor* 129
8.7.1 Par nominal o momento de rotación nominal 130
8.7.2 Par de arranque 130
8.8 *Diversas magnitudes que tienen influencia en el funcionamiento del motor* 130
8.8.1 Influencia de la tensión de alimentación 130
8.8.2 Influencia de la frecuencia 131
8.8.3 Influencia del deslizamiento 131
8.8.4 Influencia de la resistencia rotórica 132
8.8.5 Efectos de la variación de tensión y frecuencia 132
8.9 *Averías más frecuentes en los motores asíncronos trifásicos* 132
8.10 *Rendimiento* 132
8.11 *Motores asíncronos monofásicos* 136
8.11.1 Motor monofásico con bobinado auxiliar de arranque o de fase partida 137
8.11.2 Motores monofásicos de espira en cortocircuito 137
8.12 *Motores universales* 138
8.13 *Motores síncronos* 138
8.13.1 Ventajas e inconvenientes del motor síncrono 140
8.14 *Aplicaciones especiales de la máquina asíncrona, como regulador de inducción, convertidor de frecuencia y motor asíncrono sincronizado* 140
8.14.1 Regulador de inducción 140
8.14.2 Convertidor de frecuencia 140
8.14.3 Motores asíncronos sincronizados 140
8.15 *Protección de las máquinas y clases de servicios* 141
8.16 *Servicio de los motores* 142

9 Procedimientos de arranque e inversión de giro de los motores 144
9.1 *Introducción* 144
9.1.1 Arranque de un motor 144
9.2 *Corriente de arranque* 145
9.3 *Procedimientos de arranque para motores asíncronos trifásicos* 145
9.3.1 Acción sobre el circuito del estator 145
9.3.2 Acción sobre el circuito del rotor 149
9.4 *Puesta en marcha de los motores síncronos* 151
9.4.1 Arranque como motor asíncrono 151
9.4.2 Motor asíncrono sincronizado 151
9.4.3 Arranque mediante motor de arrastre 152
9.5 *Inversión del sentido de giro de los motores asíncronos* 152

10 Relés de protección 153
10.1 *Conocimientos generales* 153
10.1.1 Diagrama bloque de los relés de protección 154
10.1.2 Características de los relés 154

10.2 *Enumeración de los criterios que se deben seguir para detectar una anomalía en una instalación* 154
10.3 *Características eléctricas de construcción de los relés de protección* 155
10.3.1 Relés de inducción 155
10.3.2 Relés electromagnéticos 155
10.3.3 Relés electrónicos 155
10.3.4 Relés electrodinámicos 155
10.3.5 Relés térmicos 156
10.4 *Relés de protección, según la magnitud eléctrica que vigilan* 156
10.4.1 Relé diferencial 156
10.4.2 Relé de tensión 160
10.4.3 Relés de intensidad 160
10.4.4 Relés de impedancia 164
10.4.5 Relés de frecuencia 164
10.4.6 Relés de potencia 164
10.5 *Puesta a tierra de las máquinas* 164
10.5.1 Protección contra contactos 165
10.6 *Normas del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión para la puesta a tierra* 165
10.6.1 Partes que comprenden las puestas a tierra 166
10.6.2 Tomas de tierra 166
10.6.3 Líneas principales de tierra 166
10.6.4 Conductores de protección 166
10.7 *Protección de las instalaciones* 166

11 Convertidores rotativos 168
11.1 *Introducción* 168
11.1.1 Definición 169
11.1.2 Clases de convertidores 169
11.1.3 Ventajas e inconvenientes 169
11.2 *Grupos convertidores* 169
11.2.1 Funcionamiento 169
11.2.2 Motor c. a.-Dinamo (c. a./c. c.) 170
11.2.3 Motor de c. c.-Alternador (c. c./c. a.) 170
11.2.4 Convertidor de frecuencias 171
11.2.5 El dinamotor 172
11.3 *Conmutatrices* 173
11.3.1 Principios de funcionamiento 173
11.3.2 Utilización de las conmutatrices 173
11.4 *Tensiones de una conmutatriz* 174
11.4.1 Relación de tensiones en una conmutatriz monofásica 174
11.4.2 Relación de tensiones en una conmutatriz polifásica 175
11.5 *Intensidad de una conmutatriz* 175
11.5.1 Relación de las corrientes de una conmutatriz 176
11.6 *Arranque de una conmutatriz* 177
11.6.1 Arranque de una conmutatriz por medios propios 178
11.6.2 Arranque de una conmutatriz por medios auxiliares 179

12 Convertidores estáticos 180
12.1 *Introducción* 180
12.2 *Conceptos generales sobre rectificadores* 180
12.3 *Funcionamiento de los rectificadores* 181
12.4 *Rectificadores de vapor de mercurio* 181
12.4.1 Anodo de encendido 181
12.5 *Rectificador monofásico de vapor de mercurio* 181
12.6 *Rectificador de vapor de mercurio polifásico* 182
12.6.1 Rectificador de vapor de mercurio trifásico 182
12.6.2 Rectificador de vapor de mercurio hexafásico 182
12.7 *Consideraciones generales* 182
12.7.1 Mantenimiento del vacío 182
12.7.2 Refrigeración 183
12.7.3 Características de los rectificadores de vapor de mercurio 183
12.8 *Ignitrón* 183
12.8.1 Funcionamiento del ignitrón 184
12.8.2 Ignitrones para rectificación 184
12.9 *Tiratrones* 184
12.9.1 Características de los gases 184
12.9.2 Cátodo 185
12.9.3 Anodo 185
12.9.4 Rejilla 185
12.9.5 Funcionamiento 185
12.9.6 Características de gobierno de un tiratrón 186
12.10 *Tiratrón tetrodo* 186
12.11 *Aplicación como rectificadores* 187
12.12 *Otros modos de control* 187
12.13 *Diodos semiconductores* 188
12.13.1 Características generales 188
12.14 *Rectificador de silicio* 188
12.14.1 Construcción 188
12.15 *Rectificadores de germanio* 189
12.15.1 Construcción 189
12.15.2 Características 189
12.16 *Rectificadores de óxido de cobre* 190
12.16.1 Construcción 190
12.16.2 Características 190
12.17 *Rectificadores de selenio* 190
12.17.1 Construcción 190
12.17.2 Funcionamiento 191
12.17.3 Características 191
12.18 *Circuito rectificador de onda completa* 192
12.18.1 Valor de la intensidad 192
12.18.2 Valor de las potencias y del rendimiento 193
12.19 *Puentes de rectificación* 193
12.19.1 Rectificador monofásico de onda completa o rectificador en puente 193
12.19.2 Rectificador trifásico de onda completa o rectificador trifásico en puente 195
12.20 *Tiristores* 196
12.20.1 Fundamento 196
12.20.2 Clasificación de los tiristores 197
12.21 *Onduladores* 199
12.21.1 Clasificación 199
12.21.2 Principio de funcionamiento 199
12.21.3 Ondulación mediante vibrador de tiristores 200
12.21.4 Ondulador en puente 200
12.21.5 Generalidades 200

13 Técnicas de iluminación 203
13.1 *Naturaleza de la luz* 203
13.1.1 Radiación 204
13.2 *Clasificación de las radiaciones electromagnéticas* 204
13.3 *Luminotecnia* 204
13.4 *Magnitudes fundamentales* 206
13.4.1 Definiciones 206
13.5 *Fórmulas fundamentales en la Luminotecnia* 206
13.5.1 Ley de la inversa del cuadrado de la distancia 206
13.5.2 Ley del coseno 207
13.6 *Resumen de las principales definiciones y unidades* 207
13.7 *Fuentes de luz* 207
13.8 *Incandescencia* 208

13.8.1 Filamento 208
13.8.2 Ampolla 209
13.8.3 Casquillo 209
13.9 *Clases de lámparas incandescentes* 209
13.9.1 Lámparas estándar 209
13.9.2 Lámparas incandescentes reflectoras 210
13.9.3 Lámparas de incandescencia con halógenos 210
13.10 *Lámparas de descarga* 211
13.11 *Fluorescencia* 212
13.12 *Composición de las lámparas de descarga* 212
13.12.1 Tubo de descarga 212
13.12.2 Electrodos 212
13.12.3 Gas de relleno 212
13.13 *Accesorios necesarios para el funcionamiento de las lámparas de descarga* 213
13.14 *Lámparas de vapor de mercurio* 213
13.14.1 Funcionamiento 213
13.14.2 Características 213
13.15 *Lámparas de luz mezcla* 214
13.15.1 Ventajas 214
13.15.2 Inconvenientes 214
13.16 *Lámparas de sodio* 214
13.17 *Lámparas de vapor de sodio a baja presión* 214
13.17.1 Funcionamiento 215
13.17.2 Características 215
13.17.3 Sistema de limitación de corriente 215
13.18 *Lámparas de vapor de sodio a alta presión* 215
13.18.1 Características constructivas 216
13.19 *Tubos fluorescentes* 217
13.20 *Composición de los tubos fluorescentes* 217
13.20.1 Tubo de descarga 217
13.20.2 Casquillos de conexión y electrodos 217
13.20.3 Gas de relleno 217
13.20.4 Polvos fluorescentes 218
13.21 *Sistemas de arranque de los tubos fluorescentes* 218
13.21.1 Circuitos de precalentamiento con cebador 218
13.21.2 Circuitos de arranque rápido con precalentamiento 218
13.22 *Cálculo de un alumbrado interior* 219
13.22.1 Determinación del coeficiente de utilización 219
13.22.2 Determinación del coeficiente de depreciación 219
13.22.3 Cálculo del flujo luminoso necesario 220
13.22.4 Cálculo del número de puntos de luz 221
13.22.5 Distribución de los puntos de luz 221
13.23 *Ejemplo de cálculo* 221
13.24 *Alumbrados publicitarios* 223
13.25 *Niveles medios de iluminación recomendables* 223
13.26 *Clases de fuentes de luz utilizables* 223
13.27 *Clases de aparatos a instalar* 223
13.28 *Instalaciones normales de alumbrado de carteles publicitarios* 224
13.28.1 Alumbrado de carteles publicitarios con tubos fluorescentes 224
13.28.2 Alumbrado de carteles publicitarios con proyectores simétricos provistos de lámparas incandescentes, estándar o de vapor de mercurio color corregido 225
13.28.3 Alumbrado de carteles publicitarios con proyectores asimétricos para lámparas incandescentes halogenadas 225

14 Técnicas y aparatos de medida 227
14.1 *Introducción a las medidas eléctricas* 227
14.1.1 Técnicas utilizadas en las mediciones eléctricas 228
14.2 *Características generales de los aparatos de medida* 228
14.2.1 Simbología 229
14.2.2 Funcionamiento 229
14.2.3 Amortiguamiento 230
14.2.4 Tipos de apoyos del órgano móvil 230
14.2.5 Dispositivos de lectura 230
14.2.6 Definiciones de términos relacionados con aparatos de medida 231
14.3 *Clasificación de los aparatos de medida* 231
14.3.1 Instrumentos de hierro móvil 232
14.3.2 Instrumentos de bobina móvil 233
14.3.3 Instrumentos electrodinámicos 233
14.3.4 Instrumentos térmicos 234
14.3.5 Instrumentos de inducción 235
14.3.6 Instrumentos de vibración 236
14.3.7 Instrumentos electrostáticos 236
14.4 *Medida de intensidades. Amperímetros* 236
14.4.1 Shunt amperimétrico 237
14.4.2 Técnica de medición de intensidades 237
14.5 *Medida de tensiones. Voltímetros* 238
14.5.1 Resistencia adicional del voltímetro 238
14.5.2 Técnicas de medición de tensiones 238
14.6 *Medición de potencias. Vatímetros* 238
14.6.1 Medida de potencia en corriente continua 239
14.6.2 Medida de potencia en corriente alterna monofásica 239
14.6.3 Medida de potencia activa en corriente alterna trifásica 239
14.6.4 Medida de potencia reactiva en corriente alterna trifásica 241
14.7 *Medida de energía. Contadores* 242
14.7.1 Medida de energía en corriente continua 242
14.7.2 Medida de energía en corriente alterna monofásica 243
14.7.3 Medida de energía activa en corriente alterna trifásica 244
14.8 *Registradores* 246
14.8.1 Descripción de un registrador de trazo continuo 247
14.9 *Medida de resistencias, inductancias y capacidades* 247
14.9.1 Medida de una resistencia con el voltímetro y amperímetro 247
14.9.2 Medición de una inductancia con voltímetro, amperímetro y vatímetro 248
14.9.3 Medición de la capacidad con amperímetro y voltímetro 248
14.9.4 Método de puentes para mediciones de resistencias, bobinas y condensadores 249
14.9.5 Medición de resistencias de aislamiento. Ohmímetro 250
14.9.6 Medida de la resistencia de tierra 250
14.10 *Medida de frecuencias y factores de potencia* 251
14.10.1 Medición de frecuencia 252
14.10.2 Medición del factor de potencia 252
14.11 *Aparatos de medida universales. Multímetros* 253

15 Instalaciones de baja tensión 256
15.1 *Instalaciones domésticas* 256

15.1.1 Electrificación mínima 256
15.1.2 Electrificación media 257
15.1.3 Electrificación elevada 257
15.1.4 Electrificación especial 257
15.1.5 Cálculo de cada circuito 258
15.2 *Instalaciones de talleres* 258
15.2.1 Carga superficial específica media 258
15.3 *Distribución de las instalaciones domésticas* 259
15.3.1 Características principales del interruptor general 259
15.3.2 Cajas de derivación 260
15.3.3 Otros componentes 260
15.4 *Distribución de las instalaciones en talleres* 261
15.4.1 Formas de distribución 262
15.4.2 Elementos de protección 264
15.5 *Conductores* 265
15.5.1 Materiales aislantes 265
15.5.2 Prescripciones del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión 265
15.5.3 Designación de conductores 266
15.5.4 Conductores distintivos 266
15.6 *Cálculo y presupuesto para instalaciones sencillas* 266
15.6.1 Vivienda familiar 267
15.6.2 Presupuesto 270
15.7 *Aparatos de registro de energía eléctrica* 271
15.7.1 Condiciones generales 271
15.7.2 Colocación en forma individual 271
15.7.3 Contadores de energía reactiva 271
15.7.4 Colocación en forma concentrada 271

16 Alimentación de receptores 273
16.1 *Acometidas* 273
16.1.1 Clasificación 273
16.2 *Cálculo de una acometida* 276
16.2.1 Cálculo de la sección de los conductores 276
16.3 *Forma de realizar una acometida* 278
16.3.1 Acometida general 279
16.4 *Cajas de acometidas* 279
16.4.1 Tipos y características técnicas 280
16.5 *Línea repartidora* 280
16.5.1 Edificios destinados a viviendas. Edificios comerciales, de oficinas o destinados a una concentración de industrias 280
16.5.2 Edificios destinados a un solo abonado 281
16.6 *Derivaciones individuales* 282
16.6.1 Edificios destinados principalmente a viviendas. Edificios comerciales, de oficinas o destinados a una concentración de industrias 282
16.6.2 Edificios destinados a un solo abonado 282
16.7 *Contadores* 283
16.7.1 Centralización total 283
16.7.2 Centralización por plantas 284
16.8 *Conductores* 284
16.8.1 Acometidas 284
16.8.2 Línea repartidora 284
16.8.3 Derivaciones individuales 285
16.8.4 Tablas de intensidad máxima admisible 285
16.9 *Presupuesto de una acometida sencilla* 285
16.9.1 Potencia instalada y características eléctricas 285
16.9.2 Presupuestos parciales 287
16.9.3 Gastos generales 288
16.9.4 Presupuesto general 288

Tema 1. Introducción a la corriente alterna

OBJETIVOS

— *Comprender el fenómeno de generación de corriente alterna.*
— *Entender las representaciones de funciones senoidales.*
— *Aprender a manejar funciones senoidales.*

GUION

— Introducción.
— Generación de corriente alterna.
— Clases de corriente alterna.
— Valores fundamentales de la corriente alterna senoidal.
— Representación gráfica de señales senoidales.
— Operaciones con funciones senoidales.

PUNTOS CLAVE

— Principio elemental de generación de corriente alterna.
— Parámetros de la corriente alterna.
— Manejo de señales senoidales isofrecuenciales.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Valor de la fuerza electromotriz inducida en un conductor.

EXPOSICION DEL TEMA

1.1 Introducción

Este tema referido a la corriente alterna se ocupa de aquellos fenómenos eléctricos (tensiones, corrientes, potencias) que resultan variables en el tiempo, es decir, que varían su valor absoluto en cada instante.

Una corriente que cambie de sentido a intervalos de tiempo recibe el nombre de *corriente alterna.*

A aquellas corrientes alternas, cuyos valores absolutos instantáneos vayan siendo sucesivamente proporcionales a los valores que toma el seno de 0º a 360º, se les llama corrientes alternas senoidales.

El hecho de que, en una corriente alterna, el movimiento de los electrones sea oscilante, en contraposición con el flujo continuo de éstos en una corriente continua, implica que los procesos internos de circuitos sometidos a corriente alterna difieran sensiblemente de los sometidos a corriente continua.

1.2 Generación de corriente alterna

1.2.1 *Conductor que se mueve en el seno de un campo magnético, con dirección oblicua a las líneas de fuerza*

Como es sabido, el valor de la fuerza electromotriz inducida en un conductor de longitud *l* cm, que se mueve con una velocidad de *v* cm/s perpendi-

cular a las líneas de fuerza, en el seno de un campo magnético de inducción β gausios, viene expresada por la ecuación:

$$e = \frac{\beta \cdot l \cdot v}{10^8} \text{ voltios} \qquad [1.1]$$

Ahora bien, ¿qué fuerza electromotriz se inducirá en este conductor si el desplazamiento es oblicuo a las líneas de fuerza, tal como representa la figura 1.1?

Para responder a esta pregunta, se considerarán las siguientes cuestiones:

— El conductor se desplaza según la dirección $a-c$, que forma un ángulo φ con la perpendicular (dirección $a-b$).

— Aunque el conductor se desplaza con una velocidad v_0 cm/s, ésta no es la velocidad real de corte de las líneas de fuerza, ya que otro conductor que se desplazara según la dirección $a-b$, perpendicular a las líneas de fuerza, con una velocidad v_p, cortaría el mismo número de líneas de fuerza que aquél.

— La producción de fuerza electromotriz inducida depende, en definitiva, del número de líneas de fuerza cortadas. Luego en los dos conductores anteriores se induciría el mismo valor de fuerza electromotriz.

— El valor de fuerza electromotriz inducida en el conductor, que se desplazara según la dirección $a-b$, con velocidad v_p, sería según la ecuación [1.1]:

$$e = \frac{\beta \cdot l \cdot v_p}{10^8} \text{ voltios} \qquad [1.2]$$

Analizando la figura 1.1, se puede ver que la velocidad perpendicular al campo, v_p, es igual al valor de la velocidad oblicua, v_0, multiplicada por el coseno del ángulo que forman estas dos velocidades.

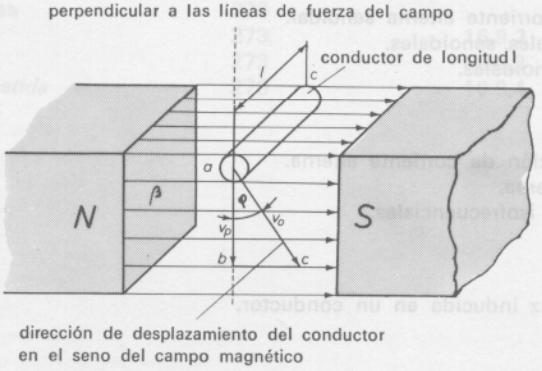


Fig. 1.1 Conductor, en el interior de un campo magnético, que se desplaza con movimiento rectilíneo.

Es decir, en la ecuación [1.2], se sustituye v_p por su igual:

$$v_p = v_0 \cdot \cos \varphi$$

$$e = \frac{\beta \cdot l}{10^8} \cdot v_0 \cdot \cos \varphi \qquad [1.3]$$

Esta ecuación nos da el valor de la fuerza electromotriz inducida en un conductor que se desplaza oblicuamente a las líneas de fuerza en el interior de un campo magnético.

1.2.2 *Generación de una fuerza electromotriz senoidal*

Estudiaremos, para ello, los fenómenos que se producen en un conductor de longitud l, que describe una trayectoria circular en el seno de un campo magnético de inducción β, con una velocidad tangencial v constante (fig. 1.2).

Dicho conductor se mueve en sentido contrario al de avance de las agujas de un reloj, ocupando sucesivamente las posiciones 1, 2...

La fuerza electromotriz que se inducirá en un instante dado en el conductor es igual a la que se induciría en otro conductor que se desplazara según la dirección de la tangente a la trayectoria en el punto en el que se encuentra el primer conductor en el instante considerado.

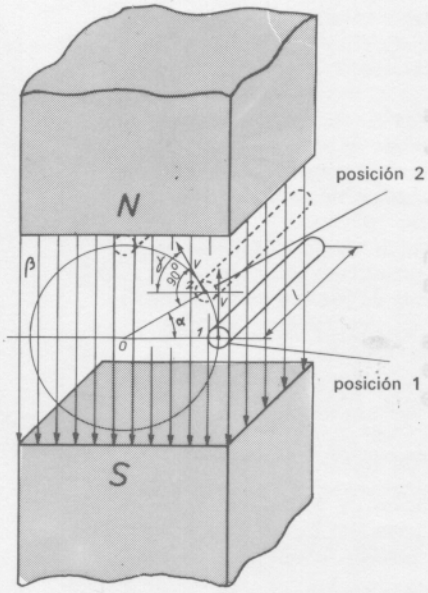


Fig. 1.2 Conductor, en el interior de un campo magnético, que se desplaza con un movimiento circular.

Suponiendo que el conductor partió de la posición 1, analicemos el valor de la fuerza electromotriz que, en él, se induce en la posición 2.

Esta será igual a:

$$e = \frac{\beta \cdot l \cdot v}{10^8} \cdot \cos \gamma \qquad [1.4]$$

ya que γ es el ángulo que forma la dirección de la velocidad con la perpendicular a las líneas de fuerza.

Ahora bien, al ser *v* perpendicular al radio que une el centro de la trayectoria circular con la posición 2 (ya que la tangente es perpendicular al radio en el punto de tangencia), el ángulo α es complementario del γ.

Sabiendo, por trigonometría, que el coseno de un ángulo es igual al seno de su complementario, sustituyendo en la ecuación [1.4] queda:

$$e = \frac{\beta \cdot l \cdot v}{10^8} \cdot \operatorname{sen} \alpha \qquad [1.5]$$

β es constante (el campo es uniforme), *l* y *v* también son constantes; luego: $\frac{\beta \cdot l \cdot v}{10^8}$ se podrá sustituir por otra constante de valor E_o, transformando la ecuación [1.5] en:

$$e = E_o \cdot \operatorname{sen} \omega t$$

De esta ecuación se deduce la siguiente conclusión:

El valor de la fuerza electromotriz inducida en un conductor que gira según una trayectoria circular en el seno de un campo magnético, es proporcional al valor del seno del ángulo descrito por el conductor, es decir, es una fuerza electromotriz senoidal.

1.2.3 *Otras clases de corriente alterna*

En la figura 1.2 se ve un dispositivo elemental que produce fuerza electromotriz alterna senoidal.

Teóricamente se podrían concebir infinidad de dispositivos capaces de producir fuerzas electromotrices alternas que, en vez de ser proporcionales a los valores del seno de los ángulos de 0° a 360°, fueran proporcionales a otra función matemática más o menos compleja.

En la figura 1.3, se muestran algunas clases representativas de corriente alterna.

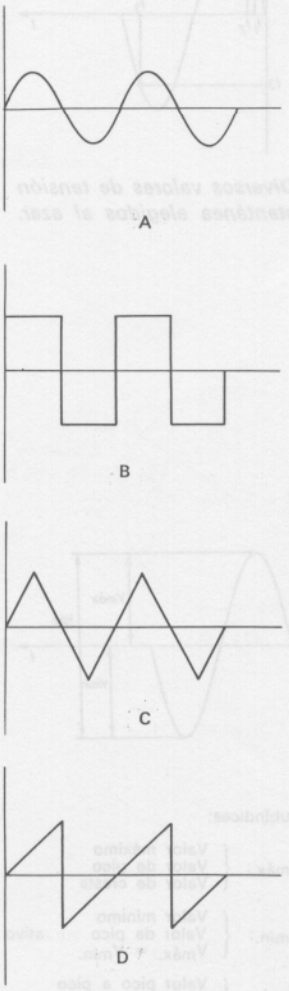


Fig. 1.3 Diversas clases de señales alternas.

1.3 Valores fundamentales de la corriente alterna senoidal

La corriente alterna senoidal es un tipo de corriente cuyo cambio de sentido se realiza en intervalos de tiempo iguales (sigue la variación de la función seno). Esto es: la corriente alterna senoidal es un fenómeno periódico, ya que se reproduce idénticamente en intervalos de tiempo iguales.

En las corrientes periódicas, aparecen una serie de parámetros que por sí solos definen el efecto alterno.

Estos parámetros o valores fundamentales son:

— Frecuencia.
— Período.
— Valor instantáneo.
— Valor máximo.
— Valor eficaz.
— Valor medio.

1.3.1 *Frecuencia*

Es el número de veces que la señal alterna se repite en un segundo.

La unidad de frecuencia es el *hertzio* (Hz), que equivale a un ciclo por segundo (c. p. s.). Se representa por la letra *f*.

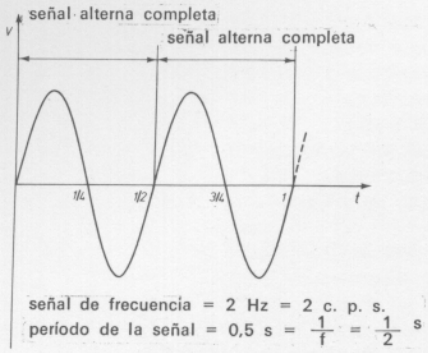


Fig. 1.4 Frecuencia y período de una señal alterna.

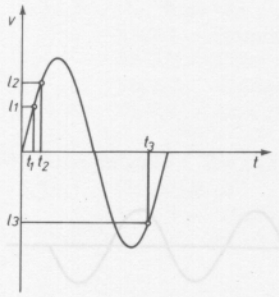
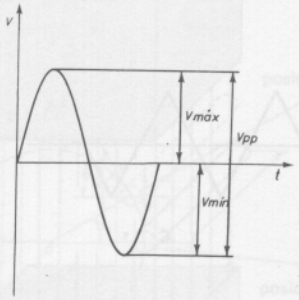


Fig. 1.5 Diversos valores de tensión instantánea elegidos al azar.



Subíndices:

$V_{máx.}$: { Valor máximo / Valor de pico / Valor de cresta

$V_{mín.}$: { Valor mínimo / Valor de pico negativo / $V_{máx.} = V_{mín.}$

V_{pp}: { Valor pico a pico / Valor cresta-cresta

Fig. 1.6 Valores máximos.

1.3.2 *Período*

Se define como período el tiempo necesario para que una señal alterna se repita (fig. 1.4).

El período se mide en segundos. Se representa por *T*.

Nótese que período y frecuencia son dos cantidades inversas ya que, si en un segundo se repite *f* veces la señal, el tiempo necesario para completarse una vez será:

$$T = \frac{1}{f} \Rightarrow f = \frac{1}{T}$$

1.3.3 *Valor instantáneo*

Como se ha dicho, una de las características de la corriente alterna es tomar valores diferentes en cada instante de tiempo. Así, pues, valor instantáneo es aquel que toma la señal en cada instante (fig. 1.5).

La unidad depende del valor instantáneo considerado: tensión, intensidad, etc.

Se suele representar por letras minúsculas.

1.3.4 *Valor máximo*

De todos los valores instantáneos comprendidos en un período, se denomina valor máximo al mayor de ellos. También a este valor se le denomina amplitud de la señal alterna y, otras veces, valor de cresta.

Al igual que el valor instantáneo, su unidad depende de la magnitud considerada.

Se suele representar por letras mayúsculas seguidas del subíndice *máx.*

En las señales alternas senoidales, el valor máximo coincide, en valor absoluto, con el valor mínimo. A cualquiera de estos valores se les designa también con el nombre de *valor de pico.*

Interesante, a veces, en el tratamiento de la señal alterna, es el valor comprendido entre dos picos consecutivos, denominado *valor de pico a pico* (figura 1.6).

1.3.5 *Valor eficaz*

En el tratamiento de las señales alternas, es éste el valor más importante para operar con ellas, pues con él se obtiene matemáticamente el mismo resultado que operando con valores instantáneos continuamente variables.

Físicamente, el valor eficaz de una corriente alterna es aquél que produce los mismos efectos caloríficos, a través de una resistencia, que una corriente continua del mismo valor.

Matemáticamente se obtiene hallando la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores instantáneos que toma la señal senoidal durante un período. Su valor es siempre distinto de cero.

Se designa con letras mayúsculas sin subíndices.

Sus unidades están en función de la magnitud senoidal considerada.

1.3.6 *Valor medio*

Junto con el valor eficaz, son los dos valores más utilizados para la comparación de señales alternas senoidales, ya que los valores se caracterizan por su variabilidad.

Matemáticamente representa la media aritmética de todos los valores instantáneos durante medio período o, lo que es lo mismo, el valor de la ordenada media durante un semiperíodo completo.

Se designa con una letra mayúscula y el subíndice *med.*

Sus unidades también están en función de la magnitud senoidal considerada.

1.3.7 *Relaciones entre los valores máximo ($A_{máx.}$), medio ($A_{med.}$) y eficaz (A) de una corriente alterna senoidal*

Matemáticamente se demuestra que:

$$A = \frac{A_{máx.}}{\sqrt{2}} \qquad [1.7]$$

y que:

$$A_{med.} = \frac{2}{\pi} \cdot A_{máx.} \qquad [1.8]$$

De [1.7], podemos deducir inmediatamente que:

$$A_{máx.} = A \cdot \sqrt{2} \qquad [1.9]$$

y de [1.8], que:

$$A_{máx.} = \frac{\pi}{2} \cdot A_{med.} \qquad [1.10]$$

Igualando [1.9] y [1.10]:

$$A \cdot \sqrt{2} = \frac{\pi}{2} \cdot A_{med.}$$

obtenemos:

$$A_{med.} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot A \simeq 0{,}9\ A \qquad [1.11]$$

También:

$$\boxed{A = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot A_{med.} \simeq 1{,}11\ A_{med.}} \qquad [1.12]$$

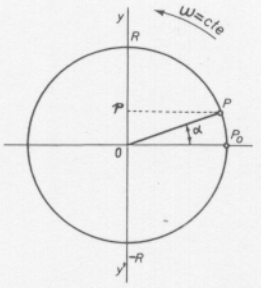


Fig. 1.7 Movimiento de un punto a lo largo de una circunferencia.

1.4 Representación gráfica

Con objeto de estudiar la forma de una señal alterna, se recurre a su representación gráfica.

1.4.1 *Representación en coordenadas cartesianas*

Considérese un punto *P*, que se desplaza en sentido antihorario a lo largo de una circunferencia de radio *R* (fig. 1.7) con velocidad angular ω constante.

Sea P_0 la posición inicial del punto, y *P* su posición en un instante cualquiera. Evidentemente el ángulo α girado en un tiempo *t* será igual a:

$$\alpha = \omega \cdot t$$

Si *p* es la proyección del punto *P* sobre el eje *yy'*, perpendicular al radio que pasaba por el punto inicial P_0, podemos comprobar que, mientras *P* tiene un movimiento circular de velocidad constante (ω = cte.), la proyección *p* tiene un movimiento alternativo de *R* a $-R$, de velocidad variable, siendo en cada instante su distancia al centro:

$$Y = OP \cdot \text{sen}\ \alpha = R \cdot \text{sen}\ \alpha = R \cdot \text{sen}\ \omega t$$

Para la representación cartesiana de esta función se toman, sobre el eje de abscisas, los valores del ángulo girado $\alpha = \omega \cdot t$; y, sobre el de ordenadas, los valores que va tomando la función (valores de la proyección de *P* sobre el eje *yy'*). Uno de los procedimientos prácticos para la construcción de una función senoidal de valor $Y = R \cdot \text{sen}\ \alpha$, es el siguiente (fig. 1.8): trácese una circunferencia de radio *R*; divídase en un determinado número de partes; divídase también el eje *x* en el mismo número de partes en que se ha dividido la circunferencia; proyéctense los puntos 1, 2, 3, etc., paralelamente al eje *x*; levántense perpendiculares por los puntos en que se ha dividido el eje *x*; y hállese la intersección con la proyección de sus homólogos.

Uniendo los puntos de las intersecciones, se obtendrá la representación gráfica, en coordenadas cartesianas, de una función senoidal.

Evidentemente, cuantas más divisiones se hagan en la circunferencia, mayor será la precisión con que se trazará la curva.

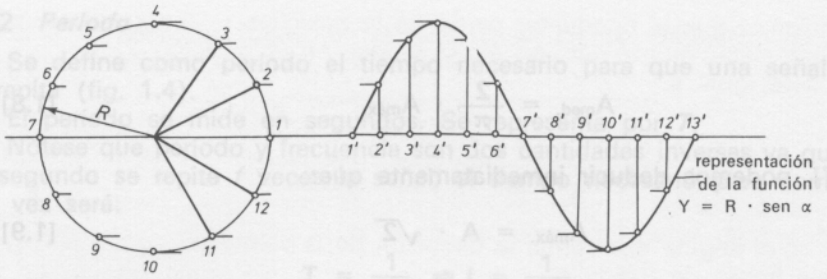


Fig. 1.8 Trazado de una función senoidal.

1.4.2 *Representación vectorial o de Fresnel*

Aunque la representación más clara de una función senoidal es la cartesiana, ésta resulta de construcción laboriosa y de uso complicado cuando se quiere operar gráficamente con dos o más funciones.

Por todo ello, es mucho más usada la representación vectorial. Esta consiste en suponer a las señales alternas como un vector (cuyo módulo corresponde con el valor máximo de la función) que gira alrededor de un punto fijo con velocidad angular ω constante. El valor instantáneo de la función senoidal se obtiene, en todo momento, como la proyección del radio vector sobre el eje de ordenadas.

En la figura 1.9 se ponen de relieve las equivalencias entre este sistema de representación y el anterior.

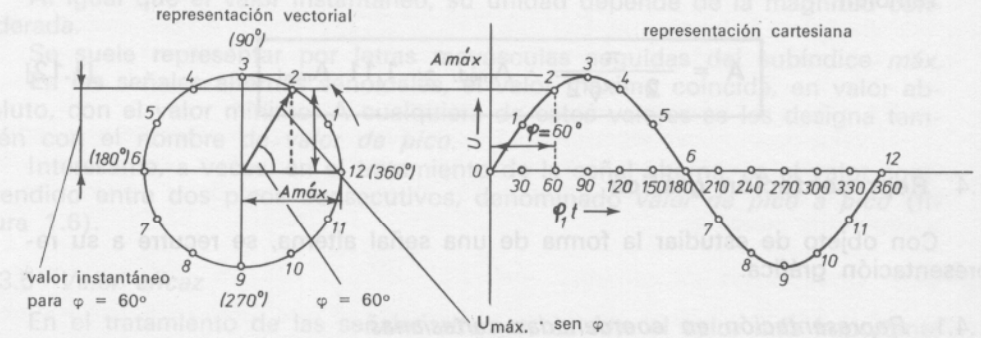


Fig. 1.9 Relación entre la representación cartesiana y la vectorial.

1.4.3 *Fase*

Al hablar de la representación cartesiana de una función senoidal, se ha considerado un punto *P* que se desplazaba a lo largo de una circunferencia.

Se le da el nombre de *fase* a cada una de las posiciones que va ocupando el punto a lo largo de su trayectoria circular.

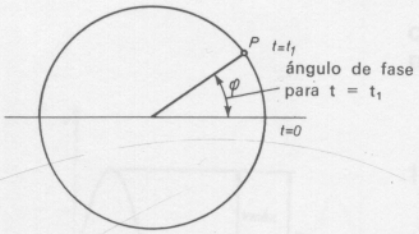


Fig. 1.10 Angulo de fase.

1.4.4 *Angulo de fase*

Al ángulo determinado por el radio que pasa por el punto *P* (fig. 1.10), en un instante cualquiera, con el eje de partida del movimiento se le denomina *ángulo de fase.*

Si en el instante inicial (t = 0), el vector representativo de función senoidal no coincide con la dirección horizontal (es decir, posee una cierta proyección), se dice que existe un *desfase,* cuyo valor es el del ángulo que forma el valor máximo con el eje *x* (fig. 1.11).

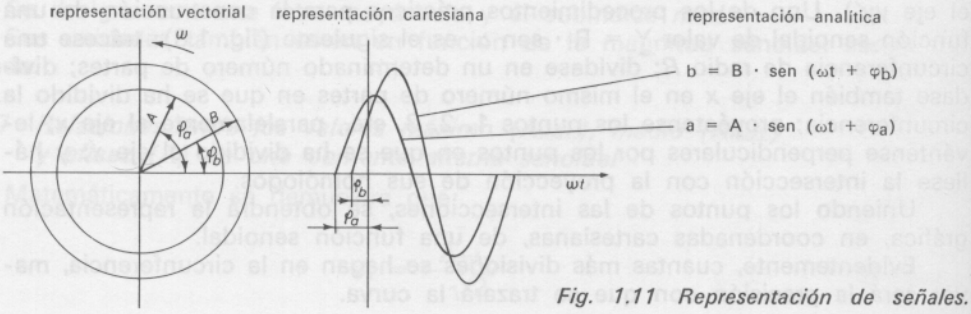


Fig. 1.11 Representación de señales.

1.4.5 *Algunos ejemplos de representación de funciones senoidales*

En el estudio de corrientes alternas, se presenta con frecuencia el tener que trabajar simultáneamente con varias magnitudes senoidales.

A continuación, se dan las representaciones vectoriales, cartesianas y analíticas de varios casos de tensiones alternas isofrecuenciales (de la misma frecuencia) y distintas amplitudes y ángulos de fase.

— Dos tensiones senoidales de la misma frecuencia, amplitudes máximas *A* y *B*, con fases φ_a y φ_b respectivamente (fig. 1.11).

— Dos tensiones senoidales de la misma frecuencia, igual fase inicial y amplitudes máximas *A* y *B* (fig. 1.12).

— Dos tensiones senoidales de la misma frecuencia, siendo la primera de valor máximo *A*, y fase inicial φ; la segunda, de valor máximo *B* y desfasada 90° ($\pi/2$ radianes) en atraso con respecto de la primera (fig. 1.13). Se dice que la señal *b* está retrasada 90° con respecto de la *a*, porque ésta alcanza el valor máximo antes que aquélla.

De dos señales que están desfasadas 90°, se dice también que están en *cuadratura.*

— Dos tensiones senoidales de la misma frecuencia, de amplitudes máximas *A* y *B*. *A*, con fase inicial cero; y *B*, desfasada 180° con respecto a ésta (fig. 1.14).

De estas dos señales, se dice que están en *oposición.*

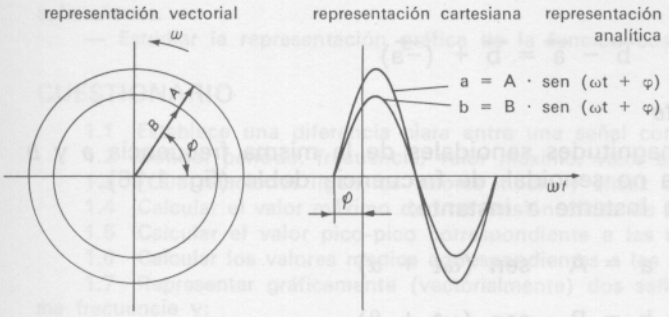


Fig. 1.12 Representación de señales.

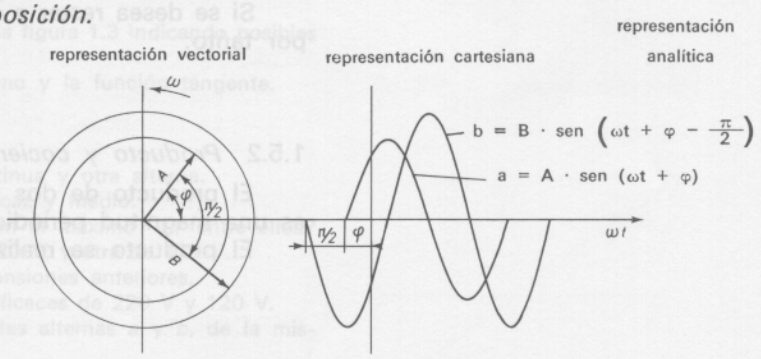


Fig. 1.13 Representación de señales.

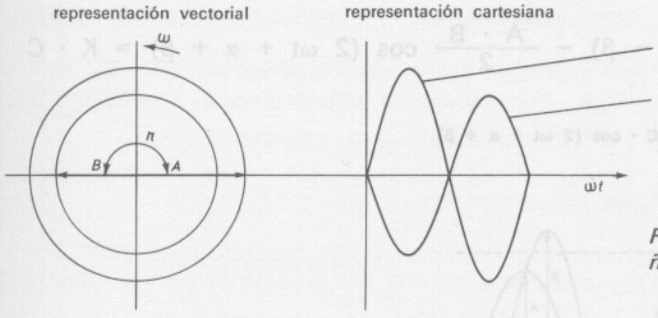


Fig. 1.14 Representación de señales.

1.5 Operaciones con funciones senoidales

Hay ocasiones, en el tratamiento de las corrientes alternas, en las que interesa conocer el resultado de la composición de dos o más señales senoidales. Por ello, es necesario conocer cómo se efectúan las cuatro operaciones básicas con estas señales. (El estudio se hace para funciones senoidales isofrecuenciales).

1.5.1 *Suma y resta*

La suma de dos funciones senoidales *a* y *b* es otra función senoidal *c*, cuyo valor instantáneo es, en todo momento, igual a la suma algebraica de los valores instanténeos de *a* y *b*.

La realización práctica de la suma analítica de dos señales senoidales se explicará en el tema siguiente.

La suma gráfica se puede efectuar de dos modos:

— Mediante la representación de *Fresnel* (fig. 1.15A). Consiste en dar un carácter vectorial a los valores máximos de cada señal, con lo que la operación se realiza como si de vectores se tratase.

— Mediante la representación *cartesiana* (fig. 1.15B). Consiste en sumar algebraicamente los valores instantáneos.

En la figura 1.15, *a* y *b* son las señales con las que se deseaba operar; *c* es la obtenida de sumar *a* y *b*.

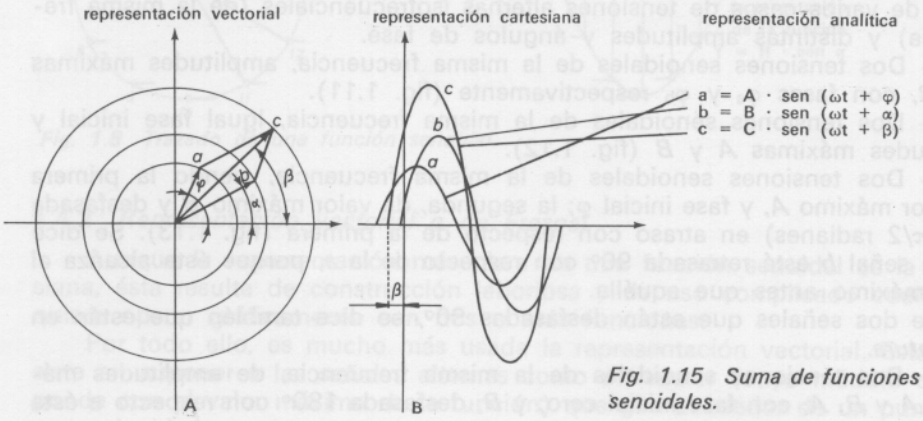


Fig. 1.15 Suma de funciones senoidales.

Si se desea restar *a* de *b*, hay que tener presente que son vectores y que, por tanto:

$$\vec{b} - \vec{a} = \vec{b} + (-\vec{a})$$

1.5.2 *Producto y cociente*

El producto de dos magnitudes senoidales de la misma frecuencia *a* y *b* es una magnitud periódica no senoidal, de frecuencia doble (fig. 1.16).

El producto se realiza instante a instante:

$$a = A \cdot \text{sen}\ (\omega t + \alpha)$$

$$b = B \cdot \text{sen}\ (\omega t + \beta)$$

siendo el producto:

$$a \cdot b = \frac{A \cdot B}{2} \cos\ (\alpha - \beta) - \frac{A \cdot B}{2} \cos\ (2\ \omega t + \alpha + \beta) = K \cdot C$$

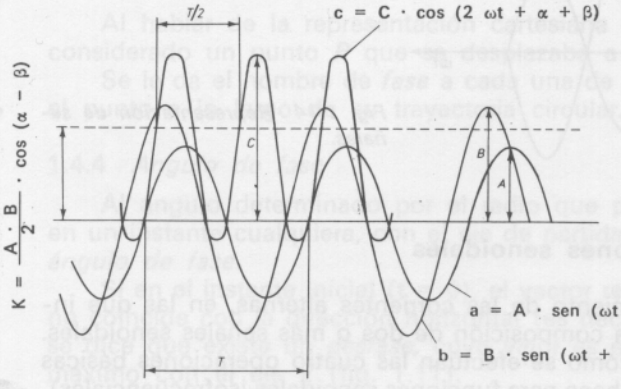


Fig. 1.16 Producto de funciones senoidales.

El resultado de un producto es particularmente interesante cuando se trata de dos senoides en cuadratura (desfasadas $\pi/2$) (fig. 1.17). Se ve que la curva representativa del producto limita superficies de áreas iguales dos a dos y de signos contrarios, cuya suma algebraica es cero.

El cociente se realiza como un producto, teniendo en cuenta que es lo mismo dividir que multiplicar por el inverso.

$$d = a : b = a \cdot \frac{1}{b}$$

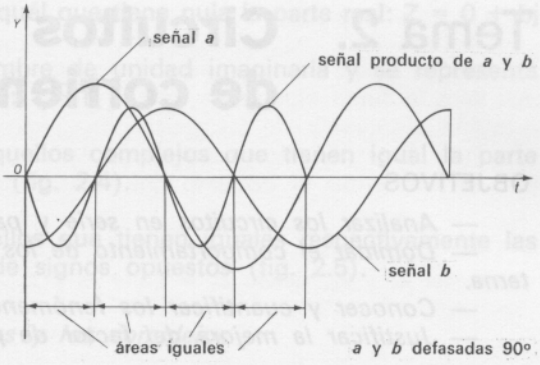


Fig. 1.17 Producto de dos señales senoidales en cuadratura.

Hay que tener en cuenta que $\frac{1}{b}$ tiene como máximo $\frac{1}{B}$, pero su ángulo de fase no es β sino $-\beta$. En el capítulo siguiente, se verá en qué está basada esta variación de fase.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Buscar más señales alternas que las representadas en la figura 1.3 indicando posibles aplicaciones.

— Estudiar la representación gráfica de la función coseno y la función tangente.

CUESTIONARIO

1.1 Establece una diferencia clara entre una señal continua y otra alterna.

1.2 Define: período, frecuencia, valor máximo, valor eficaz y medio.

1.3 ¿Qué relaciones ligan los valores medio y eficaz con el máximo? ¿Y entre ellos?

1.4 Calcular el valor máximo de una tensión eficaz de 220 V, y otra de 127 V.

1.5 Calcular el valor pico-pico correspondiente a las tensiones anteriores.

1.6 Calcular los valores medios correspondientes a los eficaces de 220 V y 120 V.

1.7 Representar gráficamente (vectorialmente) dos señales alternas *a* y *b*, de la misma frecuencia y:

1.° *a*: con fase inicial $-\pi/4$ y *b* retrasada respecto de *a* 3 $\pi/4$ siendo A = B/2.

2.° *a*: fase inicial cero, *b* adelantada 1/4 de período. A = B/3.

3.° *a*: fase inicial $\pi/8$, y *b* retrasada $\pi/4$ respecto de *a*. B = A/2.

Tema 2. Circuitos de corriente alterna

OBJETIVOS

— *Analizar los circuitos en serie y paralelo.*
— *Dominar el comportamiento de los elementos pasivos en corriente alterna.*
— *Conocer y cuantificar los fenómenos de resonancia.*
— *Justificar la mejora del factor de potencia.*

GUION

— Introducción.
— Los números complejos.
— La potencia eléctrica. Clases.
— La resistencia, la bobina y el condensador en corriente alterna.
— Circuitos pasivos: R, L y C. Acoplamientos en serie y paralelo de los mismos.
— La resonancia en serie y en paralelo.
— La mejora del factor de potencia.

PUNTOS CLAVE

— Comportamiento de los circuitos pasivos en corriente alterna.
— La resonancia. Tipos y efectos.
— La mejora del factor de potencia.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Resolución de circuitos en corriente continua.

EXPOSICION DEL TEMA

2.1 Introducción

En este tema se va a estudiar el comportamiento de los circuitos pasivos básicos: resistencia, bobina, condensador y la combinación de ellos, sometidos a corriente alterna.

Como fase previa, hay que recordar dos temas importantes: los números complejos y la potencia eléctrica. Son temas de extraordinario interés en el desarrollo y comprensión del presente tema.

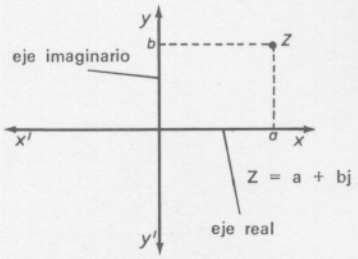


Fig. 2.1 Representación gráfica del complejo Z = a + bj.

2.2 Los números complejos

Con la representación cartesiana y vectorial de las magnitudes senoidales, se pueden resolver cualitativa y cuantitativamente los problemas pertenecientes a la corriente alterna.

Con el método analítico (trigonométrico), la resolución de problemas normalmente es larga. El método gráfico (cartesiano o vectorial) origina errores ostensibles en la solución final.

Por todo ello, y para obviar los inconvenientes de uno y otro sistema, se recurre a representar las magnitudes senoidales como vectores, operando mediante el cálculo complejo.

Se recordarán, a continuación, las cuestiones elementales de cálculo complejo, así como sus modos de representación.

2.2.1 *Números complejos. Definición. Clases*

Se denomina *número complejo* a un par de números reales positivos o negativos, dados en un orden prefijado.

Al primero de ellos se le denomina parte real; y al segundo, parte imaginaria.

La figura 2.1 muestra la representación gráfica del complejo Z = a + bj.

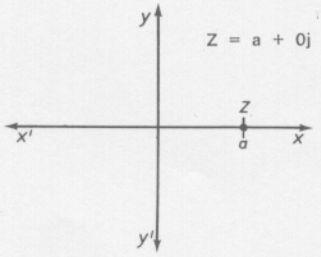


Fig. 2.2 Complejo real.

— *Complejo real.* Es aquél que tiene nula la parte imaginaria (segunda componente): Z = a + 0j (fig. 2.2).

— *Complejo imaginario.* Es aquél que tiene nula la parte real: $Z = 0 + bj$ (fig. 2.3).

El número (0,1) recibe el nombre de unidad imaginaria y se representa por la letra j. Su valor es también: $\sqrt{-1}$.

— *Complejos conjugados.* Aquellos complejos que tienen igual la parte real y opuesta la parte imaginaria (fig. 2.4).

— *Complejos opuestos.* Aquellos que tienen iguales respectivamente las partes reales e imaginarias, pero de signos opuestos (fig. 2.5).

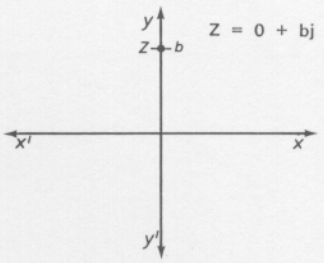


Fig. 2.3 Complejo imaginario.

2.2.2 *Comparación de los vectores y los complejos*

Vector es una magnitud orientada.

En la figura 2.6 puede observarse cómo un complejo se asemeja a un vector, ya que posee una dirección, la *OZ*; un sentido, de *O* a *Z*; un módulo o intensidad, el valor de la longitud OZ = m; y un punto de aplicación, el *O*.

Todos estos datos en los complejos pueden concretarse en dos:

— La distancia *OZ*, denominada módulo del complejo.

— El ángulo que forma la recta *OZ* con el semieje *OX*, denominado argumento del complejo. Se consideran positivos los ángulos tomados en sentido antihorario.

El sentido y el punto de aplicación no necesitan determinación particular, ya que son constantes para todos los complejos.

El módulo y el argumento de la figura 2.6 serán:

Módulo:

$$m = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Argumento:

$$\text{tg } \varphi \Rightarrow \frac{b}{a} \Rightarrow \varphi = \text{arc tg } \frac{b}{a}$$

En adelante se utilizará indistintamente la expresión *complejo* o *vector.*

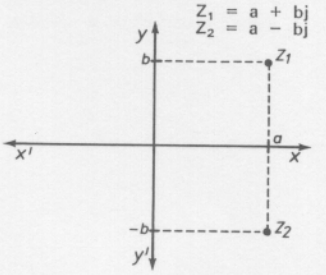


Fig. 2.4 Complejos conjugados.

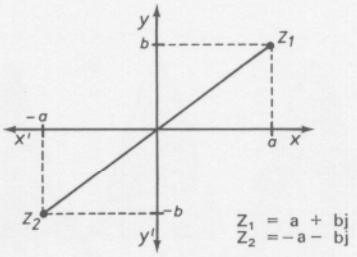


Fig. 2.5 Complejos opuestos.

2.2.3 *Representación de un número complejo*

Un mismo vector puede estar representado matemáticamente de varias maneras:

— Forma algebraica o binómica:

$$Z = a + bj$$

— Forma trigonométrica:

$$Z = m\ (\cos \varphi + j \text{ sen } \varphi)$$

— Forma exponencial:

$$Z = me^{j\varphi}$$

— Forma polar:

$$z = m \lfloor \varphi$$

en la que:

$$m = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{y} \quad \varphi = \text{arc tg } \frac{b}{a}$$

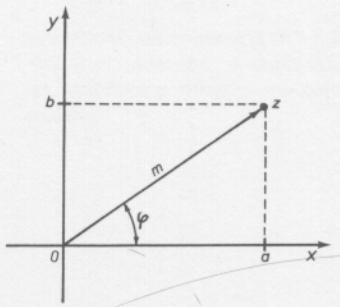


Fig. 2.6 Representación gráfica de un complejo.

2.2.4 *Operaciones con complejos*

Se estudiarán las cuatro operaciones básicas y las distintas formas de realizarlas.

2.2.4.1 *Suma y resta*

La suma de dos números complejos es otro número complejo cuya parte real será la suma algebraica de las partes reales; y cuya parte imaginaria será la suma algebraica de las partes imaginarias.

Para restar números complejos, basta recordar la definición de resta: sumar al minuendo el opuesto del sustraendo.

Ejemplo

Sumar Z_1 y Z_2, siendo $Z_1 = -a + bj$ y $Z_2 = c - dj$.

$$Z_1 + Z_2 = (-a + c) + (b - d)j$$

Para realizar operaciones de suma y resta, los complejos necesariamente deberán estar en forma binómica, efectuando las conversiones necesarias si fuese preciso.

Ejemplo

Sumar $Z_1 = 13 \underline{\lfloor 25^\circ\ 3'}$ y $Z_2 = 28\ e^{j35^\circ}$.

$$Z_1 = 13\ (\cos 25^\circ\ 3' + j \operatorname{sen} 25^\circ\ 3') = 13\ (0{,}905 + j0{,}423) = 11{,}765 + 5{,}504j$$

$$Z_2 = 28\ (\cos 35^\circ + j \operatorname{sen} 35^\circ) = 28\ (0{,}819 + j0{,}573) = 22{,}932 + 16{,}044j$$

$$Z_1 + Z_2 = (11{,}765 + 5{,}504j) + (22{,}932 + 16{,}044j) = 34{,}697 + 21{,}548j$$

$$= 40{,}84 \underline{\lfloor 31^\circ\ 50'\ 30''} = 40{,}84\ e^{j31^\circ\ 50'\ 30''}$$

2.2.4.2 *Producto*

El producto puede realizarse cualesquiera que sean las expresiones de los números complejos. Resultan más cómodas las exponenciales y las polares.

— En la forma binómica se realiza multiplicando algebraicamente los dos complejos: $Z_1 = a + bj$ y $Z_2 = c + dj$.

$$Z_1 \cdot Z_2 = ac + bcj + adj + bdj^2 = (ac + bdj^2) + (bc + ad)j$$

y al ser $j^2 = -1$, queda:

$$Z_1 \cdot Z_2 = (ac - bd) + (bc + ad)j$$

— En forma polar; se multiplican los módulos y se suman los argumentos: $Z_1 = m \underline{\lfloor \varphi}$ y $Z_2 = n \underline{\lfloor \theta}$.

$$Z_1 \cdot Z_2 = m \cdot n \underline{\lfloor \varphi + \theta}$$

La justificación de esta forma de operar es muy sencilla: basta expresar los números en forma exponencial y operar con ellos: $Z_1 = me^{j\varphi}$ y $Z_2 = ne^{j\theta}$

$$Z_1 \cdot Z_2 = m \cdot e^{j\varphi} \cdot n \cdot e^{j\theta} = m \cdot n \cdot e^{j\varphi} \cdot e^{j\theta} = m \cdot n \cdot e^{(j\varphi + j\theta)}$$

$$= m \cdot n \cdot e^{j(\varphi + \theta)} = m \cdot n \underline{\lfloor \varphi + \theta}$$

Ejemplo

Multiplicar $Z_1 = 32 \underline{\lfloor 50^\circ}$ por $Z_2 = 15 - 12j$.

Se convertirá la expresión de Z_2 a la forma polar:

$$m = \sqrt{15^2 + 12^2} = 19{,}21$$

$$\varphi = \operatorname{arc\ tg} - \frac{12}{15} = -38^\circ\ 39'\ 35''$$

$$Z_1 \cdot Z_2 = 32 \cdot 19{,}21 \underline{\lfloor 50^\circ - 38^\circ\ 39'\ 35''} = 614{,}72 \underline{\lfloor 11^\circ\ 20'\ 25''}$$

2.2.4.3 *Cociente*

Al igual que en el producto, el cociente puede realizarse cualesquiera que sean las expresiones de los números complejos. También en el cociente la forma más simple es la derivada de la expresión polar.

— En la forma binómica, para realizar el cociente es necesario, en primer lugar, multiplicar y dividir por el conjugado del divisor: $Z_1 = a + bj$ y $Z_2 = c + dj$.

$$Z_1 : Z_2 = \frac{a + bj}{c + dj} = \frac{(a + bj)(c - dj)}{(c + dj)(c - dj)} = \frac{(ac + bd) + (bc - da)j}{c^2 + d^2}$$

— En la forma polar: se dividen los módulos y se restan los argumentos: $Z_1 = m \,\underline{|\varphi}$ y $Z_2 = n \,\underline{|\theta}$.

$$Z_1 : Z_2 = \frac{m}{n} \,\underline{|\varphi - \theta}$$

La justificación de esta forma de operar es análoga a la del producto. Basta recordar que es lo mismo dividir que multiplicar por el inverso:

$$Z_1 : Z_2 = Z_1 \cdot \frac{1}{Z_2} = me^{j\varphi} \cdot \frac{1}{ne^{j\theta}} = \frac{m}{n} \cdot \frac{e^{j\varphi}}{e^{j\theta}}$$

$$= \frac{m}{n} \cdot e^{j\varphi} \cdot e^{-j\theta} = \frac{m}{n} \cdot e^{j(\varphi - \theta)} = \frac{m}{n} \,\underline{|\varphi - \theta}$$

Ejemplo

Dividir $Z_1 = 20 \,\underline{|75^\circ}$ entre $Z_2 = 10$ (cos 30° + j sen 30°).
Convertimos la expresión a la forma polar: $10 \,\underline{|30^\circ}$.

$$Z_1 : Z_2 = \frac{20}{10} \,\underline{|75^\circ - 30^\circ} = 2 \,\underline{|45^\circ} = 2 \text{ (cos } 45^\circ + j \text{ sen } 45^\circ)$$

$$= 2\left(\frac{\sqrt{2}}{2} + j\,\frac{\sqrt{2}}{2}\right) = \sqrt{2} + \sqrt{2}\,j$$

2.2.4.4 *Producto de un complejo por una constante*

El producto de un número complejo por una constante *C* es otro número complejo cuyo módulo es *C* veces mayor y cuyo argumento sigue siendo el mismo: $Z = m \cdot e^{j\varphi}$ y $C = cte$.

$$Z \cdot C = C\,(m \cdot e^{j\varphi}) = C \cdot m \cdot e^{j\varphi}$$

2.3 Potencia entregada a un receptor

A continuación, se hace un breve resumen de las cuestiones más importantes referentes a la potencia eléctrica.

2.3.1 *El receptor está alimentado por corriente continua*

Cuando esto sucede, cualquiera que sea el receptor: resistencia pura, bobina, etc., la potencia absorbida viene dada por la ecuación:

$$P = V \cdot I$$

V es la diferencia de potencial en extremos del receptor; e *I*, la corriente que por él circula. *P*, la potencia, vendrá expresada en vatios cuando *V* lo sea en voltios e *I* en amperios.

2.3.2 *El receptor está alimentado por corriente alterna*

Las magnitudes tensión e intensidad son ahora funciones senoidales. Considerando los valores instantáneos de estas magnitudes se sigue teniendo todavía:

$$p = v \cdot i$$

Ahora bien, en corriente alterna hay que considerar la naturaleza del receptor, ya que de ella depende, como más adelante se verá en este tema, que las dos senoides de tensión y corriente vayan en fase o no.

2.3.2.1 *Las senoides de tensión y de corriente están en fase*

Esto sucede siempre que el receptor está constituido únicamente por resistencia pura. Entonces los valores instantáneos de tensión y corriente son del mismo signo y, por consiguiente, su producto es siempre positivo (fig. 2.7).

En este caso la potencia viene dada también por la expresión:

$$P = V \cdot I$$

Considerando los valores eficaces de V y de I.

2.3.2.2 *Las senoides de tensión y de corriente no están en fase*

Esto sucede cuando el receptor no es un circuito puramente resistivo, es decir, cuando existe alguna autoinducción o alguna capacidad (como más adelante se verá en este tema).

En este caso, los productos de los valores instantáneos de tensión y corriente ya no serán siempre positivos (fig. 2.8), sino que a intervalos serán unas veces positivos y otras negativos.

Además, los valores máximos de tensión y corriente no tendrán lugar en el mismo instante; de donde, ahora:

$$P < V \cdot I$$

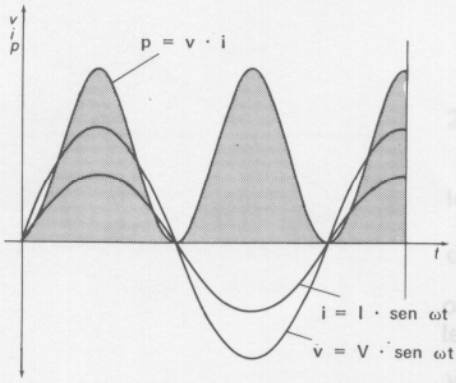


Fig. 2.7 Representación cartesiana de la tensión, la corriente y la potencia en un circuito puramente resistivo.

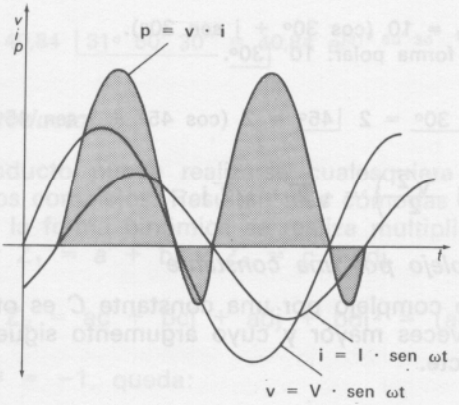


Fig. 2.8 Representación cartesiana de la tensión, la corriente y la potencia en un circuito que no es solamente resistivo.

2.3.3 *Factor de potencia*

Cuando sucede que $P < V \cdot I$ (y esto sucede siempre en alterna), podemos poner que:

$$P = V \cdot I \cdot \text{un cierto factor menor que la unidad}$$

A este factor se le denomina *factor de potencia* y se representa por $\cos \varphi$. Así, pues:

$$\boxed{P_a = V \cdot I \cdot \cos \varphi}$$

2.3.3.1 *Potencia aparente*

Al producto: $P = V \cdot I$ se le denomina *potencia aparente,* y su unidad es el *voltamperio.*

2.3.3.2 *Potencia activa*

Al producto: $P_a = V \cdot I \cdot \cos \varphi$ se le denomina *potencia activa;* su unidad es el *vatio* y representa la potencia realmente transformada en el receptor.

Evidentemente:

$$\boxed{P_a = P \cdot \cos \varphi}$$

2.3.3.3 *Potencia reactiva*

Consideremos un receptor que adelanta φ grados la tensión V respecto de la intensidad I (fig. 2.9). Descompongamos el vector intensidad I de la representación de Fresnel, en sus componentes ortonormales I_a e I_r.

Como puede observarse, I_a está en fase con V, e I_r está $\pi/2$ radianes atrasada respecto a V.

Los productos de valores en fase dan siempre valores positivos. En el caso de V e I_a será:

$$P_a = V \cdot I_a$$

Pero al ser:

$$I_a = I \cdot \cos \varphi$$

obtenemos:

$$P_a = V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

De esta ecuación podemos sacar una conclusión muy importante: el factor de potencia, cos φ, es igual al coseno del ángulo que forman la tensión y la corriente en un circuito eléctrico.

El producto de senoides en cuadratura, V e I_r, corresponde a áreas iguales y de signos contrarios (fig. 1.17 del tema anterior), que se anulan dos a dos.

De este modo solamente se transforma en energía la potencia activa:

$$\boxed{P_a = V \cdot I \cdot \cos \varphi = V \cdot I_a}$$

A la intensidad I_a (la que está en fase con la tensión) se le denomina *intensidad activa.*

A la intensidad I_r (la que está en cuadratura con la tensión) se le denomina *intensidad reactiva.*

De la figura 2.9 se deduce inmediatamente que:

$$\boxed{I_r = I \cdot \text{sen } \varphi}$$

Al producto: $P_r = V \cdot I_r$ se le denomina *potencia reactiva,* y su unidad es el *voltamperio reactivo.* Evidentemente:

$$\boxed{P_r = V \cdot I \cdot \text{sen } \varphi = P \cdot \text{sen } \varphi}$$

Para consolidar el resumen sobre la potencia eléctrica, se resuelve el siguiente ejemplo:

Un motor de corriente alterna está alimentado a 220 V y por él circulan 10 A. Si su factor de potencia es 0,8, calcular:

a) su potencia aparente;
b) su potencia y corriente activa;
c) su potencia y corriente reactiva.

a) *Potencia aparente:*

$$\boxed{P = V \cdot I = 220 \times 10 = 2\,200 \text{ voltamperios (VA)}}$$

b) *Corriente activa:*

$$\boxed{I_a = I \cdot \cos \varphi = 10 \times 0{,}8 = 8 \text{ amperios activos}}$$

Potencia activa:

$$\boxed{P_a = V \cdot I \cdot \cos \varphi = V \cdot I_a = 220 \times 8 = 1\,760 \text{ vatios (W)}}$$

c) *Corriente reactiva:*

$$\boxed{I_r = I \cdot \text{sen } \varphi}$$

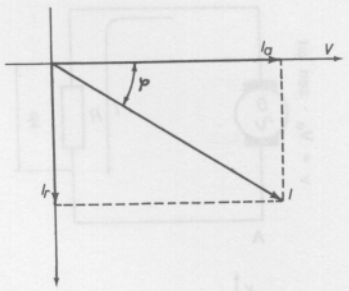


Fig. 2.9 Representación de Fresnel de la tensión y la corriente en un circuito no puramente resistivo, sometido a corriente alterna.

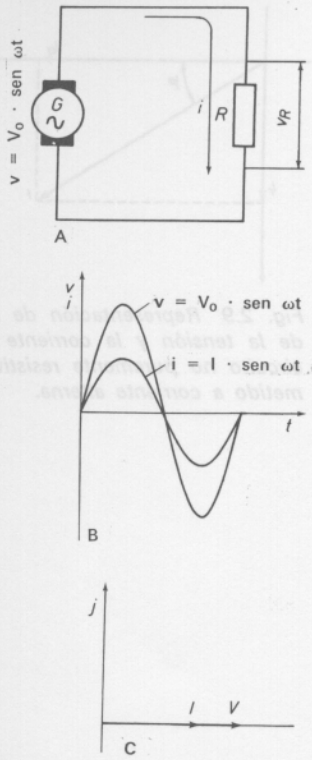


Fig. 2.10 A, *circuito resistivo puro;* B, *representación cartesiana de* v *e* i; C, *representación de Fresnel de* v *e* i.

Según tablas trigonométricas:

$$\varphi = \text{arc cos } 0{,}8 = 36^\circ\ 52'\ 11''$$

$$\text{sen } \varphi = 0{,}6$$

$$I_r = 10 \times 0{,}6 = 6 \text{ amperios reactivos (Ar)}$$

Potencia reactiva:

$$P_r = V \cdot I \cdot \text{sen } \varphi = V \cdot I_r = 220 \times 6 = 1\,320 \text{ voltamperios reactivos (VAr)}$$

Obsérvese que la potencia aparente al cuadrado es igual a la suma de los cuadrados de las potencias activa y reactiva.

Para la demostración teórica de este resultado, basta multiplicar por la tensión los tres vectores corriente de la figura 2.9, y aplicar el teorema de Pitágoras.

2.4 Elementos pasivos: resistencia, bobina, condensador. Su comportamiento en corriente alterna

Cuando un circuito compuesto por estos elementos recibe energía eléctrica, puede comportarse de tres formas distintas: disipando la energía en forma de calor, almacenándola en forma de campo magnético o almacenándola en forma de campo eléctrico.

En el primer caso, se trata de un circuito resistivo puro; en el segundo, de una bobina; y en el tercero, de un condensador.

En la práctica, muy rara vez se dan estos casos por separado, ya que se verifican 2 ó 3 al tiempo; sin embargo, se pueden suponer sus efectos por separado, para hacer un análisis de los mismos.

2.4.1 *Circuito con resistencia pura*

Es el circuito más simple de todos (fig. 2.10A).

Para el cálculo de la corriente que atraviesa el circuito, basta con aplicar la ley de Ohm generalizada: *La corriente que circula por un circuito eléctrico, o por una rama del mismo, es directamente proporcional a la tensión aplicada a sus extremos e inversamente proporcional a la impedancia del mismo.*

En nuestro circuito la impedancia es la resistencia *R*. Luego aplicando la ley de Ohm:

$$i = \frac{v}{Z} = \frac{V_0 \cdot \text{sen } \omega t}{R} = \frac{V_0}{R} \cdot \text{sen } \omega t$$

llamando I_0 al valor $\frac{V_0}{R}$, resulta:

$$\boxed{i = I_0 \cdot \text{sen } \omega t}$$

Del desarrollo anterior podemos sacar las siguientes conclusiones:

— La tensión *v* es un vector cuyo valor en todo momento es $V_0 \cdot \text{sen } \omega t$ y cuyo argumento varía en todo instante y viene representado por ωt.

— La corriente que atraviesa el circuito es proporcional a una constante, I_0, de valor fácilmente calculable.

— La corriente es alterna senoidal (ya que es una función que depende del valor del seno de un ángulo).

— La corriente está en fase con la tensión aplicada al circuito (*v*) (figuras 2.10B y C).

En este circuito sólo existirá potencia activa, pues el factor de potencia es la unidad ($\cos \varphi = 1$), ya que es nulo el ángulo que forma la tensión con la corriente (están en fase).

2.4.2 *Circuito con inductancia pura*

Este es el caso ideal de una bobina sin resistencia óhmica. Prácticamente se considera este caso cuando la reactancia inductiva es de un valor lo suficientemente elevado como para considerar despreciable la resistencia óhmica.

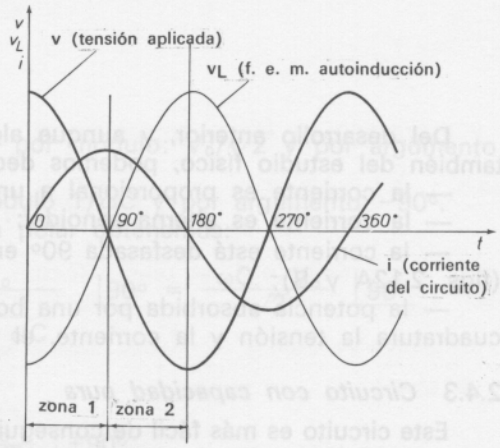


Fig. 2.11 Diagrama cartesiano representativo de la corriente y la fuerza electromotriz de autoinducción de una bobina, junto con la tensión aplicada.

Una bobina pura adelanta 90° la tensión respecto de la corriente que por ella circula. El fenómeno físico queda explicado a continuación.

Cuando es máxima la fuerza electromotriz de autoinducción V_L engendrada por la bobina, es mínima (de valor cero) la corriente que por ella circula, *i*.

Esto se debe a que entonces es máxima la variación de la corriente y del flujo magnético (fig. 2.11).

Según la ley de Lenz, la fuerza electromotriz de autoinducción V_L se opone a la causa que la produce, es decir, a la variación de la corriente.

Por tanto, durante el crecimiento de la corriente, la fuerza electromotriz de autoinducción actúa en sentido contrario, para así dificultar el aumento de ésta.

Por ello, entre 0° y 90°, la curva de V_L está por debajo del eje, decreciendo el valor de la fuerza electromotriz a medida que disminuye el ritmo de crecimiento de la corriente (zona 1 de la figura 2.11).

Cuando el valor de la corriente es el máximo, V_L se hace cero; esto sucede a los 90°. En este momento, el valor del campo magnético es máximo.

Entre 90° y 180°, el valor de la corriente disminuye; por tanto, según la ley de Lenz, la fuerza electromotriz de autoinducción V_L será del mismo signo que la corriente, para oponerse a la disminución de ésta (zona 2 de la figura 2.11).

Entre 180° y 360°, son válidas las mismas consideraciones que las hechas hasta aquí.

Por todo esto es por lo que la fuerza electromotriz de autoinducción V_L va retrasada 90° respecto de la corriente *i*.

Para contrarrestar la fuerza electromotriz de autoinducción V_L, se debe aplicar a la bobina una tensión V igual a V_L, pero de sentido contrario, es decir, desfasada 180°.

Por ello la corriente va 90° retrasada respecto de la tensión que se aplica a la bobina.

Matemáticamente la demostración del desfase de corriente y tensión en una bobina es fácil, admitiendo sin demostración que el valor de la reactancia inductiva es de $j\omega L = X_L$ (valor complejo).

Para ello basta aplicar la ley de Ohm generalizada al circuito de la figura 2.12A.

$$i = \frac{v}{Z} = \frac{V_o \cdot \text{sen } \omega t}{j\omega L} = \frac{V_o}{j\omega L} \cdot \text{sen } \omega t$$

y resolver la ecuación como el cociente de dos números complejos: el numerador, de módulo $V_o/\sqrt{2}$ y argumento inicial 0°; y el denominador, de módulo ωL y argumento 90°.

Efectuando el cociente en forma polar obtenemos:

$$I = \frac{V_o/\sqrt{2} \ \lfloor 0^\circ}{|Z| \ \lfloor 90^\circ} = \frac{V_o}{\sqrt{2}\ \omega L} \ \lfloor -90^\circ$$

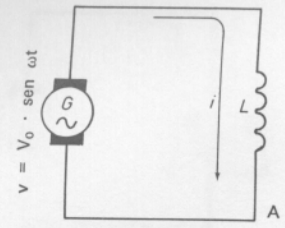
llamando I_o a $\frac{V_o}{\omega L}$, resulta:

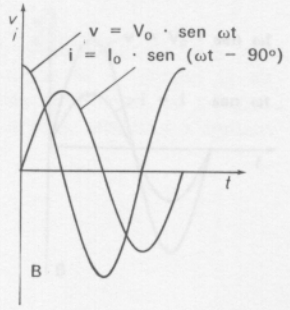
$$I = \frac{I_o}{\sqrt{2}} \ \lfloor -90^\circ$$

(valor eficaz de la corriente y su ángulo de fase respecto a la tensión).

Y por tanto:

$$i = I_o \cdot \text{sen } (\omega t - 90^\circ)$$





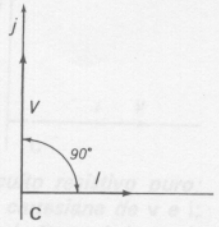


Fig. 2.12 A, *circuito con inductancia pura;* B, *representación cartesiana de* v *e* i; C, *representación de Fresnel de* v *e* i.

Del desarrollo anterior, y aunque algunas conclusiones se han deducido también del estudio físico, podemos decir:

— la corriente es proporcional a una constante: I_o;

— la corriente es alterna senoidal;

— la corriente está desfasada 90° en retraso respecto a la tensión aplicada (figs. 2.12A y B);

— la potencia absorbida por una bobina pura es cero, ya que al estar en cuadratura la tensión y la corriente, el factor de potencia es nulo.

2.4.3 *Circuito con capacidad pura*

Este circuito es más fácil de conseguir que el anterior y se da prácticamente con un 100 % de eficacia en los condensadores que utilizan el aire como dieléctrico.

Una capacidad pura adelanta 90° la corriente respecto de la tensión.

El fenómeno físico sigue el proceso que seguidamente se explica.

La corriente de carga del condensador va disminuyendo a medida que aumenta la carga de éste (zona 1 de la figura 2.13), llegando a ser nula la corriente *i* cuando la tensión V_C es máxima (en los 90°); esto sucede entre los 0° y 90°.

Entre los 90° y 180°, el condensador se descarga, teniendo entonces la corriente y la tensión V_C el mismo signo (zona 2).

En los 180°, el condensador está completamente descargado (V_C será nula), mientras que *i* pasará por un máximo.

De los 180° a los 270° (zona 3), el condensador se cargará en sentido contrario a como lo había hecho de los 0° a 90°. Durante esta carga otra vez V_C es de sentido contrario a *i*.

A los 270°, el condensador se halla completamente cargado (V_C máxima) siendo entonces la corriente de carga nula.

Entre los 270° y los 360° (zona 4), el condensador se descarga; la tensión V_C y la corriente *i* vuelven a tener el mismo signo, como en la zona 2.

Como se puede apreciar, la tensión entre las armaduras del condensador V_C debida a la carga y al campo eléctrico va adelantada 90° respecto de la corriente.

Para contrarrestarla, se ha de aplicar al condensador una tensión *V* igual a V_C, pero de sentido contrario, es decir, desfasada 180°.

Por ello la corriente va 90° en adelanto respecto de la tensión que se aplica a un condensador.

Matemáticamente la demostración del desfase de corriente y tensión en un condensador es fácil, admitiendo sin demostración que el valor de la reactancia capacitiva es de $\frac{1}{j\omega C} = X_C$.

Para ello basta aplicar la ley de Ohm generalizada al circuito de la figura 2.14A.

$$i = \frac{v}{Z} = \frac{V_o \cdot \text{sen } \omega t}{\frac{1}{j\omega C}}$$

Obsérvese que:

$$\frac{1}{j\omega C} = -j\,\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega C}\,\lfloor -90° \rfloor$$

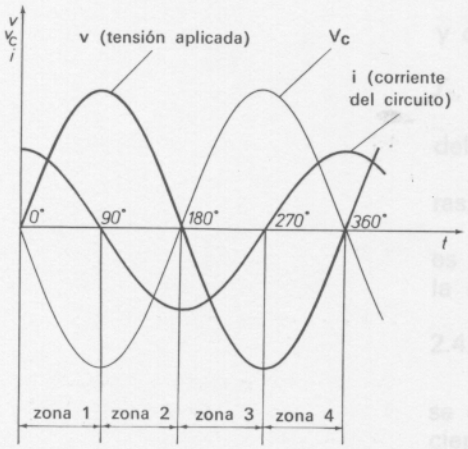
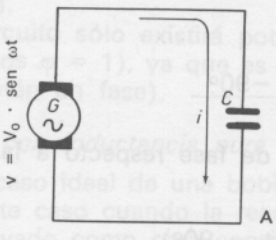


Fig. 2.13 Diagrama cartesiano representativo de la corriente, la tensión debida al campo eléctrico y la tensión aplicada a un condensador.



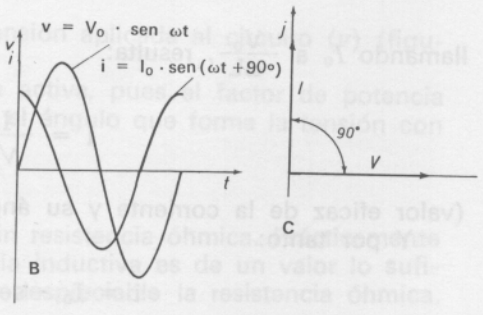


Fig. 2.14 A, *circuito con capacidad sin pérdidas;* B, *representación cartesiana de* v *e* i; C, *representación de Fresnel de* v *e* i.

El complejo del numerador tiene por módulo: $V_o/\sqrt{2}$ y por argumento inicial 0°.

El del denominador tiene por módulo $1/\omega C$ y por argumento $-90°$.

Resolviendo el cociente en forma polar obtenemos:

$$I = \frac{V_o/\sqrt{2} \; \underline{|0°}}{|Z| \; \underline{|-90°}} = \frac{V_o}{\sqrt{2}\,\frac{1}{\omega C}} \; \underline{|90°} = \frac{\omega C \cdot V_o}{\sqrt{2}} \; \underline{|90°}$$

Llamando I_o a $\omega C \cdot V_o$, resulta:

$$I = \frac{I_o}{\sqrt{2}} \; \underline{|+90°}$$

Y por tanto:

$$\boxed{i = I_o \cdot \text{sen } (\omega t + 90°)}$$

Ecuación de la que se deducen las siguientes conclusiones:

— la corriente es proporcional a una constante, I_o;

— la corriente es alterna senoidal;

— la corriente está desfasada 90° en adelanto respecto de la tensión aplicada (figs. 2.14B y C);

— la potencia absorbida por un condensador sin pérdidas es cero, por estar en cuadratura la tensión aplicada y la corriente del circuito.

2.5 Circuitos en serie

Como se ha dicho, difícilmente se plantea en la realidad el tener que resolver un circuito en el que esté presente sólo uno de los elementos pasivos.

Se estudiará ahora la combinación de ellos, para lo cual se aplicará el principio de superposición, teniendo siempre en cuenta que lo que ahora se maneja son vectores.

2.5.1 *Circuito en serie RL*

Es el formado por una resistencia y una autoinducción en serie (fig. 2.15). Para su resolución recuérdese que impedancia es la resistencia total que presenta un circuito al paso de la corriente alterna.

Al ser un circuito en serie, la impedancia será:

$$Z = R + j\omega L$$

notación compleja donde R es la resistencia óhmica y L es la reactancia de la bobina.

De la representación gráfica de la impedancia, llamada *triángulo de impedancias* (fig. 2.16), se deduce inmediatamente el valor del módulo de la impedancia Z (sin más que aplicar el teorema de Pitágoras), y su argumento φ:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$\varphi = \text{arc tg } \frac{\omega L}{R}$$

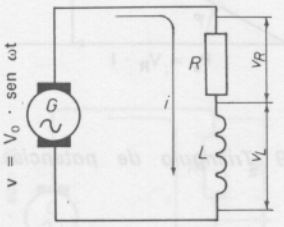


Fig. 2.15 Circuito RL.

Para calcular la corriente instantánea que circula por este circuito, se aplicará la ley de Ohm generalizada:

$$i = \frac{v}{Z} = \frac{V_o \cdot \text{sen } \omega t}{R + j\omega L}$$

expresión que representa el cociente de dos vectores: el primero, de módulo $V_o/\sqrt{2}$ y argumento inicial 0°; y el segundo, de módulo $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ y argumento $+\varphi°$; resuelto en forma polar:

$$I = \frac{V_o/\sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \; \underline{|0° - \varphi}$$

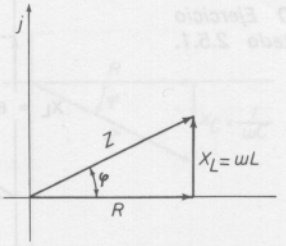


Fig. 2.16 Representación gráfica de la impedancia. Triángulo de impedancias.

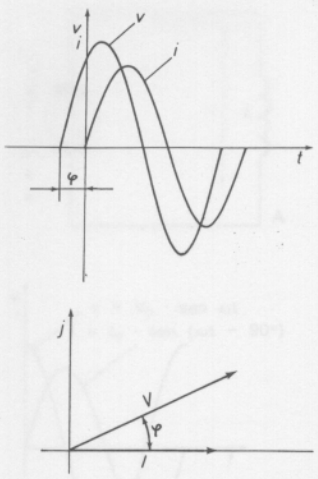


Fig. 2.17 Representación gráfica de v e i.

y expresado en forma convencional:

$$i = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \operatorname{sen}(\omega t - \varphi)$$

Denominando I_0 al primer factor, nos queda:

$$\boxed{i = I_0 \cdot \operatorname{sen}(\omega t - \varphi)}$$

ya que:

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

Ecuación de la que podemos sacar las siguientes conclusiones:

— la corriente es directamente proporcional a una constante I_0;

— la corriente es alterna senoidal;

— la corriente está desfasada con atraso de un ángulo φ respecto de la tensión (fig. 2.17);

— el ángulo de fase entre la tensión y la corriente para una determinada pulsación (ω) depende exclusivamente de los valores de *R* y de *L*.

Seguidamente se indica la relación de tensiones en el circuito.

Multiplicando los lados del triángulo de impedancias por una constante, se obtendrá otro triángulo semejante.

Si a esa constante se le da el valor de la intensidad eficaz que recorre el circuito (esta intensidad es igual para los dos elementos, ya que están en serie), se obtendrá el llamado *triángulo de tensiones* (fig. 2.18).

En él puede apreciarse que la tensión aplicada al circuito es igual a la suma vectorial de las tensiones en la resistencia y la bobina.

Si el triángulo de tensiones se multiplica nuevamente por la intensidad eficaz, se obtendrá el *triángulo de potencias* (fig. 2.19).

Para familiarizarse con el cálculo de circuitos, sígase detenidamente la resolución del siguiente ejemplo.

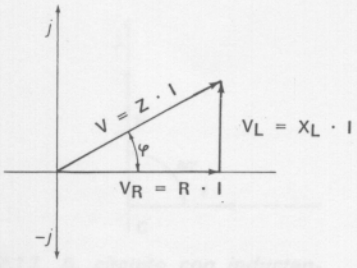


Fig. 2.18 Triángulo de tensiones.

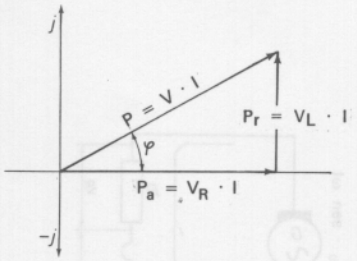


Fig. 2.19 Triángulo de potencias.

Un circuito está formado por una resistencia de 8 Ω en serie con una autoinducción de valor 19,1 mH. El conjunto está alimentado por una tensión de V = 311,12 · sen 314 t (fig. 2.20). Hállese:

1.° Valor de impedancia del circuito (módulo y argumento). Triángulo de impedancias.
2.° Valor instantáneo de la corriente que atraviesa el circuito, y su fase respecto de *V*.
3.° Valor eficaz de la corriente.
4.° Valores eficaces de tensión en extremos de *R* y *L*. Triángulo de tensiones.
5.° Factor de potencia del circuito.
6.° Potencias activa, aparente y reactiva del circuito. Triángulo de potencias.

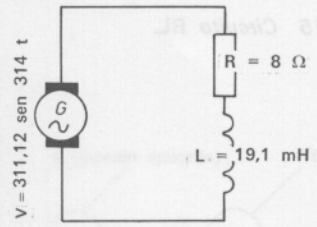


Fig. 2.20 Ejercicio del apartado 2.5.1.

1.° *Valor de* Z:

$$Z = R + j\omega L = 8 + j314 \times 0{,}0191 = 8 + j6\ \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{8^2 + (314 \times 0{,}0191)^2} = 10\ \Omega$$

Argumento:

$$\varphi = \text{arc tg}\ \frac{\omega L}{R} = \text{arc tg}\ \frac{314 \times 0{,}0191}{8} = 36^\circ\ 52'\ 11'' = 0{,}64\ \text{rad}$$

Con estos valores puede representarse el diagrama de la figura 2.21A (otra forma de representación del triángulo de impedancias)

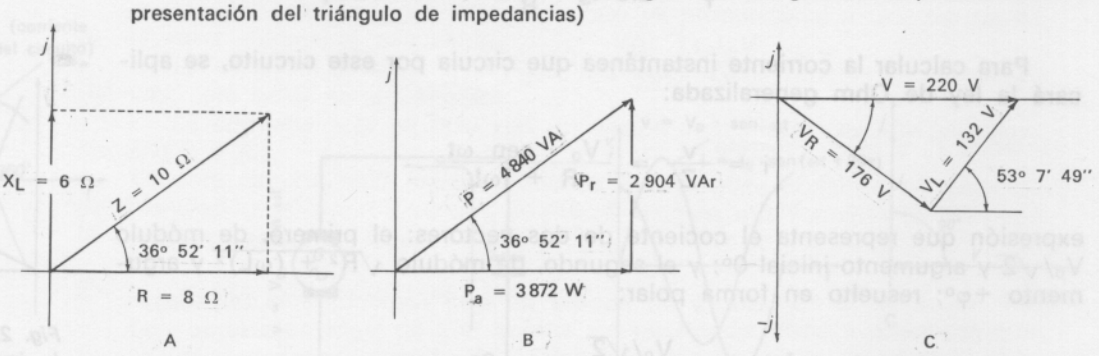


Fig. 2.21 A, *triángulo de* Z; B, *triángulo de* V; C, *triángulo de* P.

2.º *Valor de la corriente:*

$$i = \frac{V_0/\sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \underline{|0^\circ - \varphi} = \frac{311{,}12}{\sqrt{2} \times 10} \underline{|0^\circ - 0{,}64}; \quad I_0 = \frac{311{,}12 \times \sqrt{2}}{\sqrt{2} \times 10} \underline{|-0{,}64}$$

$$i = 31{,}12 \text{ sen } (314\ t - 0{,}64) \text{ A}$$

Fase con respecto a *V*: 0,64 radianes en atraso.

3.º Recordando (párrafo 1.3.7 del tema anterior) la relación entre el valor máximo y eficaz:

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{31{,}12}{\sqrt{2}} = 22 \text{ A}$$

4.º *Valor de la tensión en* R (consideramos como origen de fase la tensión del generador):

$$V_R = R \cdot I = 8 \underline{|0} \times 22 \underline{|-36^\circ\ 52'\ 11''} = 176 \underline{|-36^\circ\ 52'\ 11''} \text{ V}$$

valor de tensión en *L*:

$$V_L = X_L \cdot I = 6 \underline{|90^\circ} \times 22 \underline{|-36^\circ\ 52'\ 11''} = 132 \underline{|53^\circ\ 7'\ 49''} \text{ V}$$

también:

$$V = Z \cdot I = 10 \underline{|36^\circ\ 52'\ 11''} \times 22 \underline{|-36^\circ\ 52'\ 11''} = 220 \underline{|0^\circ} \text{ V}$$

obsérvese que: $176^2 + 132^2 = 220^2$ (220 es el valor de la tensión eficaz correspondiente a $V = 311{,}12$ sen 314 t).

Con estos valores podemos construir el triángulo de tensiones de la figura 2.21B.

5.º *Factor de potencia:*

$$\cos \varphi = \cos 36^\circ\ 52'\ 11'' = 0{,}8$$

6.º *Potencia aparente:*

$$P = V \cdot I = 220 \times 22 = 4\,840 \text{ VA}$$

Potencia activa:

$$P_a = P \cdot \cos \varphi = 4\,840 \times 0{,}8 = 3\,872 \text{ W}$$

Potencia reactiva:

$$P_r = P \cdot \text{sen } \varphi = 4\,840 \times 0{,}6 = 2\,904 \text{ VAr}$$

La figura 2.21C muestra el triángulo de potencias.

Observación. En este ejercicio se ha expresado la tensión del generador en valor instantáneo. El proceso de cálculo hubiese sido análogo si la tensión de entrada se hubiese expresado en valor eficaz, dando también el valor de la frecuencia (recuérdese que $\omega = 2\ \pi f$).

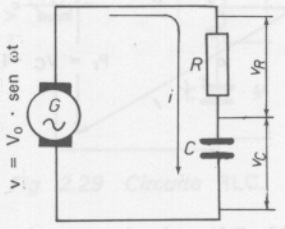


Fig. 2.22 Circuito RC.

2.5.2 *Circuito en serie RC*

Es el formado por una resistencia y una capacidad en serie (fig. 2.22).

Para su resolución se utilizarán criterios análogos a los utilizados en el apartado anterior.

La impedancia total del circuito será (impedancia compleja):

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C} = R - \frac{j}{\omega C}$$

R es la resistencia óhmica y $\frac{-j}{\omega C}$ es la reactancia capacitiva.

De la representación gráfica de *Z* (fig. 2.23), se deduce el módulo y el argumento:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

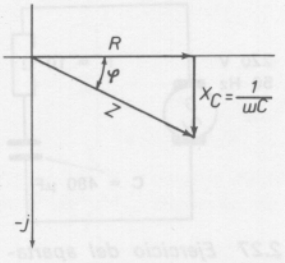


Fig. 2.23 Triángulo de impedancias.

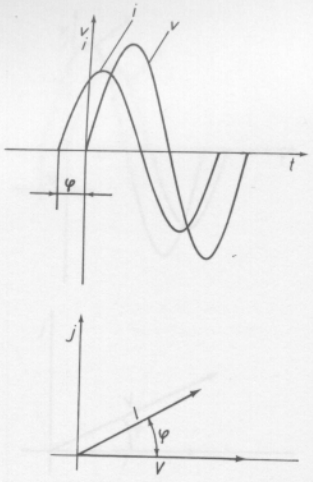


Fig. 2.24 Representación gráfica de v e i.

Argumento:

$$\varphi = \text{arc tg} \frac{-\frac{1}{\omega C}}{R} = \text{arc tg} - \frac{1}{\omega CR}$$

La corriente instantánea que circula por este circuito será:

$$i = \frac{v}{Z} = \frac{V_0 \cdot \text{sen } \omega t}{R - j\frac{1}{\omega C}}; \qquad I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} \boxed{0^\circ - (-\varphi)}$$

o lo que es lo mismo:

$$i = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} \cdot \text{sen } (\omega t + \varphi)$$

Denominando I_0 al primer factor, queda:

$$\boxed{i = I_0 \cdot \text{sen } (\omega t + \varphi)}$$

Ecuación de la que sacamos las siguientes conclusiones:

— la corriente es directamente proporcional a una constante, I_0;

— la corriente es alterna senoidal;

— la corriente está desfasada un ángulo φ en adelanto respecto de la tensión (fig. 2.24);

— el ángulo de fase entre V e I para una ω constante depende exclusivamente de los valores de R y C.

Los triángulos de tensiones y el de potencias (figs. 2.25 y 2.26), se obtendrán de igual manera que en el circuito anterior: multiplicando el de impedancias por la intensidad, y el de tensiones también por la intensidad.

Se resuelve ahora un ejemplo de este tipo de circuitos para afianzarse en el manejo de estos conceptos.

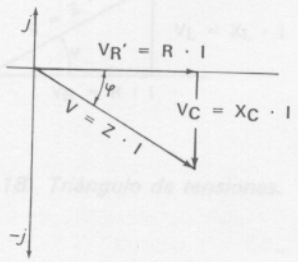


Fig. 2.25 Triángulo de tensiones.

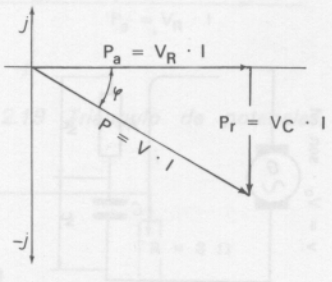


Fig. 2.26 Triángulo de potencias.

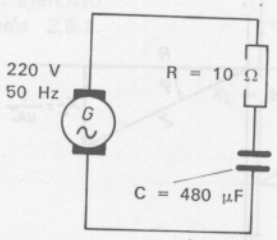


Fig. 2.27 Ejercicio del apartado 2.5.2.

Un circuito está formado por una resistencia de 10 Ω en serie con un condensador de 480 μF. El conjunto está alimentado por una tensión de 220 V (eficaces) a una frecuencia de 50 Hz (fig. 2.27). Hallar:

1.º Valor de la impedancia del circuito (módulo y argumento).

2.º Valor instantáneo y eficaz de la corriente que atraviesa el circuito y su fase respecto de V.

3.º Valores eficaces de tensión en extremos de R y C. Triángulo de tensiones.

4.º Factor de potencia.

5.º Potencias del circuito. Triángulo de potencias.

1.º *Valor de Z:*

$$Z = R - j\frac{1}{\omega C} = 10 - j\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \times 480 \times 10^{-6}} = 10 - j6{,}63\ \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{10^2 + 6{,}63^2} = 12\ \Omega$$

Argumento:

$$\varphi = \text{arc tg} - \frac{1}{\omega CR} = \text{arc tg} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \times 480 \times 10^{-6} \times 10}$$

$$= -33^\circ\ 33'\ 48'' = 0{,}585 \text{ rad}$$

Con estos valores puede representarse el triángulo de Z (fig. 2.28A).

2.º *Valor instantáneo de la corriente.* Una tensión eficaz de 220 V/50 Hz corresponde con una tensión instantánea de:

$$v = V_0 \cdot \text{sen } \omega t = \sqrt{2}\ V \text{ sen } \omega t = \sqrt{2} \times 220 \cdot \text{sen } (2\pi \cdot 50 \cdot t) = 311{,}12 \text{ sen } 314\ t\ V$$

Por tanto:

$$I = \frac{311,12}{\sqrt{2} \times 12} \; \underline{|0^\circ + 0,585}$$

$$i = 25,92 \text{ sen } (314\ t + 0,585) \text{ A}$$

Valor eficaz de la corriente:

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{25,92}{\sqrt{2}} = 18,32 \text{ A}$$

Fase con respecto a *V*: 0,585 radianes en adelanto.

3.º *Valor de tensión en* R (considerando la tensión del generador como origen de fase):

$$V_R = R \cdot I = 10 \; \underline{|0^\circ} \times 18,32 \; \underline{|33^\circ\ 33'\ 48''} = 183,2 \; \underline{|33^\circ\ 33'\ 48''} \text{ V}$$

Valor de tensión en C:

$$V_C = X_C \cdot I = 6,63 \; \underline{|-90^\circ} \times 18,32 \; \underline{|33^\circ\ 33'\ 48''} = 121,46 \; \underline{|-56^\circ\ 26'\ 12''} \text{ V}$$

Con estos valores se podrá construir el triángulo de tensiones (fig. 2.28B).

4.º *Factor de potencia:*

$$\cos \varphi = \cos (-33^\circ\ 33'\ 48'') = 0,83$$

5.º *Potencia aparente:*

$$P = V \cdot I = 220 \times 18,32 = 4\,030,4 \text{ VA}$$

Potencia activa:

$$P_a = P \cdot \cos \varphi = 4\,030,4 \times 0,83 = 3\,345,23 \text{ W}$$

Potencia reactiva:

$$P_r = P \cdot \text{sen } \varphi = 4\,030,4 \times -0,55 = -2\,216,72 \text{ VAr}$$

(El signo menos del resultado de P_r indica que ésta es debida a una capacidad.)
Con estos datos se podrá construir el triángulo de la figura 2.28C.

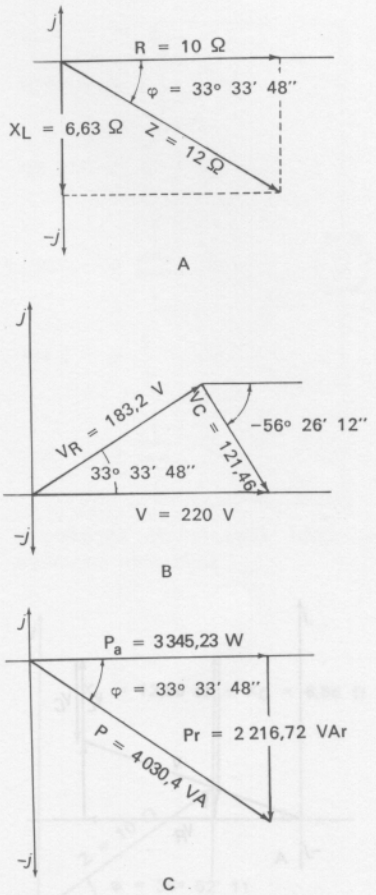


Fig. 2.28 A, *triángulo de* Z; B, *triángulo de* V; C, *triángulo de* P.

2.5.3 *Circuito en serie RLC*

Es el formado por una resistencia, una inductancia y una capacidad en serie (fig. 2.29). Para su solución basta considerar los efectos estudiados anteriormente.

Su impedancia es:

$$\boxed{Z = R + j\omega L - j\,\frac{1}{\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$$

obsérvese en esta expresión que si $X_L = \omega L$ es menor que $X_C = \dfrac{1}{\omega C}$, el circuito tiene una parte reactiva de carácter capacitivo, comportándose como un circuito RC.

Por el contrario, si $X_C < X_L$, el circuito tendrá carácter inductivo comportándose como un circuito *RL*.

Por último, si $X_C = X_L$, solamente tiene componente resistiva la impedancia y se dice que el circuito está en resonancia. Este circuito, debido a su importancia, será objeto de estudio en un apartado próximo.

La representación gráfica de la impedancia se muestra en la figura 2.30. De ella se puede deducir el cálculo de su módulo y su argumento:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Argumento:

$$\varphi = \text{arc tg } \frac{\omega L - \dfrac{1}{\omega C}}{R}$$

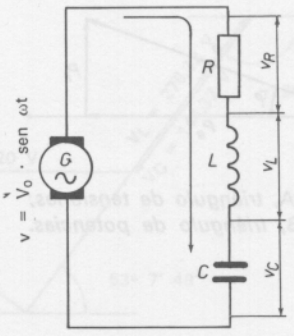


Fig. 2.29 Circuito RLC.

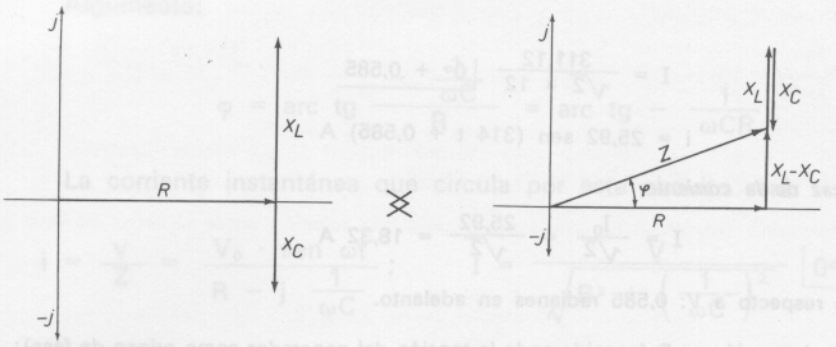


Fig. 2.30 Representación de la impedancia.

En este circuito, φ puede ser positivo o negativo, dependiendo del signo de la diferencia

$$\omega L - \frac{1}{\omega C}$$

La corriente instantánea de este circuito será:

$$i = \frac{v}{Z} = \frac{V_0 \cdot \text{sen } \omega t}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}; \quad I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \boxed{0^\circ - \varphi}$$

o lo que es igual:

$$i = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \cdot \text{sen } (\omega t - \varphi)$$

Denominando I_0 al primer factor, se obtiene:

$$\boxed{i = I_0 \cdot \text{sen } (\omega t - \varphi)}$$

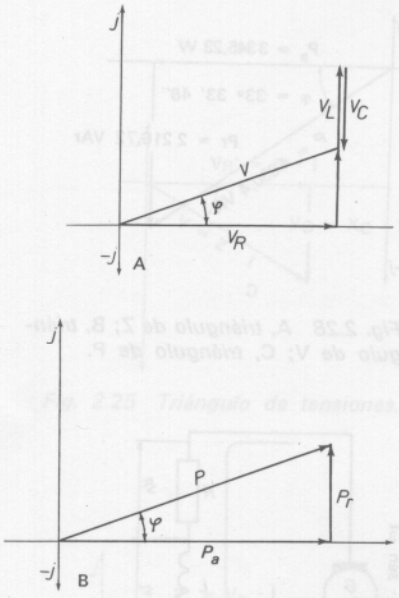


Fig. 2.31 A, *triángulo de tensiones;* B, *triángulo de potencias.*

En este circuito la corriente también está desfasada un cierto ángulo φ respecto de la tensión, pero estará en adelanto o en atraso, dependiendo del carácter del circuito.

El triángulo de tensiones y el de potencias (fig. 2.31A y B) se obtienen de la misma forma que en los dos circuitos anteriores.

A continuación, se resuelve un circuito de este tipo para fijar conceptos.

Un circuito está formado por una resistencia de 8 Ω en serie con un condensador de 485,5 μF y una bobina de 40 mH. El conjunto está alimentado por una tensión de 220 V/50 Hz (fig. 2.32). Hallar:

1.º Valor de la impedancia del circuito (módulo y argumento).
2.º Valor instantáneo y eficaz de la corriente que atraviesa el circuito, y su fase con respecto a *V*.
3.º Valores eficaces de tensión en extremos de *R*, *L* y *C*. Triángulo de tensiones.
4.º Factor de potencia.
5.º Potencias del circuito. Triángulo de potencias.

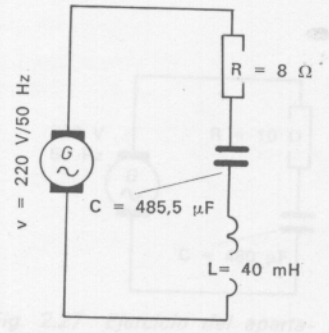


Fig. 2.32 Ejercicio del apartado 2.5.3.

1.º *Valor de Z:*

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = 8 + j\left(2 \cdot \pi \cdot 50 \times 0{,}4 - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \times 485{,}5 \times 10^{-6}}\right)$$

$$= 8 + j\,(12{,}56 - 6{,}56) = 8 + j6\ \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10\ \Omega$$

$$\varphi = \text{arc tg } \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \text{arc tg } \frac{6}{8} = 36^\circ\ 52'\ 11'' = 0{,}64 \text{ rad}$$

El circuito tiene carácter inductivo, ya que es positivo el argumento de *Z*. (Compárense los resultados de este problema con los obtenidos en el apartado 2.5.1.)
Con estos valores se representará el triángulo de la figura 2.33A.

2.º *Valor instantáneo de la corriente.*
Una tensión eficaz de 220 V/50 Hz corresponde a una tensión instantánea de:

$$V = 311{,}12 \text{ sen } 314\ t$$

Por tanto:

$$i = \frac{V_0}{|Z|} \cdot \text{sen } (\omega t - \varphi) = \frac{311{,}12}{10} \cdot \text{sen } (314 - 0{,}64)$$

$$= 31{,}112 \text{ sen } (314\ t - 0{,}64) \text{ A}$$

Valor eficaz de la corriente:

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{31{,}112}{\sqrt{2}} = 22 \text{ A}$$

La corriente va retrasada 0,64 radianes respecto de la tensión.

3.º *Valor de tensión en* R (consideramos como origen de fase la tensión del generador):

$$V_R = R \cdot I = 8 \ \underline{|0^\circ} \times 22 \ \underline{|-36^\circ\ 52'\ 11''} = 176 \ \underline{|-36^\circ\ 52'\ 11''} \text{ V}$$

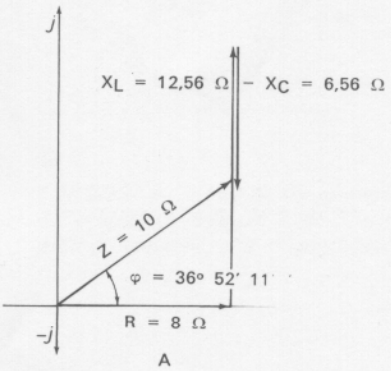
Valor de tensión en L:

$$V_L = X_L \cdot I = 12{,}56 \ \underline{|90^\circ} \times 22 \ \underline{|-36^\circ\ 52'\ 11''} = 276{,}32 \ \underline{|53^\circ\ 7'\ 49''} \text{ V}$$

Valor de tensión en C:

$$V_C = X_C \cdot I = 6{,}56 \ \underline{|-90^\circ} \times 22 \ \underline{|-36^\circ\ 52'\ 11''} = 144{,}32 \ \underline{|-126^\circ\ 52'\ 11''} \text{ V}$$

Con estos valores podemos representar el triángulo de tensiones de la figura 2.33B.



A

4.º *Factor de potencia:*

$$\cos \varphi = \cos 36^\circ\ 52'\ 11'' = 0{,}8$$

5.º *Potencia aparente:*

$$P = V \cdot I = 220 \times 22 = 4\,840 \text{ VA}$$

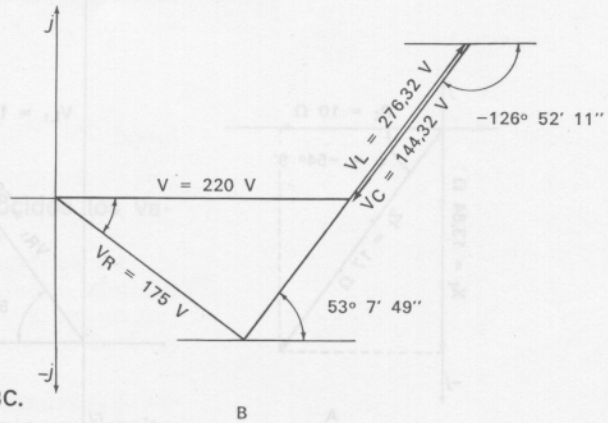
Potencia activa:

$$P_a = V \cdot I \cdot \cos \varphi = 4\,840 \times 0{,}8 = 3\,872 \text{ W}$$

Potencia reactiva:

$$P_r = V \cdot I \cdot \text{sen } \varphi = 4\,040 \times 0{,}6 = 2\,904 \text{ VAr}$$

Con estos datos trazamos el triángulo de potencias de la figura 2.33C.



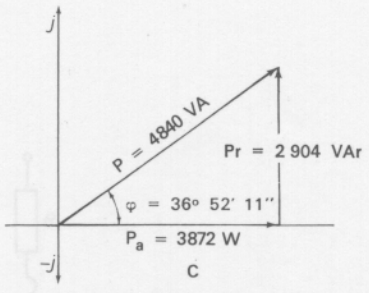
B

2.5.4 *Cálculo de circuitos en serie más complejos*

En general, para el estudio de circuitos en serie más complejos, se procede en primer lugar al cálculo de la impedancia, considerando cada uno de los componentes como si se tratara de una impedancia compleja, para después calcular, mediante la ley de Ohm generalizada, la corriente que circula por el circuito, y así poder determinar las caídas de tensión en cada uno de los elementos.
Véase el siguiente ejemplo.

Sea el circuito de la figura 2.34, en el que el generador suministra una tensión de 100 V a 50 Hz. Hallar:

1.º Impedancia total del circuito (módulo y argumento).
2.º Corriente total (en valor eficaz) y fase con respecto a *V*.
3.º Tensión en cada uno de los elementos. Polígono de tensiones.
4.º Potencia activa absorbida por todo el circuito.



C

Fig. 2.33 A, *triángulo de* Z; B, *triángulo de* V; C, *triángulo de* P.

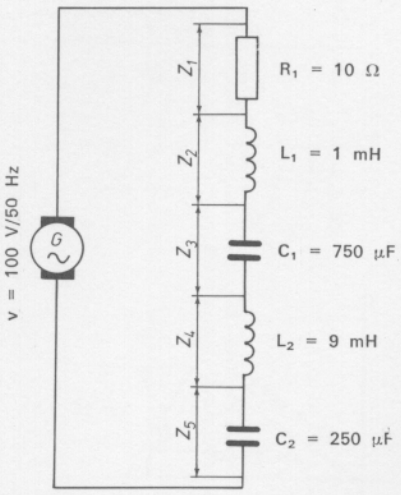


Fig. 2.34 Ejemplo de circuito en serie más complejo.

1.º *Cálculo de la impedancia total:*

$$Z_t = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5$$

$$= (R_1 + 0j) + (0 + j\omega L_1) + \left(0 - j\,\frac{1}{\omega C_1}\right) + (0 + j\omega L_2) + \left(0 - j\,\frac{1}{\omega C_2}\right)$$

$$= R_1 + j\left(\omega L_1 + \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{1}{\omega C_2}\right)$$

$$= R_1 + j\left[\omega\,(L_1 + L_2) - \frac{1}{\omega}\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)\right]$$

Obsérvese que la impedancia total Z_t nos ha quedado de la forma siguiente:

$$Z_t = R_t + jX_t$$

pudiendo calcular, por el procedimiento conocido, su módulo y argumento:

$$Z_t = R_t + jX_t = R_1 + j\left[\omega\,(L_1 + L_2) - \frac{1}{\omega}\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)\right]$$

$$= 10 + j\left[2 \cdot \pi \cdot 50\,(1 \cdot 10^{-3} + 9 \cdot 10^{-3}) - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50}\left(\frac{1}{750 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{250 \cdot 10^{-6}}\right)\right]$$

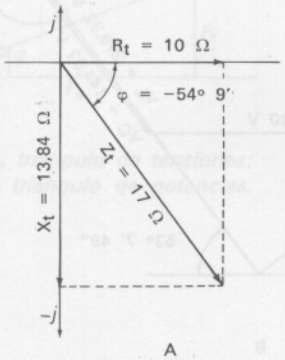
$$= 10 - j13{,}84\ \Omega$$

(El signo menos nos indica que el conjunto de toda la carga tiene carácter capacitivo.)

$$|Z_t| = \sqrt{R^2 + X_t^2} = \sqrt{10^2 + 13{,}84^2} = 17{,}07 \sim 17\ \Omega$$

$$\text{Argumento de } Z_t = \text{arc tg}\,\frac{X_t}{R_t} = \text{arc tg}\,\frac{-13{,}84}{10} = -54^\circ\ 9'$$

Con estos datos podemos trazar el triángulo de impedancias de la figura 2.35A.



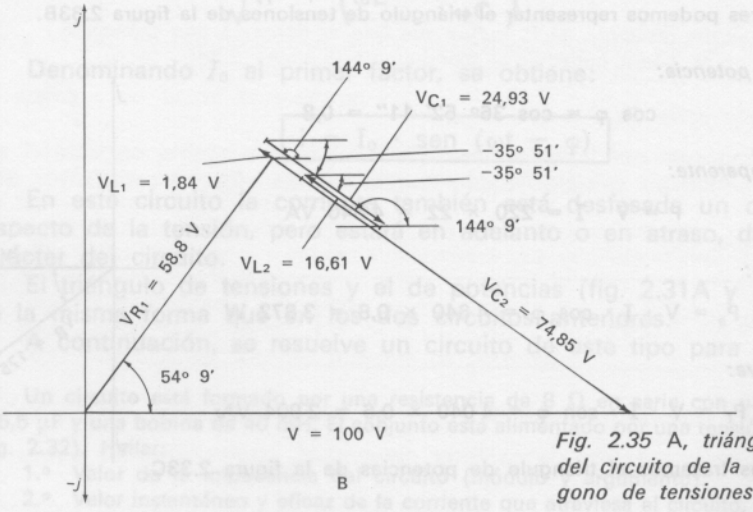


Fig. 2.35 A, *triángulo de impedancias del circuito de la figura 2.34;* B, *polígono de tensiones del mismo circuito.*

2.º *Valor de la corriente* (considerando como origen de fase la tensión aplicada):

$$I = \frac{V}{Z_t} = \frac{100\ \underline{|0^\circ}}{17\ \underline{|-54^\circ\ 9'}} = 5{,}88\ \underline{|54^\circ\ 9'}\ \text{A}$$

La corriente va adelantada 54º 9′ respecto de la tensión aplicada.

3.º *Tensión en cada uno de los elementos:*

Tensión en R_1*:*

$$V_{R_1} = I \cdot R_1 = 5{,}88\ \underline{|54^\circ\ 9'} \times 10\ \underline{|0^\circ} = 58{,}8\ \underline{|54^\circ\ 9'}\ \text{V}$$

Tensión en L_1*:*

$$V_{L_1} = I \cdot X_{L_1} = 5{,}88\ \underline{|54^\circ\ 9'} \times (314 \times 10^{-3})\ \underline{|90^\circ} = 1{,}84\ \underline{|144^\circ\ 9'}\ \text{V}$$

Tensión en C_1*:*

$$V_{C_1} = \mathbf{I} \cdot X_{C_1} = 5{,}88 \angle 54^\circ\ 9' \times \left(\frac{10^6}{314 \times 750}\right) \angle -90^\circ = 24{,}93 \angle -35^\circ\ 51'\ \text{V}$$

Tensión en L_2*:*

$$V_{L_2} = I \cdot X_{L_2} = 5{,}88 \angle 54^\circ\ 9' \times (314 \times 9 \times 10^{-3}) \angle 90^\circ = 16{,}61 \angle 144^\circ\ 9'\ \text{V}$$

Tensión en C_2*:*

$$V_{C_2} = I \cdot X_{C_2} = 5{,}88 \angle 54^\circ\ 9' \times \left(\frac{10^6}{314 \times 250}\right) \angle -90^\circ = 74{,}85 \angle -35^\circ\ 51'\ \text{V}$$

Con estos datos se representará el polígono de tensiones de la figura 2.35B.

4.º *Potencia activa:*

$$P_a = V \cdot I \cdot \cos \varphi = 100 \times 5{,}88 \cdot \cos 54^\circ\ 9' = 344{,}37\ \text{W}$$

2.5.5 *Resonancia en serie*

Se dice que un circuito está en resonancia, cuando la tensión aplicada está en fase con la corriente que circula por éste.

De la definición se desprende que la componente reactiva total del circuito debe ser nula, para que la impedancia compleja se reduzca únicamente a la resistencia óhmica del circuito.

2.5.5.1 *Cálculo de la pulsación y la frecuencia de resonancia*

Sea el circuito de la figura 2.36. La impedancia total del mismo será:

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + jX$$

Como hemos dicho, a resonancia, resulta $X = 0$; luego el valor de la pulsación de resonancia (ω_o) será:

$$X = \omega_o L - \frac{1}{\omega_o C} = 0$$

$$\omega_o L = \frac{1}{\omega_o C} \Rightarrow \omega_o^2 = \frac{1}{LC}$$

$$\boxed{\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}}$$

expresión que permite calcular la pulsación de resonancia, conocidos los valores de *L* y *C*.

Recordando que $\omega = 2\pi f$, se obtendrá:

$$2\pi f_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow \boxed{f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}}$$

expresión esta última que nos permite calcular la frecuencia a la que un circuito serie *RLC* trabajará a resonancia.

Obsérvese que, para la condición de resonancia en un circuito en serie *RLC*, la impedancia del circuito es mínima, su corriente es máxima y el factor de potencia es la unidad.

2.6 Circuitos en paralelo

Las agrupaciones en derivación de los elementos pasivos básicos constituyen los circuitos en paralelo.

Para su resolución, normalmente basta con aplicar a estos circuitos la ley de Ohm generalizada y las leyes de Kirchhoff en corriente alterna. Estas son:

1.ª *En todo nudo la suma vectorial de corrientes entrantes es igual a la suma vectorial de corrientes salientes.*

2.ª *En toda malla la suma vectorial de fuerzas electromotrices es igual a la suma vectorial de caídas de tensión.*

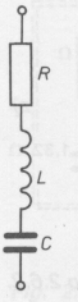


Fig. 2.36 Circuito serie RLC.

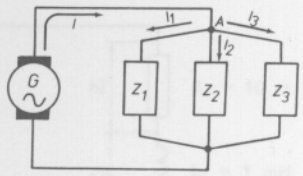


Fig. 2.37 Agrupación en paralelo de impedancias.

2.6.1 *Valor de la tensión y la corriente*

A continuación se hace un desarrollo teórico del circuito en paralelo, completando el estudio con un ejemplo práctico.

Sea el circuito de la figura 2.37. En él se ve en notación compleja:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

y también:

$$V = I_1 \cdot Z_1 + I_2 \cdot Z_2 + I_3 \cdot Z_3$$

Despejando:

$$I_1 = \frac{V}{Z_1} \; ; \; I_2 = \frac{V}{Z_2} \; ; \; I_3 = \frac{V}{Z_3}$$

y sustituyendo en la expresión de la corriente total:

$$I = \frac{V}{Z_1} + \frac{V}{Z_2} + \frac{V}{Z_3}$$

$$I = V \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right)$$

Expresión que relaciona la corriente total que circula por un circuito en paralelo con la tensión alterna aplicada al mismo.

2.6.2 *Admitancia, conductancia y susceptancia de un circuito en paralelo*

A la expresión:

$$\left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right) = Y_{eq.}$$

se le denomina *admitancia equivalente;* así se define un nuevo parámetro, llamado *admitancia,* como el inverso de la impedancia:

$$Y = \frac{1}{Z}$$

luego:

$$\boxed{Y_{eq.} = Y_t = Y_1 + Y_2 + Y_3}$$

La admitancia (parámetro complejo) está compuesta de una parte real *G* llamada *conductancia,* y otra imaginaria *B* llamada *susceptancia:*

$$Y = G + jB$$

Las relaciones que ligan los distintos parámetros de un circuito paralelo son:

$$\boxed{Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX}}$$

$$\boxed{G = \frac{R}{R^2 + X^2}}$$

$$\boxed{B = -\frac{X}{R^2 + X^2}}$$

se miden en mhos ($\mho$).

Estos conceptos se aclararán con el siguiente ejemplo práctico.

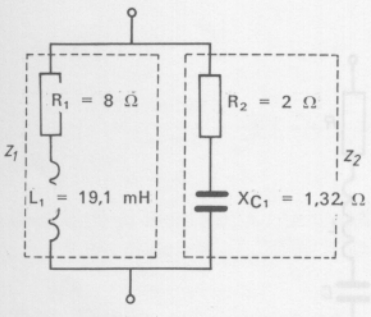


Fig. 2.38 Ejemplo del apartado 2.6.2.

Sea el circuito de la figura 2.38, que está alimentado con una tensión de 100 V/50 Hz. Hállense las caídas de tensión en los distintos componentes.

1.º *Las impedancias agrupadas por rama serán.*

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 = 8 + j6 = 10 \angle 36^\circ\ 52'\ 11''$$

$$Z_2 = R_2 - \frac{1}{\omega C_1} = 2 - j1{,}32 = 2{,}4 \angle -33^\circ\ 33'\ 48''\ \Omega$$

2.º *Las admitancias de cada rama serán.*

$$Y_1 = \frac{1}{Z_1} = \frac{1 \angle 0^\circ}{10 \angle 36^\circ\ 52'\ 11''} = 0{,}1 \angle -36^\circ\ 52'\ 11''\ \mho$$

$$Y_2 = \frac{1}{Z_2} = \frac{1 \angle 0^\circ}{2{,}4 \angle -33^\circ\ 33'\ 48''} = 0{,}41 \angle 33^\circ\ 33'\ 48''\ \mho$$

3.º *La admitancia equivalente o admitancia total será:*

$$Y_t = Y_1 + Y_2 = 0{,}1 \angle -36^\circ\ 52'\ 11'' + 0{,}44 \angle 33^\circ\ 33'\ 48''$$

$$= (0{,}08 - j0{,}06) + (0{,}341 + j0{,}226) = 0{,}421 + j0{,}166 = 0{,}452 \angle 21^\circ\ 31'\ 9''\ \mho$$

4.º *Cálculo de corrientes:*

— Corriente total:

$$I = V \cdot Y_t = 100 \angle 0^\circ \times 0{,}452 \angle 21^\circ\ 31'\ 9'' = 45{,}2 \angle 21^\circ\ 31'\ 9''\ A$$

— Corriente por la rama uno:

$$I_1 = V \cdot Y_1 = 100 \angle 0^\circ \times 0{,}1 \angle -36^\circ\ 52'\ 11'' = 10 \angle -36^\circ\ 52'\ 11''\ A$$

— Corriente por la rama dos:

$$I_2 = V \cdot Y_2 = 100 \angle 0^\circ \times 0{,}41 \angle 33^\circ\ 33'\ 48'' = 41 \angle 33^\circ\ 33'\ 48''\ A$$

Con estos datos se podrá representar el triángulo de corrientes de la figura 2.39A.

5.º *Cálculo de tensiones:*

$$V_{R1} = I_1 \cdot R_1 = 10 \angle -36^\circ\ 52'\ 11'' \times 8 \angle 0^\circ = 80 \angle -36^\circ\ 52'\ 11''\ V$$

$$V_{L1} = I_1 \cdot X_{L1} = 10 \angle -36^\circ\ 52'\ 11'' \times 6 \angle 90^\circ = 60 \angle 53^\circ\ 7'\ 49''\ V$$

$$V_{R2} = I_2 \cdot R_2 = 41 \angle 33^\circ\ 33'\ 48'' \times 2 \angle 0^\circ = 82 \angle 33^\circ\ 33'\ 48''\ V$$

$$V_{C2} = Y_2 \cdot X_{C2} = 41 \angle 33^\circ\ 33'\ 48'' \times 1{,}32 \angle -90^\circ = 54{,}12 \angle -56^\circ\ 26'\ 12''\ V$$

Con estos datos se podrá representar el polígono (en este caso dos triángulos) de tensiones (fig. 2.39B).

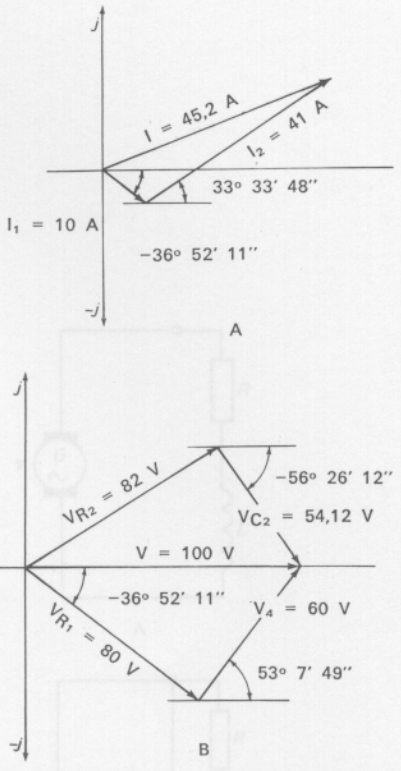


Fig. 2.39 A, *triángulo de corrientes del circuito de la figura 2.38;* B, *triángulo de tensiones del mismo circuito.*

2.6.3 *Resonancia en paralelo*

La definición de resonancia es única; por tanto, también el circuito en paralelo estará en resonancia cuando la corriente total que por él circula está en fase con la tensión aplicada.

Esto se cumplirá igualmente cuando la parte reactiva de la impedancia total sea cero, o sea, cuando sea nula la susceptancia total del circuito.

2.6.3.1 *Cálculo de la pulsación y la frecuencia de resonancia*

Sea el circuito de la figura 2.40.

Como ya se ha dicho, a resonancia, la parte compleja de la impedancia total debe ser nula; por consiguiente, la admitancia compleja también será un número real:

$$Y_t = Y_1 + Y_2 = \frac{1}{R_L + j\omega L} + \frac{1}{R_C - j\,\frac{1}{\omega C}}$$

$$= \left[\frac{R_L}{R_L^2 + (\omega L)^2} + \frac{R_C}{R_C^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}\right] + j\left[\frac{\frac{1}{\omega C}}{R_C^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} - \frac{\omega L}{R_L^2 + (\omega L)^2}\right]$$

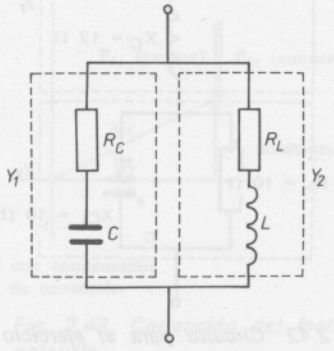


Fig. 2.40 Circuito paralelo.

Para que la admitancia compleja sea un número real:

$$\frac{\dfrac{1}{\omega_0 C}}{R_C^2 + \left(\dfrac{1}{\omega_0 C}\right)^2} - \frac{\omega_0 L}{R_L^2 + (\omega_0 L)^2} = 0$$

por consiguiente:

$$\frac{\dfrac{1}{\omega_0 C}}{R_C^2 + \left(\dfrac{1}{\omega_0 C}\right)^2} = \frac{\omega_0 L}{R_L^2 + (\omega_0 L)^2}$$

Realizando las operaciones y despejando el valor de la pulsación (ω_0) a resonancia, nos queda:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{R_L^2 - \dfrac{L}{C}}{R_C^2 - \dfrac{L}{C}}}$$

ecuación de la que fácilmente podemos deducir la frecuencia de resonancia:

$$\boxed{f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{R_L^2 - \dfrac{L}{C}}{R_C^2 - \dfrac{L}{C}}}}$$

Obsérvese que la expresión del valor de la frecuencia de resonancia de un circuito en paralelo, cuando no existen resistencias en serie con los elementos reactivos, es igual a la expresión del circuito serie.

A su vez, también el valor de la impedancia en un circuito resonante paralelo es máxima, y la corriente mínima.

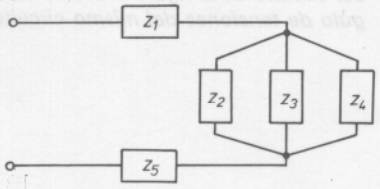


Fig. 2.41 Circuito mixto.

2.7 Circuitos mixtos

Son los formados por combinaciones serie y paralelo (fig. 2.41).

El procedimiento para su resolución es análogo al de los circuitos anteriores: primero se calculará la impedancia total, después la corriente total, para continuar con las corrientes parciales en las ramas paralelo; y, por último, las caídas de tensión en cada uno de los distintos elementos.

Ejercicio de aplicación

El circuito de la figura 2.42 está alimentado con una tensión de 100 V/50 Hz. Calcúlese la tensión en cada uno de los componentes.

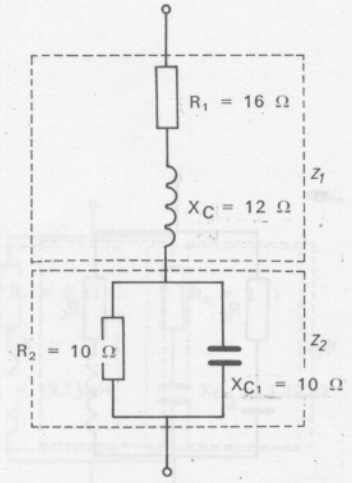


Fig. 2.42 Circuito para el ejercicio de aplicación de circuitos mixtos.

1.º *Cálculo de la impedancia total.* Una manera cómoda de calcular la impedancia es agrupando el circuito según la forma indicada en la figura 2.42.

$$Z_1 = 16 + j12 = 20 \angle 36^\circ\ 52'\ 11''\ \Omega$$

$$Y_2 = Y_{R_2} + Y_C = \frac{1}{10 + 0j} + \frac{1}{0 - j10} = 0{,}1 \angle 0^\circ + 0{,}1 \angle +90^\circ$$

$$= (0{,}1 + 0j) + (0 + j0{,}1) = 0{,}1 + j0{,}1 = 0{,}141 \angle 45^\circ\ \mho$$

$$Z_2 = \frac{1}{Y_2} = \frac{1 \angle 0^\circ}{0{,}141 \angle 45^\circ} = 7{,}07 \angle -45^\circ \simeq 5 - 5j$$

La impedancia total será (Z_1 y Z_2 están en serie):

$$Z_t = Z_1 + Z_2 = (16 + j12) + (5 - j5) = 21 + j7 = 22{,}13 \angle 18^\circ\ 26'\ 5''\ \Omega$$

2.º *Cálculo de la corriente total:*

$$I = \frac{V}{Z_t} = \frac{100 \angle 0^\circ}{22{,}13 \angle 18^\circ\ 26'\ 5''} = 4{,}51 \angle -18^\circ\ 26'\ 5''\ A$$

3.º *Cálculo de tensiones:*

$$V_{R_1} = I \cdot R_1 = 4{,}51 \ \underline{|-18^\circ\ 26'\ 5''} \times 16 \ \underline{|0^\circ} = 72{,}16 \ \underline{|-18^\circ\ 26'\ 5''}\ V$$

$$V_L = I \cdot X_L = 4{,}51 \ \underline{|-18^\circ\ 26'\ 5''} \times 12 \ \underline{|90^\circ} = 54{,}12 \ \underline{|71^\circ\ 33'\ 55''}\ V$$

$$V_{R_2} = V_C = I \cdot Z_2 = 4{,}51 \ \underline{|-18^\circ\ 26'\ 5''} \times 7{,}07 \ \underline{|-45^\circ} = 31{,}88 \ \underline{|-63^\circ\ 26'\ 5''}\ V$$

4.º *Corrientes parciales.* El cálculo de corrientes por las ramas del circuito en paralelo no representa ninguna dificultad:

$$I_{R_2} = \frac{V_{R_2}}{R_2} = \frac{31{,}88 \ \underline{|-63^\circ\ 26'\ 5''}}{10 \ \underline{|0^\circ}} = 3{,}188 \ \underline{|-63^\circ\ 26'\ 5''}\ A$$

$$I_C = \frac{V_C}{X_C} = \frac{31{,}88 \ \underline{|-63^\circ\ 26'\ 5''}}{10 \ \underline{|-90^\circ}} = 3{,}188 \ \underline{|26^\circ\ 33'\ 55''}\ A$$

Se deja como ejercicio la representación de los triángulos de tensión y corriente.

2.8 Mejora del factor de potencia

La gran mayoría de los circuitos industriales suponen cargas óhmicas inductivas, siendo algunas de ellas fuertemente inductivas (hornos de radiofrecuencia, transformadores, tubos fluorescentes, etc.).

Las compañías suministradoras de energía eléctrica suelen poner tarifas especiales a aquellos abonados cuyas instalaciones tengan un *cos* φ menor de 0,75, admitiéndose como buenos los factores de potencia comprendidos entre 0,8 y 1.

La razón del suplemento de tarifa para cos $\varphi < 0{,}75$ se explica a continuación.

La energía que miden los contadores ordinarios es la potencia activa absorbida por la instalación.

Para una misma potencia activa solicitada de la compañía suministradora, la potencia aparente absorbida será tanto mayor cuanto menor sea el factor de potencia de la instalación, con el consiguiente aumento de la corriente que circula por la línea de suministro.

Por tanto, la compañía suministradora deberá aumentar la sección de las líneas con el consiguiente encarecimiento de la instalación. De ahí el interés en limitar el valor mínimo del factor de potencia.

Al venir determinado el factor de potencia por las componentes reactivas del circuito y ser éstas en la gran mayoría de los casos de carácter inductivo, para mejorar el factor de potencia bastará con poner en *paralelo* un condensador de valor adecuado que compense el efecto inductivo (este condensador nunca estará en serie con la carga, ya que ocasionaría un aumento de la corriente, efecto que es precisamente el que se trata de evitar). Resuélvanse pruebas de evaluación 2.15 y 2.16.

El efecto de la mejora del factor de potencia sobre el triángulo de potencias, con un condensador en paralelo en un circuito inductivo, es el indicado en la figura 2.43.

2.8.1 *Cálculo del condensador de corrección del factor de potencia*

El cálculo del condensador *C* que hay que poner en paralelo con el circuito de la figura 2.43, para pasar de un factor de potencia φ_1 a otro φ_2, se realiza de la siguiente manera.

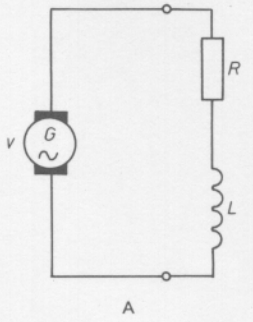
Siendo:

P_{r1} = potencia reactiva debida a la bobina y
P_{r2} = potencia reactiva debida al condensador,

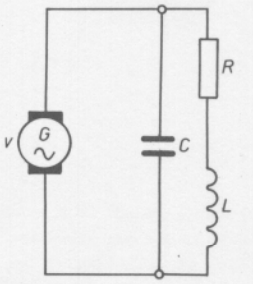
tenemos:

$$\text{tg } \varphi_1 = \frac{P_{r1}}{P_a} \Rightarrow P_a = \frac{P_{r1}}{\text{tg } \varphi_1}$$

$$\text{tg } \varphi_2 = \frac{P_{r1} - P_{r2}}{P} \Rightarrow P_a = \frac{P_{r1} - P_{r2}}{\text{tg } \varphi_2}$$

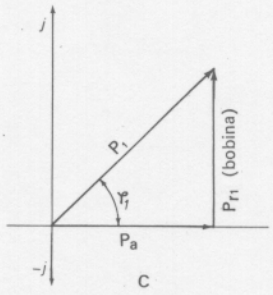


A



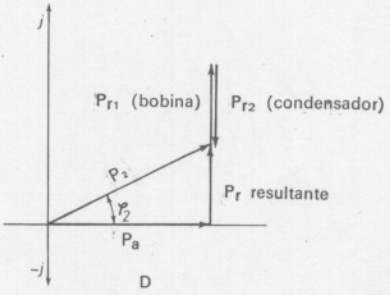
B

condensador de mejora del factor de potencia



C

sin condensador de corrección



D

con condensador de corrección

Fig. 2.43 Corrección del factor de potencia.

Igualando las dos expresiones de la potencia activa P_a:

$$\frac{P_{r1}}{\text{tg } \varphi_1} = \frac{P_{r1} - P_{r2}}{\text{tg } \varphi_2}$$

Operando:

$$P_{r1} \cdot \text{tg } \varphi_2 = (P_{r1} - P_{r2}) \cdot \text{tg } \varphi_1$$

$$P_{r1} \cdot \text{tg } \varphi_2 = P_{r1} \cdot \text{tg } \varphi_1 - P_{r2} \cdot \text{tg } \varphi_1$$

Despejando la potencia reactiva del condensador:

$$P_{r2} = \frac{P_{r1} (\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)}{\text{tg } \varphi_1}$$

Sustituyendo el valor de $\text{tg } \varphi_1 = \frac{P_{r1}}{P_a}$, queda:

$$P_{r2} = \frac{P_{r1} (\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)}{\frac{P_{r1}}{P_a}} = P_a (\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)$$

Al ser:

$$P_{r2} = \frac{V^2}{X_C} = \frac{V^2}{\frac{1}{\omega C}} = V^2 \omega C$$

y sustituirlo en la ecuación anterior, queda:

$$\boxed{V^2 \omega C = P_a (\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)}$$

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Constrúyase una tabla resumen de las distintas posibilidades del circuito en serie, donde aparezca la expresión de la impedancia en todas sus formas, su módulo, argumento y representación geométrica (triángulo de impedancias). Igualmente los valores instantáneos máximos y eficaces de corriente, junto con el ángulo de fase que forma respecto de la tensión. Se expresarán también en la tabla los triángulos de tensiones y potencias.

— Previa consulta bibliográfica, realícese un trabajo sobre la utilidad de los circuitos resonantes en serie y en paralelo.

CUESTIONARIO

2.1 Exprésense de todas las formas posibles los siguientes complejos: 5 − j3; 6 (cos 60° − j sen 60°); $\sqrt{2}\ \underline{|30°}$; 2 $e^{j\,60}$.

2.2 Realícese la suma, resta, producto y cociente de los siguientes pares de complejos:

a) (5 + 5j) (2 − 3j)

b) $\sqrt{3}\ \underline{|10°}$ 2 (cos 45° − j sen 45°)

c) $e^{-j\,60}$ (5 − 2j)

2.3 ¿Cuál será el valor de la potencia activa consumida por un circuito que tiene un factor de potencia de 0,5?

2.4 ¿Cuáles son las unidades de los tres tipos de potencia?

2.5 ¿Qué dice la ley de Lenz?

2.6 ¿Qué conclusiones se sacan del estudio matemático efectuado en la bobina? ¿Y en el condensador?

2.7 Se dispone de un circuito *RLC* en serie y, después de efectuar las medidas correspondientes, se ve que el factor de potencia es la unidad. ¿Qué ha sucedido? ¿Es esto posible? Razónese la respuesta.

2.8 En un circuito resonante paralelo *LC* ideal, ¿por qué la impedancia (teóricamente) es infinita?

2.9 En el circuito de la figura 2.15, V = 537,4 sen 314 t V; R = 10 Ω y L = $\frac{1}{31,4}$ H. Cálculense: el desfase entre *V* e *I*, el triángulo de impedancias y el triángulo de potencias del circuito.

2.10 En el circuito de la figura 2.22, V = 176,77 sen 314 t; R = 5 Ω y C = 1/314 μF. Calcúlense: el valor eficaz de la corriente que atraviesa el circuito y el triángulo de tensiones.

2.11 En el circuito de la figura 2.29, V = 1 000 V (tensión eficaz suministrada por el generador) 50 Hz; R = 100 Ω; L = $10^{-2}/\pi$ H y X_C = 50 Ω. Calcúlense: el triángulo de impedancias, el de tensiones y el de potencias.

2.12 Los valores de las impedancias del circuito de la figura 2.41 son: $Z_1 = 2 + j5$; $Z_2 = 1 + j$; $Z_3 = 1 - j$; $Z_4 = 2 - 3j$; $Z_5 = 6 + 2j$. Calcúlense los valores de los polígonos de corrientes y de tensiones de dicho circuito, si está alimentado a 100 V/50 Hz. ¿Se podría sustituir este circuito por la adecuada combinación de dos elementos pasivos solamente? ¿Cuáles serían éstos?

2.13 Un circuito en serie *RLC* resuena a 1 000 Hz si R = 10 Ω y L = 1 H. ¿Cuál es el valor de *C*?

2.14 Si en la figura 2.40, C = 10 μF; L = 1 H; R_C = 1 Ω y R_L = 2 Ω, ¿cuál es la frecuencia de resonancia?

2.15 Se dispone de un circuito óhmico inductivo cuya impedancia tiene un valor de 2 + 10j. Este circuito está alimentado a 380 V/50 Hz, y se quiere mejorar su factor de potencia a 0,9. Calcúlese el condensador necesario.

2.16 Por error de conexión, el condensador calculado en el circuito anterior se ha dispuesto en serie con el circuito. Calcúlese la nueva situación de éste (corriente que circula, potencia activa desarrollada y factor de potencia).

BIBLIOGRAFIA

VON BEEREN H. y TEUCHERT H., *Fundamentos de Electrotecnia,* Editorial Labor, S. A., Barcelona 1964.

MARTIN A., *Tecnología Electrónica/2,* Bruño-Ediciones Don Bosco, Barcelona 1976.

MOMPIN J., *Electrotecnia. Teoría y Problemas,* OTI-EPS, Barcelona.

Tema 3. Corrientes polifásicas

OBJETIVOS

— *Conocer el origen de las fuerzas electromotrices polifásicas.*
— *Estudiar los sistemas bifásico y trifásico de fuerzas electromotrices en cuanto a tensiones, corrientes y potencias se refiere.*

GUION

— Introducción.
— Sistemas polifásicos de fuerzas electromotrices.
— El sistema bifásico.
— El sistema trifásico.
— Transformaciones triángulo a estrella y estrella a triángulo.

PUNTOS CLAVE

— Generación de fuerzas electromotrices polifásicas.
— Conocimiento de las distintas situaciones que provocan las diferentes conexiones de la carga en sistemas trifásicos.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Operaciones con vectores.

EXPOSICION DEL TEMA

3.1 Introducción

Hasta este tema el estudio se ha referido a una sola corriente alterna, llamada también *corriente alterna monofásica.*

En la práctica resulta más interesante el uso simultáneo de varias corrientes monofásicas de iguales valores eficaces y frecuencia, pero de distinta fase, dando lugar así al sistema *polifásico de corrientes alternas.*

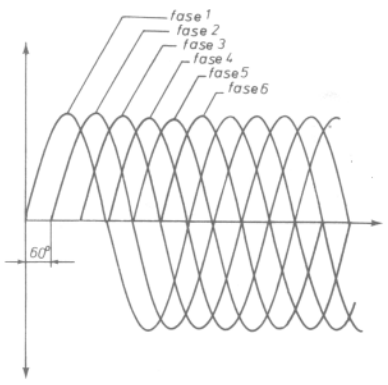


Fig. 3.1 Representación cartesiana de un sistema hexafásico.

3.2 Sistemas polifásicos de fuerzas electromotrices

Recibe el nombre de *sistema polifásico de corrientes* el conjunto formado por varias corrientes alternas monofásicas, de igual frecuencia y valor eficaz, y que están desfasadas entre sí un ángulo eléctrico igual a 360° dividido por el número de fases.

Se denomina *fase* a cada una de las corrientes monofásicas que forman el sistema.

Por excepción, recibe el nombre de sistema *bifásico* el sistema formado por dos fuerzas electromotrices alternas monofásicas desfasadas entre sí 90° eléctricos (y no 180°, como se podía suponer atendiendo a la definición anterior).

Pese a que eléctricamente no hay limitación sobre el número de fases de un sistema polifásico, el más utilizado es el trifásico, por sus grandes ventajas: facilidad de transporte de la energía, extrema sencillez de algunas máquinas alimentadas por este sistema (motores asíncronos trifásicos), etc.

También, aunque con mucha menos profusión, son utilizados los sistemas hexafásicos y dodecafásicos, sobre todo para la obtención de corrientes continuas rectificadas.

La representación cartesiana de un sistema polifásico de corrientes consiste en un número de senoides igual al de fases del sistema, desfasadas un ángulo igual al característico del sistema (fig. 3.1).

La representación vectorial se realiza trazando una estrella de tantos vectores iguales como fases tenga el sistema, formando cada dos vectores consecutivos un ángulo igual al característico del sistema (fig. 3.2).

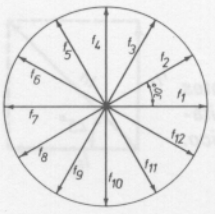


Fig. 3.2 Representación vectorial de un sistema dodecafásico.

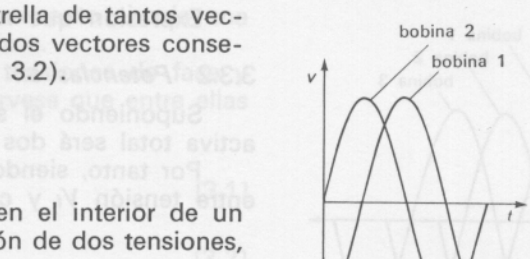
3.3 Sistema bifásico de fuerzas electromotrices

La rotación de dos bobinas perpendiculares entre sí en el interior de un campo magnético constante (fig. 3.3) da lugar a la inducción de dos tensiones, una en cada bobina, desfasada entre sí 90° eléctricos.

Obsérvese que cuando en la bobina 1 la inducción es máxima (valor máximo de fuerza electromotriz inducida), en la bobina 2 la inducción es mínima (valor cero de fuerza electromotriz inducida); sin embargo, cuando las bobinas (rotor de la máquina) hayan girado 90°, la situación será contraria a la anterior: en la bobina 1 la fuerza electromotriz inducida será nula y en la bobina 2 será máxima (fig. 3.4).

La figura 3.5 representa esquemáticamente los bobinados del alternador elemental de la figura 3.3, cuyos principios son *U* y *V*, y los finales *X* e *Y*. En la práctica, los finales *X* e *Y* se presentan unidos, quedando a la salida de la máquina sólo tres terminales: un *hilo neutro* (o común), que parte de la unión de los finales *X* e *Y*; y dos *hilos de línea,* que parten de los principios *U* y *V*.

Se verá ahora cómo están relacionadas las tensiones y corrientes en un sistema bifásico de tres hilos.



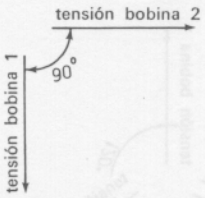


Fig. 3.4 Representación cartesiana y vectorial de las tensiones inducidas en la máquina de la figura 3.3.

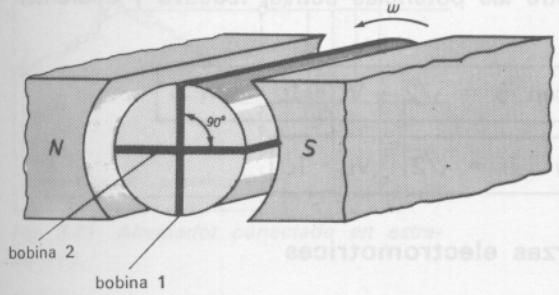


Fig. 3.3 Alternador bifásico elemental.

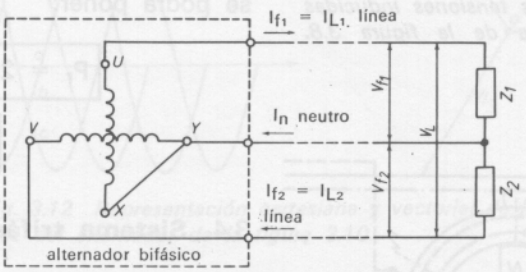


Fig. 3.5 Sistema bifásico a tres hilos.

3.3.1 *Tensiones y corrientes en un sistema bifásico (de tres hilos)*

Existen dos definiciones válidas para todos los sistemas polifásicos:

— Se denomina *tensión de línea* o *tensión compuesta* (V_L) a la diferencia de potencial existente entre dos hilos de línea.

— Se denomina *tensión de fase* o *tensión simple* (V_f) a la diferencia de potencial existente entre un hilo de línea y el hilo neutro.

Para calcular la tensión compuesta existente en un sistema bifásico, bastará con hallar la suma geométrica de las tensiones producidas por cada una de las fases (fig. 3.6):

$$V_L = \sqrt{V_{f_1}^2 + V_{f_2}^2}$$

Al ser $V_{f_1} = V_{f_2} = V_f$, podemos poner:

$$\boxed{V_L = \sqrt{2\ V_f^2} = \sqrt{2}\ V_f}$$

Esta exposición relaciona las tensiones simples y compuestas de un sistema bifásico.

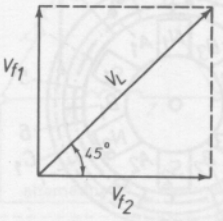


Fig. 3.6 Tensiones en un sistema bifásico.

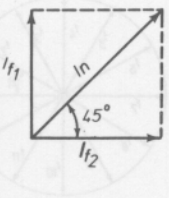


Fig. 3.7 Corrientes en un sistema bifásico.

La intensidad que circula por el hilo neutro es también en todo momento la suma geométrica de las corrientes que circulan por los hilos de línea. Suponiendo igual carga para las dos fases ($Z_1 = Z_2$), se tendrá (fig. 3.7):

$$I_n = \sqrt{I_{f_1}^2 + I_{f_2}^2}$$

Por ser iguales las cargas, $I_{f_1} = I_{f_2} = I_f$; por tanto:

$$\boxed{I_n = \sqrt{2\ I_f^2} = \sqrt{2}\ I_f}$$

Expresión que relaciona la corriente del neutro con la de línea.

3.3.2 *Potencias en un sistema bifásico*

Suponiendo el sistema equilibrado (las cargas son iguales), la potencia activa total será dos veces la potencia activa disipada en una fase.

Por tanto, siendo φ el factor de potencia de la carga (ángulo de desfase entre tensión V_f y corriente I_f), tendremos:

$$P_a = 2\ V_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

Pero al ser:

$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{2}} \text{ e } I_f = I_L$$

podemos poner:

$$P_a = 2 \cdot \frac{V_L}{\sqrt{2}} \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

Y simplificando:

$$P_a = \sqrt{2} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

Recordando las relaciones entre las potencias activa, reactiva y aparente, se podrá poner:

$$\boxed{P_r = 2 \cdot V_f \cdot I_f \cdot \text{sen } \varphi = \sqrt{2} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \text{sen } \varphi}$$

$$\boxed{P = 2 \cdot V_f \cdot I_f = \sqrt{2} \cdot V_L \cdot I_L}$$

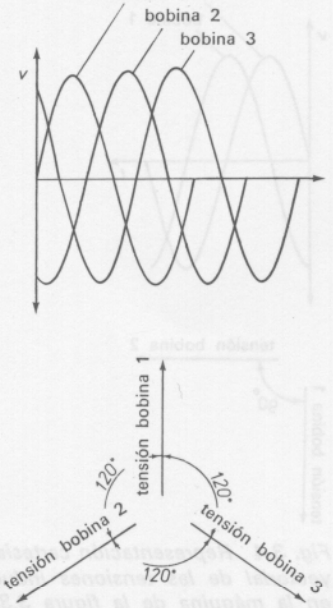


Fig. 3.9 Representación cartesiana y vectorial de las tensiones inducidas en la máquina de la figura 3.8.

3.4 Sistema trifásico de fuerzas electromotrices

La rotación de tres bobinas igualmente espaciadas (fig. 3.8) en el interior de un campo magnético constante proporciona tres fuerzas electromotrices inducidas, desfasadas entre sí 120° eléctricos.

La figura 3.9 representa el sistema de fuerza electromotriz que generaría el alternador trifásico elemental de la figura 3.8.

En la realidad los alternadores son muy distintos: el rotor es el inductor y está formado por uno o varios sistemas polares norte-sur (fig. 3.10).

El estator (parte fija) es el inducido y está formado por tres paquetes de bobinas bien diferenciadas, cuyos principios se indican con las letras *U*, *V* y *W*; y sus finales, por *X*, *Y* y *Z* respectivamente.

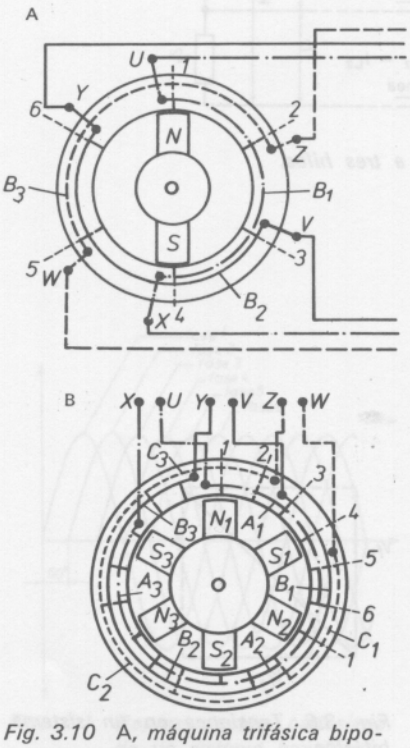


Fig. 3.10 A, *máquina trifásica bipolar;* B, *máquina trifásica hexapolar.*

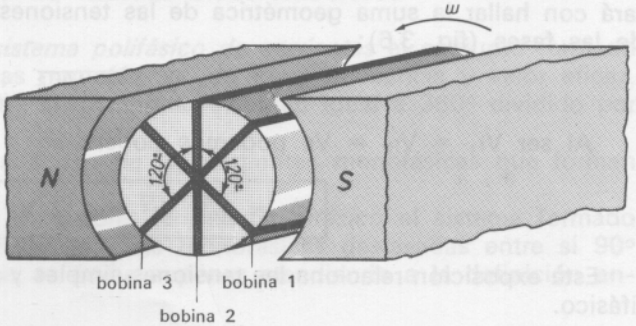


Fig. 3.8 Alternador trifásico elemental.

3.4.1 *Conexionado de las bobinas de un alternador trifásico*

Los tres bobinados de un alternador trifásico pueden conectarse de dos modos distintos: conexión en *estrella* y conexión en *triángulo;* de forma que, a la salida de la máquina, sólo existen tres o, a lo sumo, cuatro terminales.

3.4.1.1 *Conexión del alternador en estrella (Y)*

Consiste en unir los finales *U*, *V* y *W* de las tres bobinas formando un punto común, denominado *punto neutro,* dejando libres los tres principios *X*, *Y* y *Z*.

Del punto común suele sacarse un hilo conductor, denominado *hilo neutro,* que en ocasiones puede suprimirse, por el que en todo momento circula una corriente igual a la suma vectorial de las corrientes de fase.

La figura 3.11 muestra las distintas posibilidades de tensiones de fase y línea en un alternador trifásico conectado en estrella. Obsérvese que entre ellas existen las siguientes relaciones:

$$|V_{L1}| = |V_{L2}| = |V_{L3}| \qquad [3.1]$$

$$v_{L1} + v_{L2} + v_{L3} = 0 \qquad [3.2]$$

$$|V_{f1}| = |V_{f2}| = |V_{f3}| \qquad [3.3]$$

$$v_{f1} + v_{f2} + v_{f3} = 0 \qquad [3.4]$$

Las igualdades [3.3] y [3.4], se deducen inmediatamente de la representación cartesiana o vectorial de la figura 3.12. Las igualdades [3.1] y [3.2] se demostrarán en párrafos posteriores.

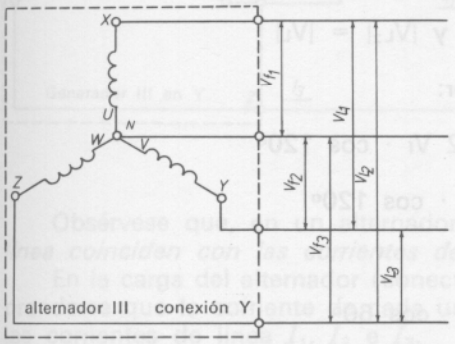


Fig. 3.11 Alternador conectado en estrella (Y).

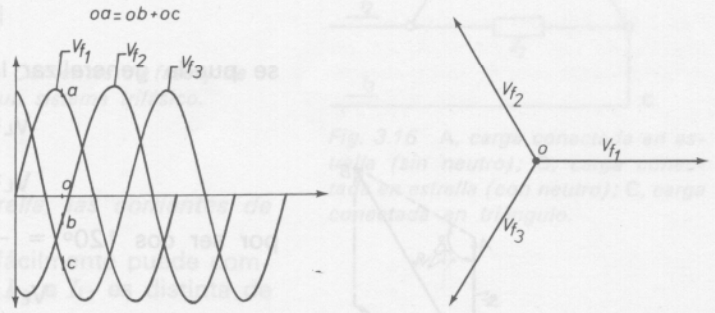


Fig. 3.12 Representación cartesiana y vectorial de las tensiones de fase del alternador de la figura 3.10.

3.4.1.2 *Conexión del alternador en triángulo (Δ)*

Consiste en unir el principio de una fase con el final de la siguiente, repitiendo la operación cíclicamente hasta obtener un sistema cerrado (fig. 3.13).

En este caso la tensión de fase es igual a la tensión de línea.

Así se verificará que:

$$|V_{L1}| = |V_{L2}| = |V_{L3}|$$

y que:

$$v_{L1} + v_{L2} + v_{L3} = 0$$

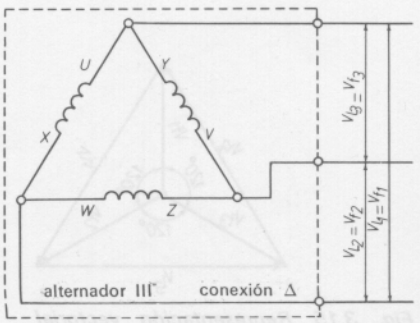


Fig. 3.13 Alternador conectado en triángulo (Δ).

3.4.2 *Tensiones y corrientes en un sistema trifásico*

— *Tensiones de un sistema trifásico en estrella con neutro* (fig. 3.11).

En este sistema en el que, al igual que en el bifásico a tres hilos, se dispone de dos tipos de tensiones (de fase y de línea), se efectúa el cálculo de éstas por el procedimiento de la suma vectorial en la representación de Fresnel.

Observando la figura 3.11, se deduce que:

$$\vec{V}_{XY} = \vec{V}_{XN} + \vec{V}_{NY} = \vec{V}_{XN} - \vec{V}_{YN} \qquad [3.5]$$

Pero al ser:

$$V_{XY} = V_{L_1}$$

$$V_{XN} = V_{f_1}$$

$$V_{NY} = V_{f_2}$$

$$|V_{f_1}| = |V_{f_2}| = |V_{f_3}| = |V_f|$$

$$|V_{L_1}| = |V_{L_2}| = |V_{L_3}| = |V_L|$$

La igualdad [3.5] se transforma en:

$$\vec{V}_{L_1} = \vec{V}_{f_1} - \vec{V}_{f_2}$$

Y generalizando:

$$\boxed{\vec{V}_L = \vec{V}_f - \vec{V}_f}$$

expresión que indica que la tensión de línea es igual a la diferencia geométrica de las tensiones de fase que la producen.

El cálculo matemático del valor del módulo de la tensión en línea, en función de las tensiones de fase, es el siguiente (fig. 3.14).

Aplicando el teorema del coseno al triángulo *OAB*, se obtiene:

$$V_{L_2}^2 = V_{f_1}^2 + V_{f_3}^2 - 2\, V_{f_1} \cdot V_{f_3} \cdot \cos 120^\circ$$

Al ser:

$$|V_{f_1}| = |V_{f_3}| = |V_f| \text{ y } |V_{L_2}| = |V_L|$$

se puede generalizar la expresión anterior:

$$V_L^2 = V_f^2 + V_f^2 - 2\, V_f \cdot \cos 120^\circ$$

$$V_L^2 = 2\, V_f^2 - 2\, V_f \cdot \cos 120^\circ$$

por ser $\cos 120^\circ = -\cos 60^\circ$:

$$V_L^2 = 2\, V_f^2 + 2\, V_f^2 \cdot \cos 60^\circ$$

$$V_L^2 = 2\, V_f^2 + 2\, V_f^2 \cdot \left(\frac{1}{2}\right) = 3\, V_f^2$$

$$\boxed{V_L = \sqrt{3}\, V_f}$$

Expresión que liga la tensión de línea, o compuesta, con la tensión de fase, o simple, en un sistema trifásico.

La representación de las tres tensiones simples y las tres compuestas puede hacerse también mediante el diagrama de la figura 3.15.

Evidentemente, en un sistema de distribución con alternador conectado en estrella, sin neutro, solamente existirán las tensiones de línea.

— *Tensión en un sistema trifásico en triángulo* (fig. 3.13).

En este caso, como ya se ha dicho, la tensión de fase es igual a la de línea; por tanto:

$$\boxed{V_L = V_f}$$

3.4.2.1 *La carga en un sistema trifásico*

Aunque la carga de los sistemas trifásicos se estudia detenidamente en los apartados 3.5.1 y siguientes, téngase en cuenta que está constituida por tres impedancias que, a su vez, podrán ir conectadas en estrella o en triángulo, según convenga (fig. 3.16).

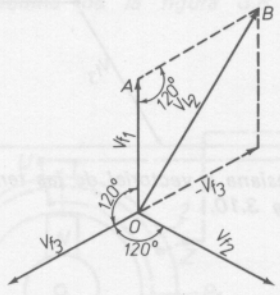


Fig. 3.14 Cálculo de la tensión de línea en un sistema trifásico en estrella.

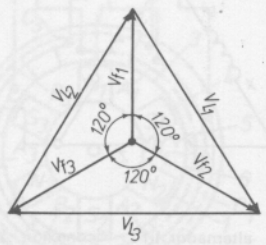


Fig. 3.15 Representación vectorial de las tensiones de un sistema trifásico en estrella.

Nótese que, en el caso de conectar la carga en estrella, el neutro (punto común) podrá unirse al neutro del generador si éste tiene el hilo neutro, cosa que normalmente sucede.

Lógicamente, la naturaleza de la carga puede ser cualquiera: óhmica, óhmico-inductiva, óhmico-inductivo-capacitiva. Igualmente, las impedancias de la carga pueden ser iguales o distintas, dando lugar a sistemas trifásicos *equilibrados* o *desequilibrados* respectivamente.

En la práctica las instalaciones trifásicas suelen ser desequilibradas.

3.4.3 *Corrientes de fase y corrientes de línea en un sistema trifásico*

Recuérdense dos definiciones válidas para todos los sistemas polifásicos:

— Se denomina *corriente de fase* aquélla que recorre una fase de un sistema polifásico.

— Se define *corriente de línea* aquélla que, saliendo de los bornes principales de un alternador, entra en los bornes de una carga.

Considérese un alternador trifásico (fig. 3.17), cuyos bobinados están conectados en estrella, que alimenta una carga trifásica conectada en triángulo. Según las definiciones anteriores, I_1, I_2 e I_3 serán las corrientes de línea; I_{f1}, I_{f2} e I_{f3}, las corrientes de fase en la carga; e I_a, I_b e I_c, las corrientes de fase del alternador.

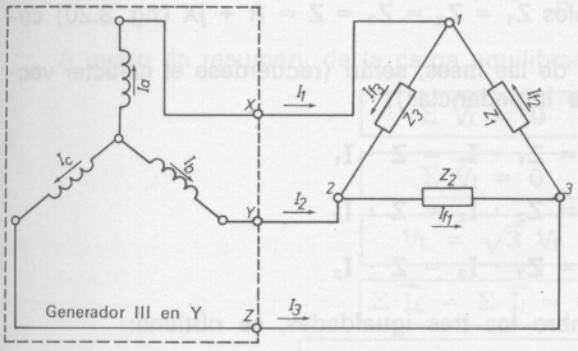


Fig. 3.17 Corrientes de fase y de línea en un sistema trifásico.

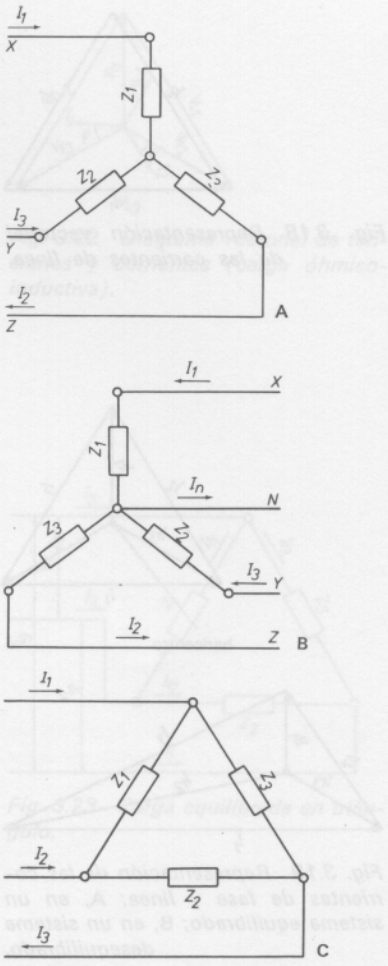


Fig. 3.16 A, *carga conectada en estrella (sin neutro);* B, *carga conectada en estrella (con neutro);* C, *carga conectada en triángulo.*

Obsérvese que, en un alternador *conectado en estrella, las corrientes de línea coinciden con las corrientes de fase.*

En la carga del alternador (conectada en triángulo), fácilmente puede comprenderse que la corriente de cada una de las fases I_{f1}, I_{f2} e I_{f3} es distinta de las corrientes de línea I_1, I_2 e I_3.

Para el cálculo de las corrientes de línea en función de las corrientes de fase en una carga conectada en triángulo, se puede proceder de la siguiente forma:

Asígnese un sentido arbitrario a cada una de las corrientes de línea y fase (fig. 3.17); aplicando la primera ley de Kirchhoff a los nudos 1, 2 y 3, se obtiene:

Nudo 1:

$$I_1 + I_{f2} = I_{f3} \Rightarrow I_1 = I_{f3} - I_{f2}$$

Nudo 2:

$$I_2 + I_{f3} = I_{f1} \Rightarrow I_2 = I_{f1} - I_{f3}$$

Nudo 3:

$$I_3 + I_{f1} = I_{f2} \Rightarrow I_3 = I_{f2} - I_{f1}$$

quedando un sistema de tres ecuaciones, con el que se resuelve el problema.

Si las tres ecuaciones anteriores se suman miembro a miembro, se obtiene:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

y expresando la igualdad en corrientes instantáneas:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

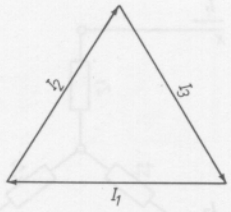


Fig. 3.18 Representación vectorial de las corrientes de línea.

deduciendo así la condición fundamental para las corrientes de línea cuando el sistema es de tres hilos: *En todo momento, la suma vectorial de las corrientes de línea debe ser nula.* Por tanto, las tres corrientes podrán ser representadas por un triángulo cerrado (fig. 3.18).

Quede como conclusión que las tres corrientes de fase se pueden representar por una terna de vectores (en estrella) procedentes de un punto común (neutro), y cuyos extremos se apoyan en los vértices del triángulo que representa las corrientes de línea. Si la carga es equilibrada, el centro de la estrella coincidirá con el baricentro del triángulo (fig. 3.19A); en caso contrario, el centro de la estrella no coincidirá con el baricentro (fig. 3.19B).

Obsérvese que cualquiera de los dos triángulos de la figura 3.19 pueden deducirse de las ecuaciones de los nudos 1, 2 y 3.

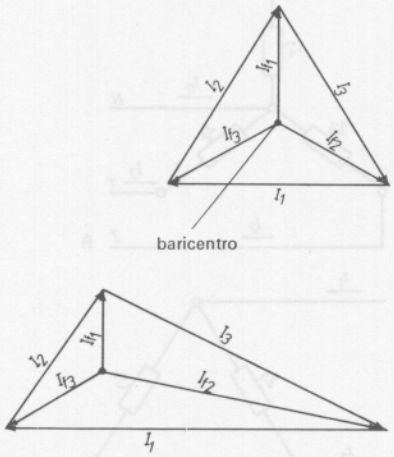


Fig. 3.19 Representación de las corrientes de fase y línea: A, en un sistema equilibrado; B, en un sistema desequilibrado.

3.5 Proceso de cálculo de los sistemas trifásicos

Se van a estudiar, a continuación, las distintas situaciones que plantea la conexión de diferentes cargas a los sistemas de distribución trifásicos.

3.5.1 *Carga equilibrada en conexión estrella (Y)*

Considérese un sistema trifásico simétrico, que alimenta a una carga formada por tres impedancias iguales $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z = R + jX$ (fig. 3.20) conectadas en estrella.

Las tensiones, en cada una de las fases, serán (recuérdese el carácter vectorial de tensiones, corrientes e impedancias):

$$V_{f1} = Z_1 \cdot I_1 = Z \cdot I_1$$

$$V_{f2} = Z_2 \cdot I_2 = Z \cdot I_2$$

$$V_{f3} = Z_3 \cdot I_3 = Z \cdot I_3$$

Sumando miembro a miembro las tres igualdades, se obtiene:

$$V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} = Z\,(I_1 + I_2 + I_3)$$

Recordando que:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

y al ser $Z \neq 0$, necesariamente:

$$\boxed{V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} = 0}$$

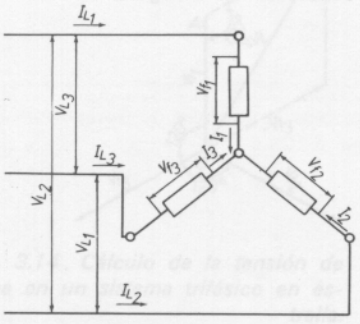


Fig. 3.20 Carga equilibrada en estrella.

Ecuación que demuestra que, al tener una carga formada por tres impedancias iguales conectadas en estrella, los vectores representativos de las tensiones de fase tienen resultante nula.

Este es el motivo por el cual la terna de vectores saldrá del baricentro del triángulo de tensiones de línea (fig. 3.21).

Asimismo, del sistema de tres ecuaciones anterior y por simple transposición de términos, se obtiene:

$$I_1 = \frac{V_{f1}}{Z} \; ; \; I_2 = \frac{V_{f2}}{Z} \; ; \; I_3 = \frac{V_{f3}}{Z}$$

y al ser:

$$|I_{L1}| = |I_{f1}| = |I_1|$$

$$|I_{L2}| = |I_{f2}| = |I_2|$$

$$|I_{L3}| = |I_{f3}| = |I_3|$$

$$|V_{L1}| = |V_{L2}| = |V_{L3}| = |V_L|$$

$$|V_{f1}| = |V_{f2}| = |V_{f3}| = |V_f| = \frac{|V_L|}{\sqrt{3}}$$

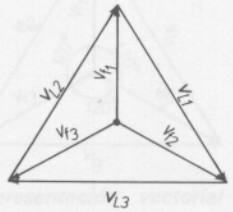


Fig. 3.21 Representación vectorial de tensiones.

se puede poner:

$$I_1 = \frac{V_{f1}}{Z} = I_L = \frac{V_f}{Z} = \frac{V_L}{\sqrt{3}\,Z}$$

$$I_2 = \frac{V_{f2}}{Z} = I_L = \frac{V_f}{Z} = \frac{V_L}{\sqrt{3}\,Z}$$

$$I_3 = \frac{V_{f3}}{Z} = I_L = \frac{V_f}{Z} = \frac{V_L}{\sqrt{3}\,Z}$$

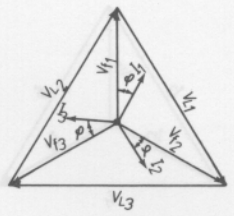


Fig. 3.22 Diagrama vectorial de tensiones y corrientes (carga óhmico-inductiva).

Expresiones que indican que el valor de la corriente de fase de un sistema trifásico en estrella es igual al valor de la corriente de línea e igual, a su vez, a la tensión de línea dividida por $\sqrt{3}$ veces la impedancia de una rama cualquiera.

El diagrama vectorial de tensiones y corrientes podría ser el representado en la figura 3.22, en el que se ha supuesto la carga $Z = R + jX$, óhmico-inductiva. Entonces, lógicamente, la corriente irá retrasada un cierto ángulo φ con respecto a la tensión.

El ángulo de desfase se calculará por el procedimiento ya conocido de:

$$\varphi = \text{arc tg}\ \frac{X}{R}$$

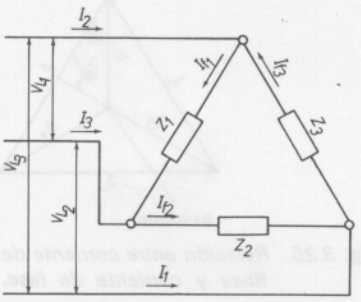


Fig. 3.23 Carga equilibrada en triángulo.

A modo de resumen, de la carga equilibrada en estrella cabe poner:

$$\Sigma\ \vec{V_L} = 0$$

$$\Sigma\ \vec{V_f} = 0$$

$$V_L = \sqrt{3}\ V_f$$

$$\Sigma\ \vec{I_L} = \Sigma\ \vec{I_f} = 0$$

$$I_L = \frac{V_f}{Z} = \frac{V_L}{\sqrt{3}\,Z} = I$$

$$\varphi = \text{arc tg}\ \frac{X}{R}$$

3.5.2 *Carga equilibrada en conexión triángulo (Δ)*

Un sistema trifásico simétrico alimenta una carga formada por tres impedancias iguales: $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z = R + jX$ (fig. 3.23), conectadas en triángulo.

Las corrientes en cada una de las fases serán:

$$I_{f1} = \frac{V_{L1}}{Z_1} = \frac{V_{L1}}{Z}$$

$$I_{f2} = \frac{V_{L2}}{Z_2} = \frac{V_{L2}}{Z}$$

$$I_{f3} = \frac{V_{L3}}{Z_3} = \frac{V_{L3}}{Z}$$

Sumando miembro a miembro las tres igualdades, resulta:

$$I_{f1} + I_{f2} + I_{f3} = \frac{1}{Z}\ (V_{L1} + V_{L2} + V_{L3})$$

Recordando que:

$$V_{L1} + V_{L2} + V_{L3} = 0$$

y al ser $\frac{1}{Z} \neq 0$, necesariamente:

$$I_{f1} + I_{f2} + I_{f3} = 0$$

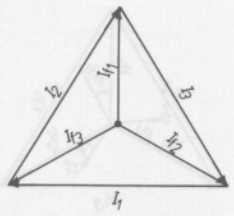


Fig. 3.24 Representación vectorial de corrientes.

Esta ecuación demuestra que, al tener una carga formada por tres impedancias iguales conectadas en triángulo, la suma vectorial de las corrientes de fase es nula.

Este es el motivo por el que los vectores representativos de estas tres corrientes forman una estrella que arranca del baricentro del triángulo de las corrientes de línea (fig. 3.24).

$$|V_{L1}| = |V_{L2}| = |V_{L3}| = |V_L|$$

$$|I_1| = |I_2| = |I_3| = |I_L|$$

$$|I_{f1}| = |I_{f2}| = |I_{f3}| = |I_f|$$

se puede poner:

$$I_f = \frac{V_f}{Z} = \frac{V_L}{Z}$$

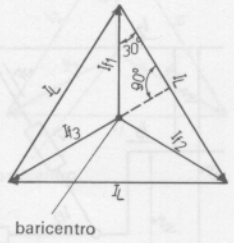


Fig. 3.25 Relación entre corriente de línea y corriente de fase.

El cálculo de la corriente de línea, en función de la corriente de fase, cabe hacerlo con ayuda de la figura 3.25. En ella resulta que:

$$I_L/2 = I_f \cdot \cos 30^\circ$$

Por tanto:

$$I_L = 2 \cdot I_f \cdot \cos 30^\circ = 2 \cdot I_f \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\boxed{I_L = \sqrt{3} \cdot I_f}$$

El diagrama vectorial de tensiones y corrientes podría ser el representado en la figura 3.26, en el que se ha supuesto la carga Z = R + jX, óhmico-capacitiva. Evidentemente, la tensión irá retrasada un cierto ángulo φ con respecto a la corriente.

El ángulo de desfase se calculará por el procedimiento ya conocido de:

$$\varphi = \text{arc tg} \frac{X}{R}$$

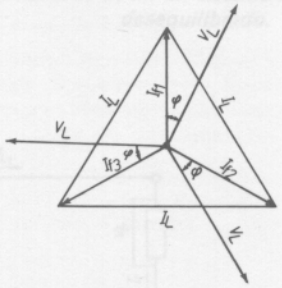


Fig. 3.26 Diagrama vectorial de tensiones y corrientes (carga óhmico-capacitiva).

A modo de resumen, de la carga equilibrada en triángulo se puede poner:

$$\boxed{\Sigma \vec{V}_L = 0}$$

$$\boxed{\Sigma \vec{V}_f = 0}$$

$$\boxed{\Sigma \vec{I}_L = 0}$$

$$\boxed{\Sigma \vec{I}_f = 0}$$

$$\boxed{V_L = V_f}$$

$$\boxed{I_f = \frac{V_f}{Z} = \frac{V_L}{Z} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}}$$

$$\boxed{\varphi = \text{arc tg} \frac{X}{R}}$$

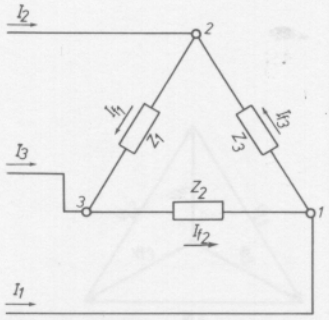


Fig. 3.27 Carga desequilibrada en triángulo.

3.5.3 *Carga desequilibrada en conexión triángulo (Δ)*

Para el análisis de este circuito (fig. 3.27), hay que partir del supuesto de que el sistema trifásico es simétrico ($|V_{L1}| = |V_{L2}| = |V_{L3}| = |V_L|$).

Esta situación suele darse en la gran mayoría de los casos.

Al ser desequilibrada la carga:

$$Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2$$

$$Z_3 = R_3 + jX_3$$

Las intensidades de fase serán (recuérdese que $V_f = V_L$):

$$I_{f1} = \frac{V_L}{Z_1}$$

$$I_{f2} = \frac{V_L}{Z_2}$$

$$I_{f3} = \frac{V_L}{Z_3}$$

siendo los desfases respectivos respecto de las tensiones de fase:

$$\varphi_1 = \text{arc tg } \frac{X_1}{R_1}$$

$$\varphi_2 = \text{arc tg } \frac{X_2}{R_2}$$

$$\varphi_3 = \text{arc tg } \frac{X_3}{R_3}$$

El diagrama vectorial tensión-corriente resultaría una figura parecida a la 3.28, en la que se da por supuesto que todas las cargas eran óhmicas-inductivas.

La forma de calcular analíticamente las distintas corrientes de línea sería aplicar la primera ley de Kirchhoff a los nudos 1, 2 y 3 (fig. 3.27):

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_{f3} - \vec{I}_{f2}$$

$$\vec{I}_2 = \vec{I}_{f1} - \vec{I}_{f3}$$

$$\vec{I}_3 = \vec{I}_{f2} - \vec{I}_{f1}$$

Obsérvese que este circuito representa una notable complicación respecto al circuito equilibrado, puesto que aquí las corrientes de fase son distintas y además tienen distintos ángulos de fase (fig. 3.28).

Naturalmente, las tres corrientes de línea serán siempre representables por tres vectores que forman un triángulo, no equilátero esta vez (el sistema es desequilibrado precisamente en corrientes), mientras la terna de las corrientes de fase tendrá su centro en un punto que no coincidirá con el baricentro del triángulo. La figura 3.29 muestra un ejemplo de representación vectorial de corrientes en una carga desequilibrada conectada en triángulo.

3.5.4 *Carga desequilibrada en conexión estrella (sin neutro)*

Este circuito (fig. 3.30) supone mayores complicaciones de cálculo que el anterior (carga desequilibrada en triángulo); ello es debido a que no se conocen las tensiones en cada una de sus fases. De la terna de tensiones de fase sólo se sabe que su centro no coincide con el baricentro del triángulo de tensiones de línea.

La forma más fácil de resolver el problema consiste en la transformación *estrella-triángulo* siempre posible (en el apartado 3.8 se verá la justificación de esta transformación), de forma que la carga equivalente quedará formada por tres impedancias desiguales pero *conectadas en triángulo* (fig. 3.31).

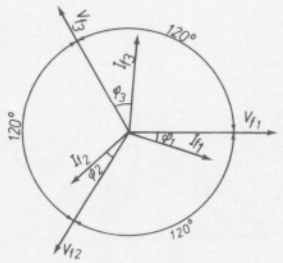


Fig. 3.28 Diagrama vectorial de corrientes y tensiones (supuestas todas las impedancias óhmico-inductivas).

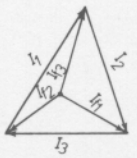


Fig. 3.29 Representación vectorial de corrientes.

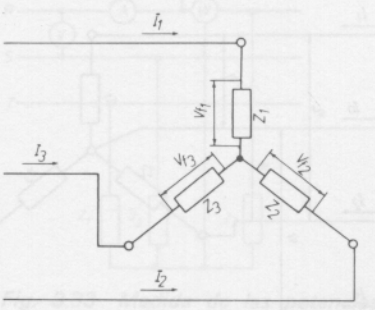


Fig. 3.30 Carga desequilibrada en estrella (sin neutro).

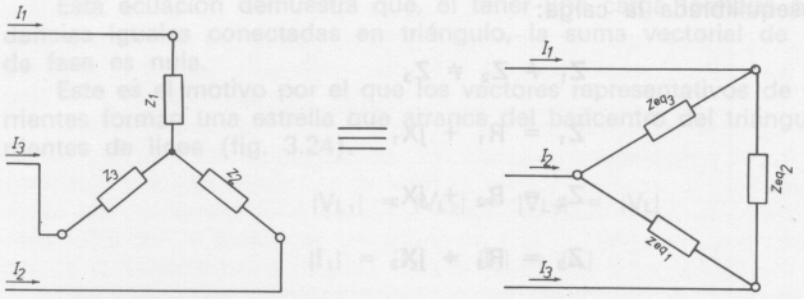


Fig. 3.31 Transformación estrella-triángulo.

El valor de estas impedancias equivalentes es:

$$Z_{eq.1} = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_1}$$

$$Z_{eq.2} = Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2}$$

$$Z_{eq.3} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_3}$$

Ahora el problema del cálculo de las corrientes de línea I_1, I_2 e I_3 puede resolverse por el procedimiento analítico explicado en el apartado anterior.

Una vez conocidas las corrientes de línea, las tensiones de fase vendrán determinadas por las ecuaciones:

$$V_{f1} = Z_1 \cdot I_1$$

$$V_{f2} = Z_2 \cdot I_2$$

$$V_{f3} = Z_3 \cdot I_3$$

3.5.5 *Carga desequilibrada en conexión estrella (con neutro)*

Este es el caso más frecuente en la práctica (fig. 3.32).

Representa, por ejemplo, las instalaciones en las que se dispone de dos tensiones distintas (127-220 V ó 220-380 V) y por otra parte las fases están desequilibradas (aunque esto tienda a evitarse en lo posible).

En esta disposición los cálculos resultan muy simples, ya que se conocen las tensiones de fase.

La tensión de fase, como ya se sabe, es:

$$V_{f1} = V_{f2} = V_{f3} = V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

y las intensidades de línea, que son las mismas que las de fase:

$$I_1 = \frac{V_f}{Z_1}$$

$$I_2 = \frac{V_f}{Z_2}$$

$$I_3 = \frac{V_f}{Z_3}$$

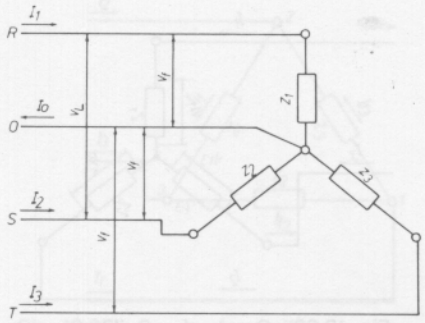


Fig. 3.32 Carga desequilibrada en estrella (con neutro).

Es importante observar que los desequilibrios de la carga se hacen notar sobre el hilo neutro, por el que circula la suma vectorial de las corrientes de línea:

$$I_o = I_1 + I_2 + I_3$$

3.6 Potencia eléctrica en los sistemas trifásicos

La potencia activa de un sistema trifásico es igual a la suma aritmética de las potencias activas de las tres fases. La potencia reactiva total será igual a la suma algebraica de las potencias reactivas de las tres fases:

$$P_{at} = V_{f1} \cdot I_{f1} \cdot \cos \varphi_1 + V_{f2} \cdot I_{f2} \cdot \cos \varphi_2 + V_{f3} \cdot I_{f3} \cdot \cos \varphi_3$$

$$P_{rt} = V_{f1} \cdot I_{f1} \cdot \operatorname{sen} \varphi_1 + V_{f2} \cdot I_{f2} \cdot \operatorname{sen} \varphi_2 + V_{f3} \cdot I_{f3} \cdot \operatorname{sen} \varphi_3$$

La potencia aparente total se calcula por el procedimiento ya conocido:

$$P_t = \sqrt{P_{at}^2 + P_{rt}^2}$$

3.6.1 *Potencia en los sistemas trifásicos equilibrados*

Recuérdese que en un sistema trifásico equilibrado, son iguales entre sí:
— Las tensiones de fase.
— Las tensiones de línea.
— Las corrientes de línea.
— Las corrientes de fase.

Por tanto, la potencia activa total será tres veces la potencia activa de una sola fase:

$$P_{at} = 3\ V_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

En la conexión estrella, puede ponerse:

$$P_{at} = 3 \frac{V_L}{\sqrt{3}} \cdot I_L \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

Y en la conexión triángulo:

$$P_{at} = 3 \cdot V_L \cdot \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

De lo que es fácil deducir que, en un sistema *trifásico equilibrado,* indistintamente conectado en estrella o en triángulo, la potencia activa total vale:

$$P_{at} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

Por análogos razonamientos, pueden obtenerse los valores de la potencia reactiva y la aparente.

$$P_r = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \operatorname{sen} \varphi$$

$$P_t = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$$

3.6.1.1 *Medida de potencias en sistemas con carga equilibrada*

Aunque este tema fue desarrollado en el tema 6 del libro de *Tecnología Eléctrica* de Primer Grado, Segundo Curso, de esta misma Editorial, se van a tratar aquí dos métodos que, por su importancia, merecen ser destacados:

1.º Medida de la potencia activa y la aparente por medio de un voltímetro, un amperímetro y un vatímetro.

Conectando los aparatos tal como indica la figura 3.33, se mide con el vatímetro la potencia activa absorbida por la fase Z_1; por lo que la potencia total activa será:

$$P_{at} = 3 \cdot P_1$$

Mientras que los datos obtenidos en el voltímetro (V) y el amperímetro (A) permitirán calcular la potencia aparente:

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I$$

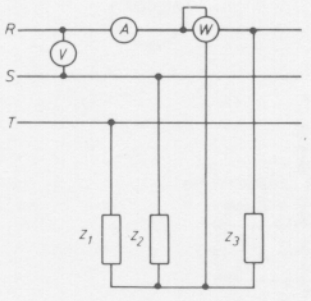


Fig. 3.33 Medida de las potencias aparente y activa en un sistema equilibrado.

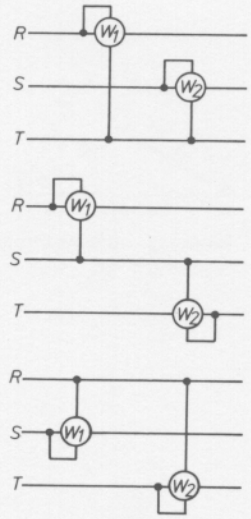


Fig. 3.34 Distintas formas de conexión de los vatímetros en el sistema Aron.

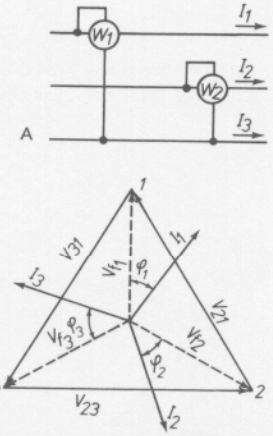


Fig. 3.35 A, conexión Aron; B, diagrama tensión corriente.

Con estos dos resultados se halla el factor de potencia, dato que permite calcular la potencia reactiva desarrollada en la carga:

$$\cos \varphi = \frac{3 \cdot P_{a_1}}{\sqrt{3} \cdot V \cdot I}$$

Como habrá podido comprobarse, este método sólo permite la medida directa de potencias en cargas equilibradas en conexión estrella.

2.º Medida de la potencia activa y reactiva por el método *Aron.*

Consiste en colocar sendos vatímetros en dos de las fases, pero con el extremo voltimétrico referido a la fase libre.

Este método es sólo válido para *líneas sin neutro.*

La característica principal del método Aron consiste en que la *suma algebraica* de los dos vatímetros da la potencia activa total, mientras que la *diferencia* de ambas lecturas da la potencia reactiva total.

Hay tres maneras distintas de distribuir los dos vatímetros en una misma instalación (fig. 3.34).

Para demostrar que es posible hallar la potencia activa total en un circuito trifásico sólo con la suma de dos términos, ténganse en cuenta los razonamientos que a continuación se expresan.

La potencia activa total absorbida por un sistema trifásico viene determinada por la expresión:

$$P_{a_t} = V_{f_1} \cdot I_{f_1} \cdot \cos \varphi_1 + V_{f_2} \cdot I_{f_2} \cdot \cos \varphi_2 + V_{f_3} \cdot I_{f_3} \cdot \cos \varphi_3$$

Si en un caso concreto la tensión V_{f_3} es igual a cero, la expresión anterior queda reducida a:

$$P_{a_t} = V_{f_1} \cdot I_{f_1} \cdot \cos \varphi_1 + V_{f_2} \cdot I_{f_2} \cdot \cos \varphi_2$$

que es la suma de sólo dos términos.

Supóngase que se dispone de dos vatímetros según la figura 3.35A.

La carga es equilibrada. El diagrama tensión-corriente sería como el de la figura 3.35B.

Como quiera que los dos vatímetros han tomado como tensión de línea de referencia el conductor 3, trasládese el centro de la estrella de corrientes de la figura 3.35B al vértice 3 (figs. 3.36A y B). Ello es perfectamente válido después de hacer

$$V_{f_3} = 0$$

Por tanto, los vatímetros W_1 y W_2 señalarán las siguientes potencias:

W_1:

$$P_{a_1} = V_{31} \cdot I_1 \cdot \cos \alpha_1$$

W_2:

$$P_{a_2} = V_{23} \cdot I_2 \cdot \cos \alpha_2$$

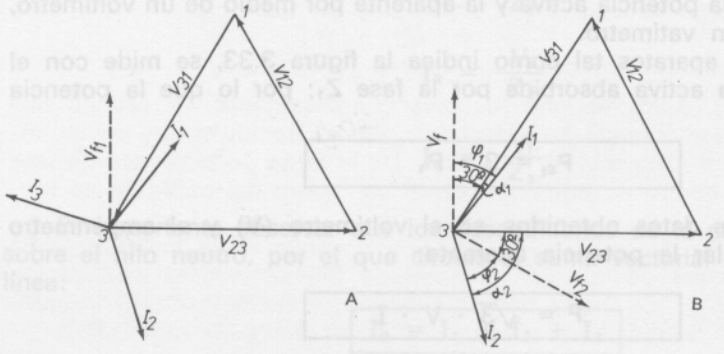


Fig. 3.36A y B Traslado del baricentro del triángulo.

siendo

$$\alpha_1 = \varphi_1 - 30^\circ \text{ y } \alpha_2 = \varphi_2 + 30^\circ$$

En definitiva, la potencia activa medida en un sistema equilibrado ($\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$) vale:

$$P_{at} = P_{a_1} + P_{a_2} = V \cdot I \cdot \cos(\varphi - 30^\circ) + V \cdot I \cdot \cos(\varphi + 30^\circ)$$

de donde:

$$\boxed{P_{at} = V \cdot I \cdot [\cos(\varphi - 30^\circ) + \cos(\varphi + 30^\circ)]} \qquad [3.6]$$

Desarrollando las funciones trigonométricas del interior del corchete, resulta:

$$\cos(\varphi - 30^\circ) = \cos\varphi \cdot \cos 30^\circ + \operatorname{sen}\varphi \cdot \operatorname{sen} 30^\circ$$

$$\cos(\varphi + 30^\circ) = \cos\varphi \cdot \cos 30^\circ - \operatorname{sen}\varphi \cdot \operatorname{sen} 30^\circ$$

Sumando miembro a miembro:

$$\cos(\varphi - 30^\circ) + \cos(\varphi + 30^\circ) = 2 \cdot \cos\varphi \cdot \cos 30^\circ$$

pero al ser $\cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$

$$\cos(\varphi - 30^\circ) + \cos(\varphi + 30^\circ) = \sqrt{3} \cdot \cos\varphi$$

valor que, sustituido en la ecuación [3.6], nos da:

$$\boxed{P_{at} = V \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi}$$

Fórmula que confirma la posibilidad de medir la potencia activa de un sistema simétrico equilibrado, con sólo dos vatímetros.

Si la carga ocasiona un ángulo $\varphi = 60^\circ$ ($\cos\varphi = 0{,}5$), resulta que el último sumando de la expresión [3.6] es nulo, o sea, la indicación del vatímetro W_2 será igual a cero.

Si $\varphi > 60^\circ$, la expresión $\cos(\varphi + 30^\circ)$ será negativa y, en consecuencia, la lectura de W_2 deberá restarse de la W_1 (habrá que invertir la conexión de W_2).

Se verá ahora cómo la diferencia de las lecturas de los vatímetros dará la potencia reactiva:

$$P_{a_1} - P_{a_2} = V \cdot I \cdot \cos(\varphi - 30^\circ) - V \cdot I \cdot \cos(\varphi + 30^\circ)$$

Agrupando términos:

$$P_{a_1} - P_{a_2} = V \cdot I \cdot [\cos(\varphi - 30^\circ) - \cos(\varphi + 30^\circ)]$$

Desarrollando las funciones trigonométricas del interior del corchete:

$$\cos(\varphi - 30^\circ) = \cos\varphi \cdot \cos 30^\circ + \operatorname{sen}\varphi \cdot \operatorname{sen} 30^\circ$$

$$\cos(\varphi + 30^\circ) = \cos\varphi \cdot \cos 30^\circ - \operatorname{sen}\varphi \cdot \operatorname{sen} 30^\circ$$

Restando miembro a miembro:

$$\cos(\varphi - 30^\circ) - \cos(\varphi + 30^\circ) = 2 \cdot \operatorname{sen}\varphi \cdot \operatorname{sen} 30^\circ$$

al ser $\operatorname{sen} 30^\circ = \frac{1}{2}$:

$$\cos(\varphi - 30^\circ) - \cos(\varphi - 30^\circ) = 2 \cdot \operatorname{sen}\varphi \cdot \frac{1}{2} = \operatorname{sen}\varphi$$

Por tanto: $P_{a_1} - P_{a_2} = V \cdot I \cdot \text{sen } \varphi$, ecuación a la que falta el factor $\sqrt{3}$ en el segundo miembro para que sea la expresión de la potencia reactiva total.

Por todo lo cual la potencia reactiva total de un sistema trifásico equilibrado puede ser calculada efectuando:

$$P_{r_t} = \sqrt{3} \cdot (P_{a_1} - P_{a_2})$$

El factor de potencia puede ser calculado a través de la tangente del ángulo de desfasamiento:

$$\text{tg } \varphi = \frac{P_{r_t}}{P_{a_t}} = \frac{\sqrt{3}\,(P_{a_1} - P_{a_2})}{P_{a_1} + P_{a_2}}$$

El método Aron también es válido para la medida de potencias activas en sistemas desequilibrados siempre que éstos carezcan de hilo neutro.

3.6.2 *Potencia en los sistemas desequilibrados*

En los sistemas desequilibrados es perfectamente válida la expresión general de las potencias activa, aparente y reactiva indicadas en el apartado 3.6.

3.7 Mejora del factor de potencia en sistemas trifásicos

Al igual que en los sistemas monofásicos, y por idénticas razones, en los sistemas polifásicos se trata de que el factor de potencia sea lo más próximo a la unidad.

Normalmente, siempre que se trate de mejorar el factor de potencia de una instalación óhmico-inductiva, la solución más rentable es disponer una batería de condensadores conectados en triángulo y en paralelo con la carga.

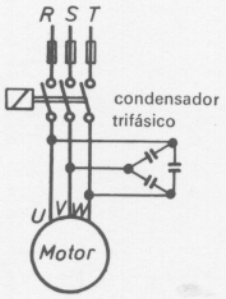
La figura 3.37 muestra algunos ejemplos de mejora del factor de potencia en motores trifásicos.

La expresión que da la capacidad de cada uno de los condensadores para mejorar el factor de potencia es similar a la obtenida para los sistemas monofásicos en el tema anterior:

$$C = \frac{P_{a_t}\,(\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)}{3\,\omega V^2}$$

en donde C es la capacidad buscada, P_t la potencia activa total, tg φ_1 la tangente del factor de potencia sin corregir, tg φ_2 la tangente del factor de potencia corregido, ω la pulsación y V la tensión de fase del sistema.

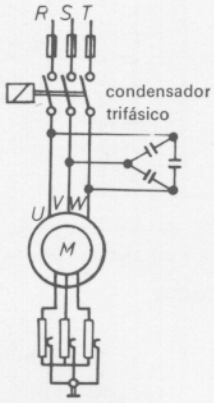
Aunque esta es la forma teórica del cálculo de los condensadores de corrección del factor de potencia, las casas constructoras de condensadores para estas necesidades disponen de ábacos confeccionados para la determinación de la batería de condensadores precisa para cada necesidad.

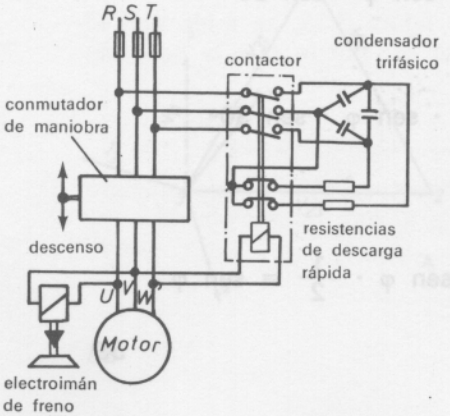


3.8 Transformaciones triángulo a estrella y estrella a triángulo

En ciertos casos las resistencias de un circuito están dispuestas de tal forma que es difícil operar con ellas.

Las fórmulas de transformación triángulo a estrella y estrella a triángulo, que a continuación se van a explicar, son de gran utilidad (por ejemplo: solución de la carga desequilibrada, conectada en estrella).





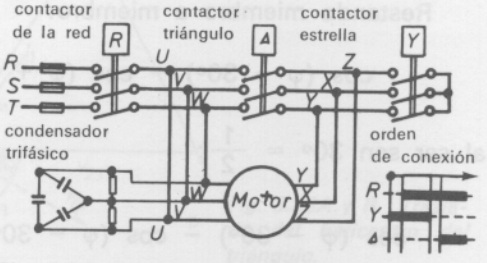


Fig. 3.37 Diversas clases de conexión de la batería de condensadores para la mejora del factor de potencia en motores trifásicos.

— Transformación triángulo a estrella.

Véase el problema siguiente: Dadas tres resistencias dispuestas en triángulo, calcular las equivalentes a los efectos de corriente y tensión, pero dispuestas en estrella (fig. 3.38).

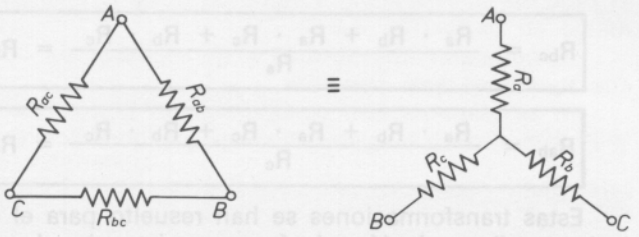


Fig. 3.38 Transformación triángulo-estrella, estrella-triángulo.

Mirando la resistencia R_{ab} desde $A-B$, se verá una cierta resistencia que debe ser equivalente a aquélla que calculamos. Efectivamente, desde los puntos $A-B$ se advierten las resistencias R_{ac} y R_{bc} en serie entre sí, pero en paralelo con la resistencia R_{ab}.

Mirando también desde $A-B$, se ven las equivalentes del nuevo sistema: $R_a + R_b$ (la resistencia R_c queda *al aire*, es decir, no forma circuito cerrado desde los puntos considerados).

Haciendo lo mismo desde los puntos $A-C$ y $C-B$, se llega a las ecuaciones siguientes:

$$R_{AB} = \frac{R_{ab}\,(R_{ac} + R_{bc})}{R_{ab} + R_{ac} + R_{bc}} = R_a + R_b \qquad [3.7]$$

$$R_{AC} = \frac{R_{ac}\,(R_{ab} + R_{bc})}{R_{ac} + R_{ab} + R_{bc}} = R_a + R_c \qquad [3.8]$$

$$R_{BC} = \frac{R_{bc}\,(R_{ab} + R_{ac})}{R_{ab} + R_{ac} + R_{bc}} = R_c + R_b \qquad [3.9]$$

De este sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, se pueden calcular fácilmente los valores de R_a, R_b y R_c conociendo R_{ab}, R_{ac} y R_{bc}.

Para calcular R_a, bastará con sumar miembro a miembro las ecuaciones [3.7] y [3.8], restándole [3.9]:

$$R_a = \frac{R_{ab} \cdot R_{ac}}{R_{ab} + R_{ac} + R_{bc}}$$

R_b se calculará sumando miembro a miembro las ecuaciones [3.7] y [3.9] y restándole la [3.8]:

$$R_b = \frac{R_{ab} \cdot R_{bc}}{R_{ab} + R_{ac} + R_{bc}}$$

R_c se obtiene sumando [3.8] y [3.9] y restándole [3.7]:

$$R_c = \frac{R_{ac} \cdot R_{bc}}{R_{ab} + R_{ac} + R_{bc}}$$

— Transformación estrella a triángulo.

En este caso se trata de resolver el problema siguiente. Dadas tres resistencias R_a, R_b y R_c, dispuestas en estrella, calcular las resistencias equivalentes R_{ac}, R_{ab} y R_{bc} dispuestas en triángulo, a los efectos de la corriente y la tensión externa.

Evidentemente, se trata de un problema inverso al anterior.

Su solución consiste en despejar de las ecuaciones [3.7], [3.8] y [3.9], R_{ac}, R_{ab} y R_{bc}, pues ahora R_a, R_b y R_c serán valores conocidos.

Resolviendo el sistema de ecuaciones [3.7], [3.8] y [3.9], por cualquier procedimiento conocido, se tiene:

$$R_{ac} = \frac{R_a \cdot R_b + R_a \cdot R_c + R_b \cdot R_c}{R_b} = R_a + R_c + \frac{R_a \cdot R_c}{R_b}$$

$$R_{bc} = \frac{R_a \cdot R_b + R_a \cdot R_c + R_b \cdot R_c}{R_a} = R_b + R_c + \frac{R_b \cdot R_c}{R_a}$$

$$R_{ab} = \frac{R_a \cdot R_b + R_a \cdot R_c + R_b \cdot R_c}{R_c} = R_a + R_b + \frac{R_a \cdot R_b}{R_c}$$

Estas transformaciones se han resuelto para el caso en que los elementos de la estrella o el triángulo fuesen resistencias. Iguales resultados se hubiesen obtenido para el caso de que fuesen impedancias.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Realizar un estudio de las distintas aplicaciones de la conexión estrella y la conexión triángulo de la carga.

— Confeccionar un cuadro comparativo de los valores de tensión y corriente de fase y línea, sus diagramas vectoriales y la representación vectorial de tensión y corriente, en sistemas trifásicos simétricos, que alimentan cargas equilibradas y desequilibradas conectadas en triángulo y en estrella indistintamente.

— Realizar un estudio de los distintos métodos para efectuar medidas de la potencia en sistemas trifásicos.

CUESTIONARIO

3.1 Dibújese el esquema de un generador elemental que proporciona un sistema de fuerza electromotriz hexafásico.

3.2 ¿Qué ecuación relaciona las tensiones simples y compuestas de un sistema bifásico? ¿Y la intensidad que circula por el hilo neutro con la que circula por los hilos de línea?

3.3 Demuéstrese a qué es igual la tensión de línea en un generador trifásico conectado en estrella.

3.4 ¿Cómo se define corriente de fase? ¿Y corriente de línea?

3.5 En un sistema trifásico simétrico que alimenta una carga equilibrada conectada en estrella, ¿a qué es igual la corriente de línea? ¿Y el factor de potencia?

3.6 En un sistema trifásico simétrico que alimenta una carga equilibrada conectada en triángulo, ¿a qué es igual la corriente de fase? ¿Y el factor de potencia?

3.7 En una carga desequilibrada conectada en triángulo, ¿a qué es igual cada una de las corrientes de fase?

3.8 ¿A qué es igual la potencia, en un sistema trifásico equilibrado? ¿Y en uno desequilibrado? Justifíquese la respuesta.

3.9 En una transformación estrella a triángulo, ¿qué ecuaciones de conversión se utilizarían? Demuéstrense.

3.10 Escríbanse las expresiones de los valores instantáneos de las tensiones de un sistema trifásico en forma analítica, exponencial, trigonométrica, binómica y polar.

3.11 Un motor trifásico de 190 CV absorbe 100 A a una tensión de 1 000 V. Calcular el factor de potencia del motor sabiendo que la frecuencia de la tensión de red es de 50 Hz. (Ejercicio propuesto en reválida de Oficialía. Junio 1970.)

3.12 Se dispone de tres impedancias iguales, de 8 + 6j ohmios cada una. Se conectan primero en triángulo y después en estrella. Calcúlense las corrientes de línea y los diagramas vectoriales de *V* e *I* en uno y otro caso, e indíquese cuál es la relación de corrientes.

3.13 En un circuito como el de la figura 3.32, $Z_1 = 8 + 6j$; $Z_2 = 10 + 0j$ y $Z_3 = 0 + 20j$. Calcular la corriente que pasa por el neutro sabiendo que la tensión simple es de 220 V.

3.14 Calcúlense las distintas potencias en una carga trifásica equilibrada conectada en estrella, si cada fase ofrece una impedancia de 9 + 5j y su tensión es de 220 V.

3.15 Una carga trifásica en triángulo está formada por tres impedancias iguales de Z = 8 + 6j, estando alimentada por una red trifásica de 600 V/50 Hz. Calcular la variación de la corriente de línea que se produce debido a la inserción de una batería de condensadores, cuya reactancia capacitiva a 50 Hz es de 4 Ω. (Sugerencia: como la carga es equilibrada, resolver el problema operando con una sola de las tres fases.)

3.16 Trácese el diagrama vectorial de corrientes en un circuito como el de la figura 3.27, si: $Z_1 = 0 + 40j$; $Z_2 = 0 - 20j$ y $Z_3 = 30 + 10j$. El circuito está alimentado a 380 V.

BIBLIOGRAFIA

VON BEEREN H. y TEUCHERT H., *Fundamentos de la Electrotecnia,* Editorial Labor, Barcelona 1964.

MOMPIN J., *Electrotecnia,* Ediciones Don Bosco, Barcelona.

CASADO R., *Tecnología Eléctrica/2,* Bruño-Ediciones Don Bosco, Barcelona 1976.

Tema 4. Máquinas de corriente continua rotativas

OBJETIVOS

— *Distinguir los elementos que constituyen las máquinas.*
— *Conocer los diferentes sistemas de excitación.*
— *Estudiar las características de excitación de las dinamos.*
— *Observar el funcionamiento de una dinamo.*
— *Comprobar la importancia del colector de delgas en una máquina de corriente continua.*

GUION

— Máquinas de corriente continua rotativas.
— Dinamos.
— Fuerza electromotriz producida en una espira.
— Construcción de las dinamos
— Plano neutro
— Reacción de inducido
— Conmutación.
— Clases de dinamos según su excitación.
— Máquina de corriente continua de excitación independiente.
— Máquina de corriente continua con excitación serie.
— Dinamo con excitación en derivación. Máquina shunt.
— Generador en derivación en carga. Característica exterior.
— Dinamo de excitación compound.
— Ventajas e inconvenientes de la dinamo serie, derivación y compound.
— Acoplamiento de las dinamos.

PUNTOS CLAVE

— Producción de una corriente continua.
— Clases de dinamos según su excitación.
— Construcción de las dinamos.
— Acoplamiento de las dinamos.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Inducción eléctrica. Procedimientos de inducción. Simbología normalizada de máquinas eléctricas.
— Concepto de incremento (Δ).

EXPOSICION DEL TEMA

4.1 Máquinas de corriente continua rotativas

Su estudio está basado en la inducción electromagnética, que transforma la energía mecánica en energía eléctrica o inversamente, y en la cual el campo magnético está producido por un electroimán.

Dado que el proceso de conversión de energía mecánica en eléctrica es siempre reversible, hoy se habla de convertidores electromecánicos de energía más que de generadores y motores de corriente (figs. 4.1 y 4.2).

Los convertidores electromecánicos constan de un sistema eléctrico que alimenta un motor y éste, a la vez, transforma la energía eléctrica en mecánica. El proceso es reversible, aunque parte de la energía es irreversible por transformarse en calor (fig. 4.3).

Al comparar los motores y generadores de corriente continua, se ve que sus funciones son opuestas.

Si se alimenta con electricidad un motor, éste produce energía mecánica y, al comunicar a un generador energía mecánica, produce electricidad (fig. 4.4).

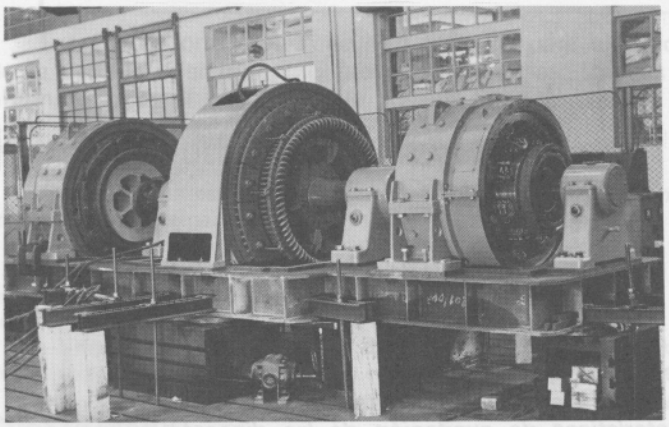


Fig. 4.1 Dinamo de corriente continua.

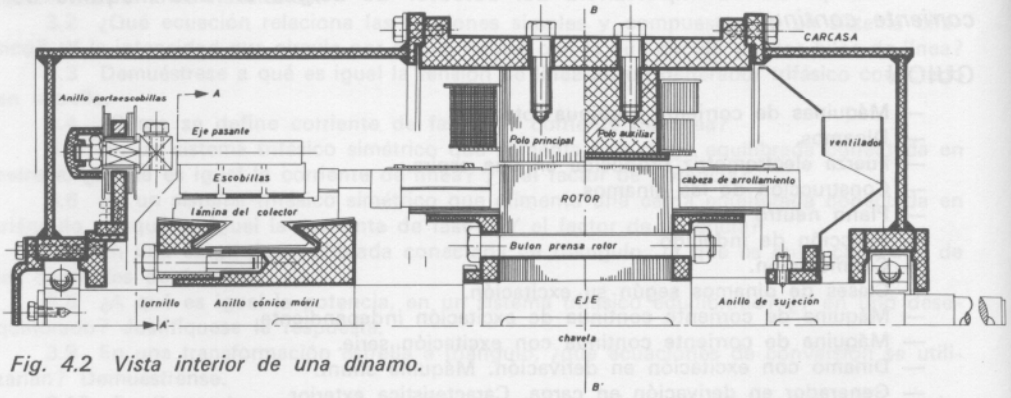


Fig. 4.2 Vista interior de una dinamo.

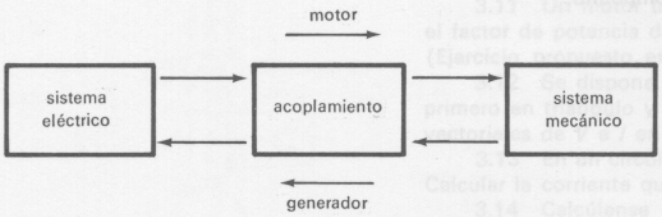


Fig. 4.3 Esquema bloque.

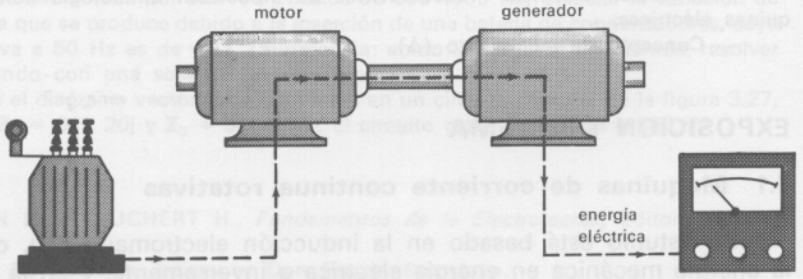


Fig. 4.4 Comparación entre motor y generador.

4.2 Dinamos

La norma UNE, en el apartado de *Vocabulario Electrotécnico,* define la dinamo como *generador de corriente continua.*

Para comprender cómo una dinamo produce corriente continua, es útil estudiar los fenómenos que ocurren en un conductor sometido a la acción de un campo magnético.

4.2.1 *Funcionamiento de un generador elemental*

Se tiene una espira de hilo de cobre colocada de modo que pueda girar en el interior de un campo magnético.

La espira en su movimiento corta las líneas de fuerza que provienen del campo inductor (norte-sur) en sentido transversal.

Al estar los lados activos de la espira sometidos a una variación de flujo, se induce en éstos una fuerza electromotriz cuya magnitud depende de la posición que ocupa la espira con relación al campo magnético. El generador elemental así constituido (fig. 4.5) consta de:

— piezas polares (inductor),
— inducido (que es la espira),
— escobillas y anillos deslizantes.

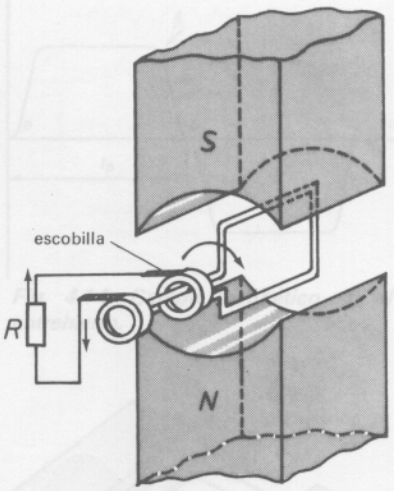


Fig. 4.5 Generador elemental.

Experiencia

Al estar la espira en la posición *A* (fig. 4.6), se le hace girar en sentido contrario a las agujas del reloj. El movimiento de los conductores es paralelo al campo magnético; por tanto, no corta líneas de fuerza y, en consecuencia, no se induce fuerza electromotriz.

Al pasar la espira de *A* a *B*, barre un área de campo magnético y en su giro corta líneas de fuerza desde un valor cero a un máximo, induciendo una fuerza electromotriz creciente cuyo valor máximo se alcanza cuando la espira llega a *B*.

El sentido de la corriente depende de la polaridad del campo magnético y del sentido de rotación del inducido; para ello basta aplicar la regla de Fleming de la mano derecha (fig. 4.7).

La forma de onda se obtiene en los terminales del generador elemental.

El estudio del resto de posiciones de la espira es exactamente igual al realizado con *A* y *B* (fig. 4.8).

La fuerza electromotriz (f. e. m.) tiene el mismo sentido en cada conductor; por tanto, las tensiones inducidas se suman.

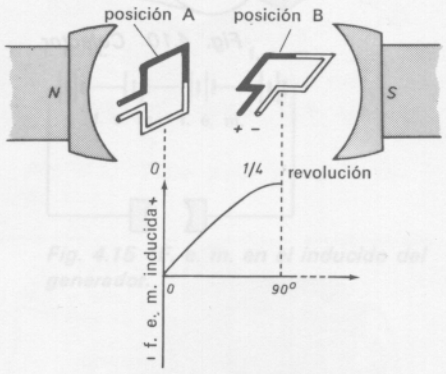


Fig. 4.6 Posición de la espira en el generador elemental en un cuarto de revolución.

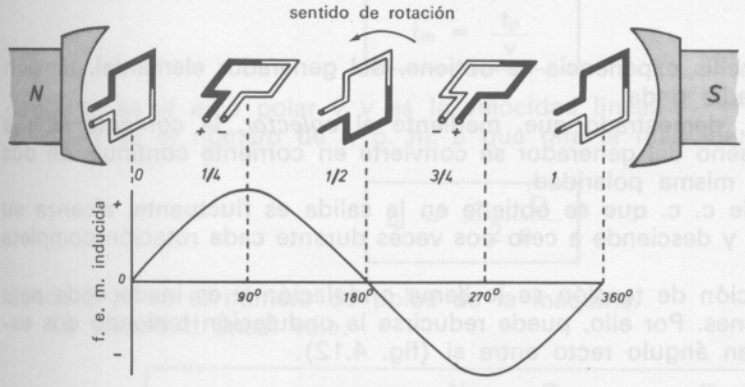


Fig. 4.8 F. e. m. inducida en el generador elemental.

Resumen

Queda claro que siempre que haya movimiento relativo entre el campo magnético y un conductor, se induce una f. e. m.; su sentido viene dado por la regla de Fleming de la mano derecha.

4.2.2 *Generador de corriente continua*

Para obtener corriente continua con el generador elemental estudiado, bastaría insertar un inversor (fig. 4.9), y accionarlo dos veces por ciclo.

Si la frecuencia es de 50 Hz, fácilmente se intuye que no hay dispositivo mecánico capaz de realizar una maniobra tan rápida.

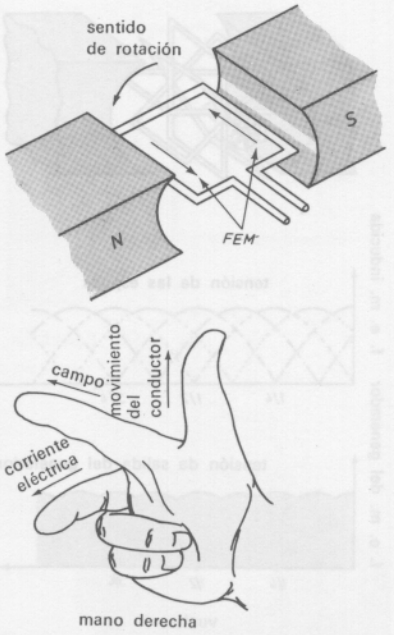


Fig. 4.7 Regla de la mano derecha.

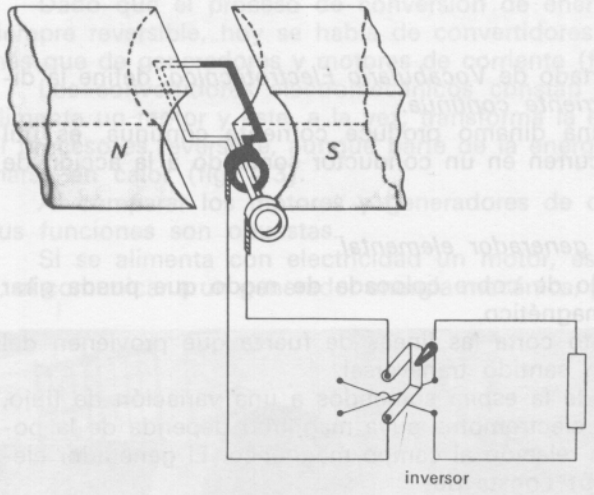


Fig. 4.9 Conmutador inversor.

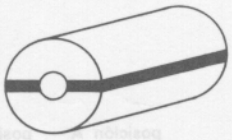


Fig. 4.10 Colector.

Por ello, el colector de delgas (fig. 4.10) ejecuta la misión del conmutador mecánico indicado anteriormente.

El sentido de la corriente en la escobilla *A* es siempre el mismo, sea cual fuere la posición que ocupa la espira en el espacio (fig. 4.11).

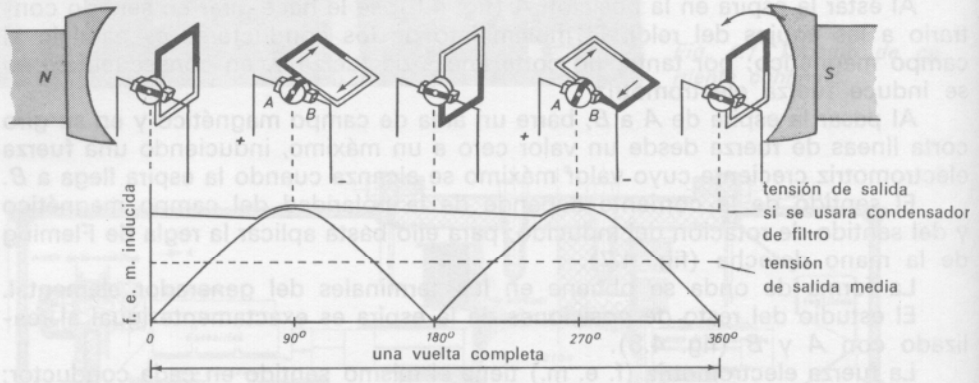


Fig. 4.11 Tensión de salida en las escobillas de una dinamo.

Con esta sencilla experiencia se obtiene, del generador elemental, tensión rectificada de media onda.

Queda, pues, demostrado que, mediante el *colector,* la corriente alterna producida en el seno del generador se convierte en corriente continua, de dos semiondas de la misma polaridad.

La tensión de c. c. que se obtiene en la salida es fluctuante, alcanza su máxima amplitud y desciende a cero dos veces durante cada rotación completa de la espira.

A esta variación de tensión se le llama ondulación y es inadecuada para muchas aplicaciones. Por ello, puede reducirse la ondulación teniendo dos espiras colocadas en ángulo recto entre sí (fig. 4.12).

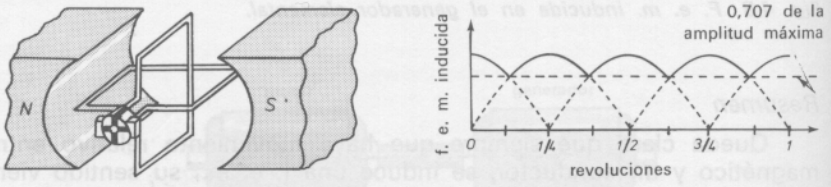


Fig. 4.12 Inducido con dos espiras.

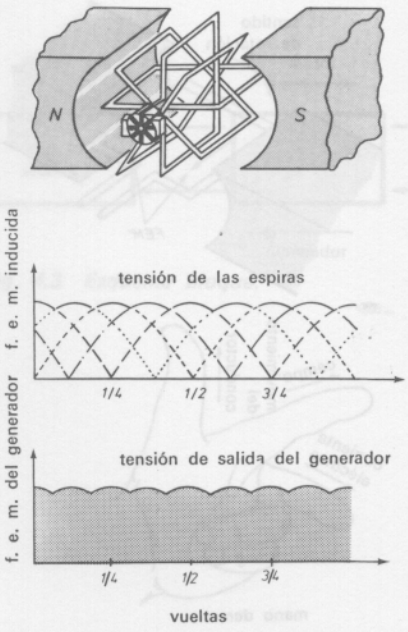


Fig. 4.13 Inducidos con tres espiras.

La nueva tensión de c. c. aumenta hasta un valor de 0,707 de la amplitud máxima.

Se obtiene un valor mayor de tensión aumentando el número de espiras en el inducido de la máquina (fig. 4.13).

4.3 Fuerza electromotriz producida en una espira

El valor de la fuerza electromotriz inducida en una espira tiene por expresión general:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

El flujo y el tiempo son variables; por tanto, es útil saber cómo varía el flujo en función del tiempo.

El campo magnético en el entrehierro no varía senoidalmente, sino que aparece según se representa en la figura 4.14.

Imaginemos una espira formada por dos conductores distanciados un paso polar, que gira a una velocidad determinada, bajo la acción de un campo magnético (fig. 4.15).

La fuerza electromotriz media inducida en estos dos conductores es:

$$e_{med.} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t}$$

Si se supone que la espira *a-b* pasa a la posición a_1-b_1 (fig. 4.14), el flujo abarcado en este recorrido es:

$$\Delta\Phi = \Phi - (-\Phi) = 2\,\Phi$$

Si el tiempo que ha tardado es de t_m, el valor de la f. e. m. media será igual a:

$$e_{med.} = \frac{2\,\Phi}{t_m} \qquad [4.1]$$

Se entiende por t_m el tiempo que tarda el inducido en dar media vuelta. Se cumple que

$$t_m = \frac{t_p}{v} \qquad [4.2]$$

donde t_p es el arco polar y v es la velocidad lineal.

Si N es el número de r. p. m. a que gira la máquina,

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2\,p}$$

donde 2 p, es el número de polos de la máquina.

La velocidad lineal vale:

$$v = \omega \cdot r = 2\,\pi \cdot \frac{N}{60} \cdot \frac{D}{2} = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

sustituido en [4.2] y en [4.1] quedan respectivamente

$$t_m = \frac{\frac{\pi \cdot D}{2\,p}}{\frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}} = \frac{60}{2\,p \cdot N}$$

$$e_{med.} = \frac{2\,\Phi}{\frac{60}{2\,p \cdot N}} = \frac{4\,p \cdot N \cdot \Phi}{60}$$

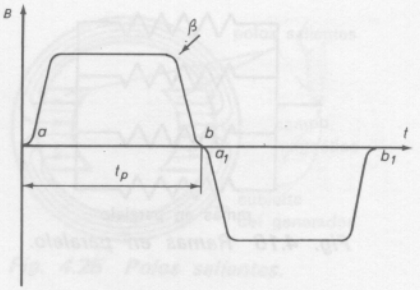
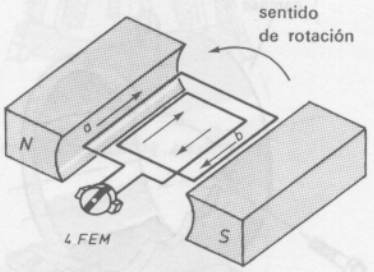


Fig. 4.14 Campo magnético en el entrehierro.



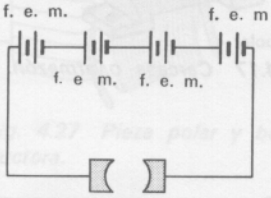


Fig. 4.15 F. e. m. en el inducido del generador.

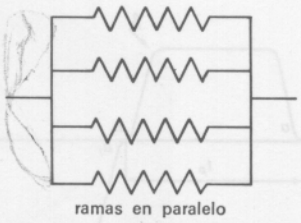


Fig. 4.16 Ramas en paralelo.

Si n es el número total de conductores, y $n/2$ las espiras, y además el inducido queda dividido por las escobillas en Z ranuras.

Se tiene finalmente el valor de la f. e. m. media:

$$E = \frac{n}{4\,a} \cdot \frac{4\,p \cdot N \cdot \Phi}{60} = \frac{p}{a} \cdot \frac{N \cdot n \cdot \Phi}{60} \qquad [4.3]$$

En donde los valores son:

Φ = flujo por polo;
n = número total de conductores del inducido;
N = número de revoluciones por minuto a que gira la máquina;
2 a = ramas en paralelo (fig. 4.16).

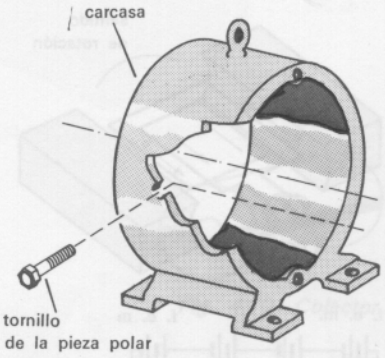


Fig. 4.17 Carcasa o armazón.

4.4 Constitución de las dinamos

De entre los elementos estructurales que constituyen las máquinas de corriente continua, según las instrucciones que al respecto dictan las Normas UNE, pueden estudiarse los siguientes:

Armazón o carcasa. Pieza o conjunto de piezas que sostienen los órganos de una máquina y forman su esqueleto (fig. 4.17).

Colector de delgas. Conjunto de láminas conductoras, aisladas unas de otras pero conectadas a las secciones de un devanado y sobre las cuales frotan las escobillas (fig. 4.18).

Escobilla. Pieza conductora destinada a asegurar, por contacto deslizante, la conexión eléctrica de un órgano móvil con un órgano fijo (fig. 4.19).

Devanado de excitación. Devanado inductor. Devanado destinado a conducir una corriente continua de excitación (fig. 4.20).

Devanado inducido. Devanado conectado al circuito exterior y en el que tiene lugar la conversión principal de energía (fig. 4.21).

Inducido. Conjunto del devanado inducido y, eventualmente, su colector y soportes (fig. 4.22).

Núcleo magnético. Parte de un circuito magnético rodeado por un devanado (fig. 4.23).

Culata. Pieza de sustancia ferromagnética no rodeada por devanados y destinada a unir los núcleos de los polos de una máquina (fig. 4.24).

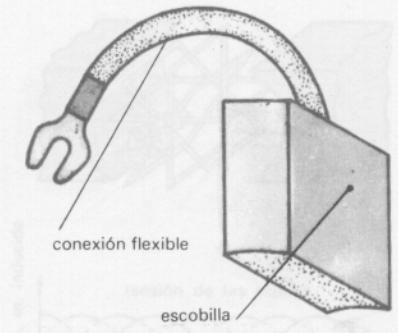


Fig. 4.18 Colector de delgas.

Fig. 4.19 Escobilla.

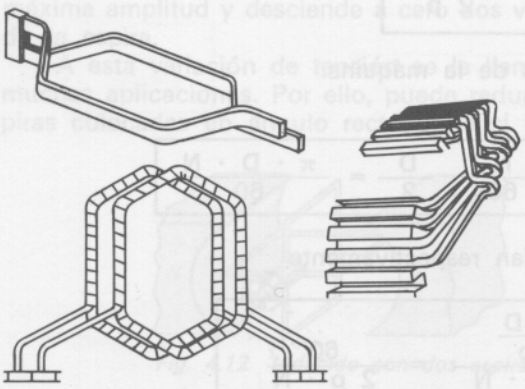


Fig. 4.21 Diferentes formas de bobinas del inducido.

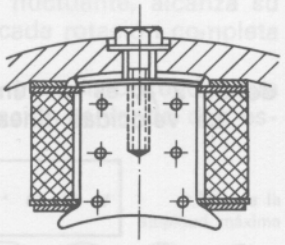


Fig. 4.23 Núcleo magnético.

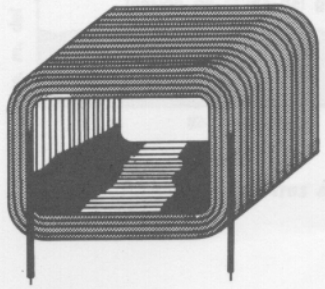


Fig. 4.20 Bobina inductora.

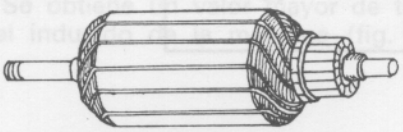


Fig. 4.22 Inducido.

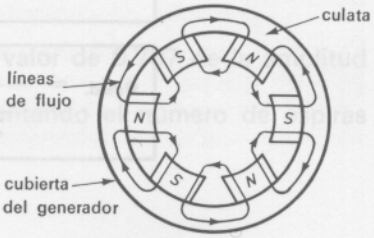


Fig. 4.24 Culata.

Polo saliente. Conjunto de un núcleo y de una pieza polar que sobresale de la parte que constituye la culata magnética o el cubo (fig. 4.25).

Polos auxiliares o de conmutación. Polo magnético suplementario provisto de uno o varios devanados y destinado a mejorar la conmutación (fig. 4.26).

Pieza polar. Parte del circuito magnético de una máquina entre la culata y el entrehierro incluyendo el núcleo y, eventualmente, la expansión polar (figura 4.27).

Expansión polar. Parte de una pieza polar próxima al inducido y que bordea el entrehierro (fig. 4.28).

Ranura. Escotadura practicada en una pieza metálica para alojar en ella los conductores de un devanado (fig. 4.29).

Diente. Parte de hierro comprendido entre dos ranuras consecutivas (figura 4.30).

Portaescobillas. Elemento que sirve de soporte a las escobillas (fig. 4.31).

Eje. Arbol sobre el que va montado el inducido de las máquinas de corriente continua (fig. 4.32).

Cojinete. Elemento mecánico destinado a la fijación del eje y que facilita el giro de éste (fig. 4.33).

Anillo colector. Anillo conductor montado sobre un árbol y destinado a establecer la comunicación eléctrica entre un conductor giratorio y otro fijo, por medio de escobillas (fig. 4.34).

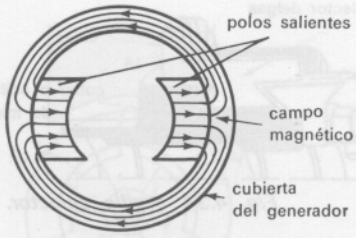


Fig. 4.25 Polos salientes.

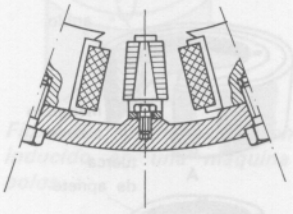


Fig. 4.26 Polos auxiliares.

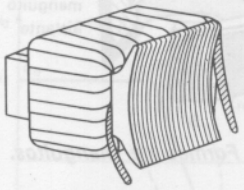


Fig. 4.27 Pieza polar y bobina inductora.

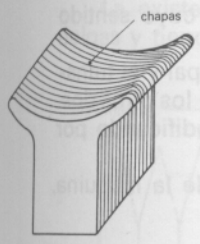


Fig. 4.28 Expansión polar.

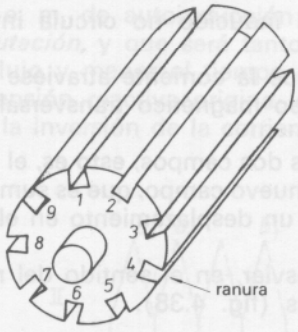


Fig. 4.29 Ranuras.

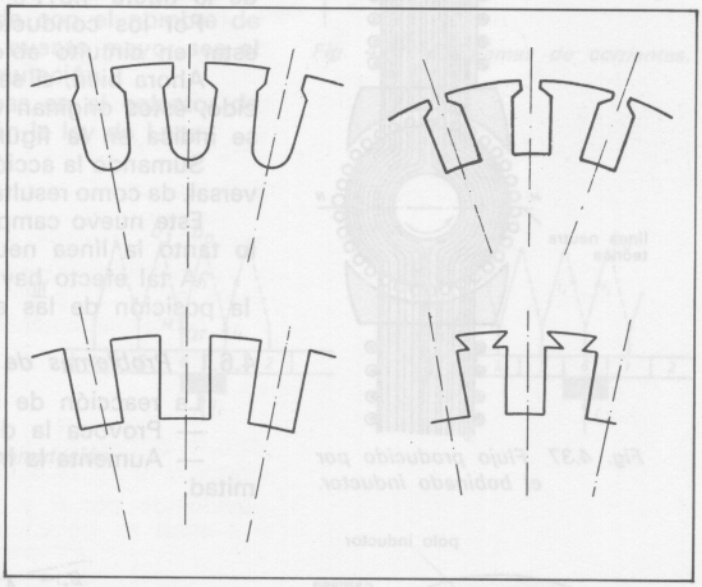


Fig. 4.30 Dientes.

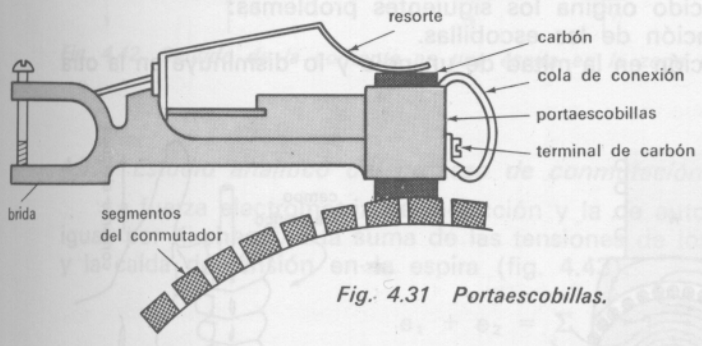


Fig. 4.31 Portaescobillas.

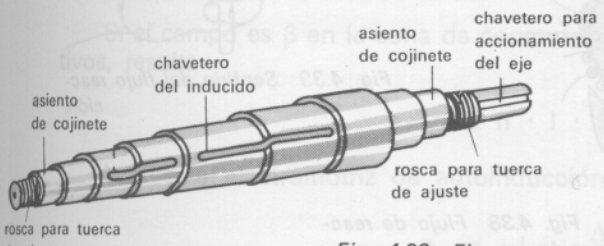


Fig. 4.32 Eje.

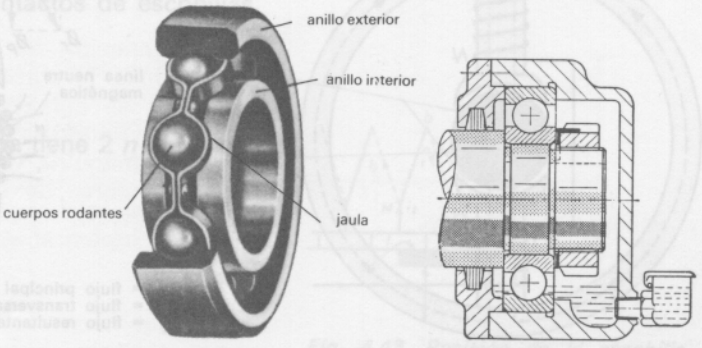


Fig. 4.33 Cojinetes.

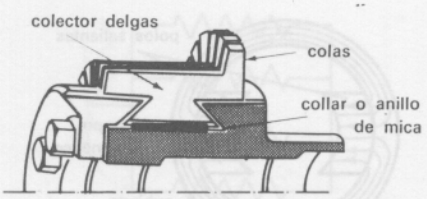


Fig. 4.34 Anillo colector.

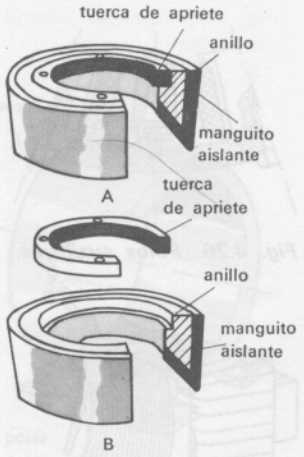


Fig. 4.35 Formas de manguitos.

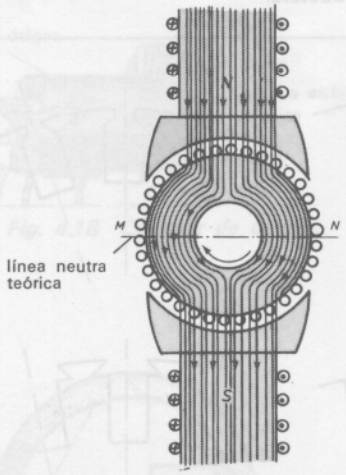


Fig. 4.37 Flujo producido por el bobinado inductor.

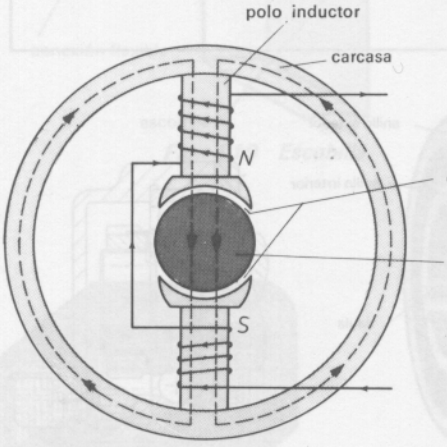


Fig. 4.36 Conexión de las bobinas inductoras.

Manguito colector. Manguito fijado en el eje o sobre el manguito del inducido en el que se montan las delgas de un colector con sus aislantes y elementos de retención (fig. 4.35).

4.5 Plano neutro. Definición según Normas

Líneas determinadas por las posiciones de las escobillas que corresponden, en vacío, al máximo de la fuerza electromotriz.

De lo estudiado anteriormente se recuerda que, si una escobilla hace contacto con dos segmentos consecutivos del colector que tengan una bobina conectada entre ellos, la escobilla pone en cortocircuito la bobina.

Si en la bobina, en ese instante, inducía una tensión, la corriente que circula por la misma puede ser muy peligrosa, llegando incluso a quemarse las espiras.

Para evitar este problema, la diferencia de potencial en la bobina en el período de conmutación debe ser cero. Véase 4.7.

Sólo hay una zona que cumple con este requisito y ésta es el plano o línea neutra.

Decalar. Acto de modificar la posición angular de las escobillas.

4.6 Reacción de inducido

Se define como la *modificación del flujo en una máquina debida a la fuerza magnetomotriz engendrada por la corriente inducida.*

Al hablar de campo magnético se ha hecho referencia al producido por las bobinas inductoras colocadas en los polos principales de la máquina (fig. 4.36).

La trayectoria de las líneas de fuerza en una máquina de dos polos es la de la figura 4.37.

Por los conductores del inducido no circula intensidad de corriente por estar en circuito abierto.

Ahora bien, si se hace que la corriente atraviese los conductores del inducido, éstos originan un campo magnético transversal (fig. 4.38), cuyo sentido se indica en la figura 4.39.

Sumando la acción de los dos campos, esto es, el campo principal y el transversal, da como resultante un nuevo campo, que es suma vectorial de los otros dos.

Este nuevo campo sufre un desplazamiento en el espacio, modificando por lo tanto la línea neutra.

A tal efecto hay que desviar, en el sentido del movimiento de la máquina, la posición de las escobillas (fig. 4.38).

4.6.1 *Problemas de la reacción de inducido*

La reacción de inducido origina los siguientes problemas:

— Provoca la desviación de las escobillas.

— Aumenta la inducción en la mitad de un polo y lo disminuye en la otra mitad.

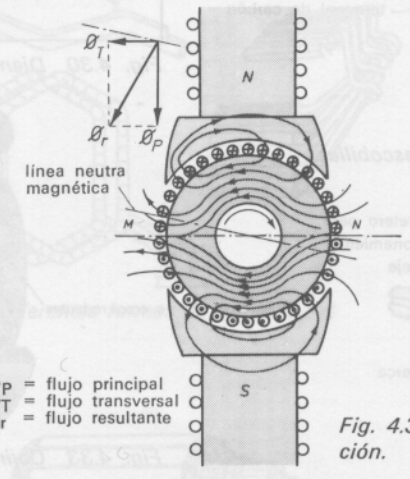


Fig. 4.38 Flujo de reacción.

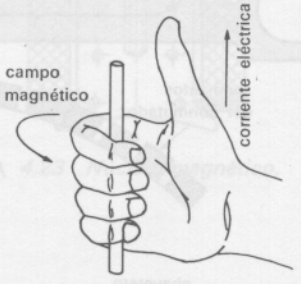


Fig. 4.39 Sentido del flujo reacción.

— Disminuye el flujo principal.
— Determina una caída de tensión.
— Aumenta las pérdidas en el hierro.
— Aumenta la tensión entre dos delgas contiguas en el colector, originando chispas en el propio colector.
— La reducción del flujo comporta una disminución de la fuerza electromotriz inducida.

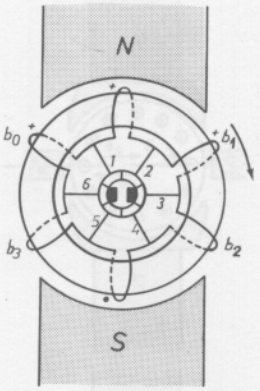


Fig. 4.40 Arrollamiento elemental del inducido en una máquina de dos polos.

4.7 Conmutación

En una máquina de colector de delgas podemos definir la conmutación como *modificación de la corriente en las secciones cortocircuitadas por las escobillas durante la duración del cortocircuito.*

El arrollamiento de inducido (fig. 4.40) queda dividido en 2 *a*, ramas en paralelo.

Las espiras pasan en un instante determinado de una rama a la otra cambiando de sentido. Esta inversión de corriente en la espira produce el fenómeno

Las espiras pasan en un instante determinado de una rama a la otra cambiando el sentido de la corriente. Esta inversión de corriente en la espira que está cortocircuitada bajo la presión de la escobilla puede perjudicar la bobina.

En la representación del diagrama de corriente, en función de las posiciones que ocupa la espira, la variación de intensidad pasa de un valor i_i (positivo), en las posiciones b_0 y b_1, hasta valer $-i_i$ (negativo) en los puntos b_2 y b_3 (figs. 4.41 y 4.42).

El paso de la posición b_0, b_1 a la situación b_2, b_3 señala precisamente el momento de producirse la inversión de corriente.

Del estudio del proceso de conmutación interesa deducir la variación que sufre la intensidad de corriente en las posiciones citadas.

La inversión de la intensidad en la bobina lleva consigo una variación de flujo que produce una f. e. m. de autoinducción conocida con el nombre de *tensión reactiva de conmutación,* y que será tanto mayor cuanto mayor sea el valor de la variación de flujo y menor el tiempo de conmutación.

La existencia de la tensión reactiva origina las chispas en el colector de delgas y tiende a retardar la inversión de la corriente, según la ley de Lenz.

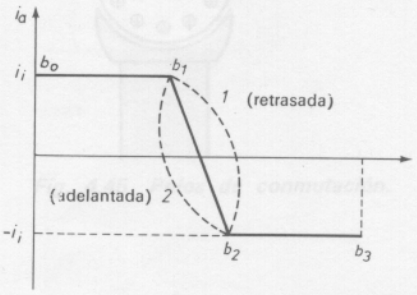


Fig. 4.41 Diagramas de corrientes.

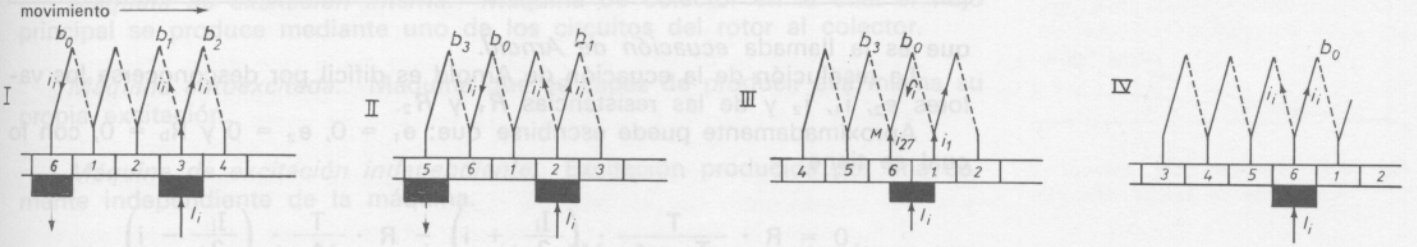


Fig. 4.42 Sentido de la corriente en una espira en la zona de conmutación.

4.7.1 *Estudio analítico del proceso de conmutación*

La fuerza electromotriz de inducción y la de autoinducción tienen que ser igual, por Kirchhoff, a la suma de las tensiones de los contactos de escobillas, y la caída de tensión en la espira (fig. 4.43).

$$e_1 + e_2 = \Sigma R \cdot I$$

Si el campo es β en la zona de conmutación, y la espira tiene 2 *n* lados activos, resulta

$$e_2 = 2\, n \cdot l \cdot \beta \cdot v$$

La fuerza electromotriz de autoinducción vale:

$$e_1 = -L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

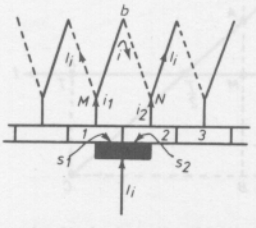


Fig. 4.43 Posición de la escobilla en propia zona de conmutación.

Se tiene que:

$$-L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} + 2\,n \cdot l \cdot \beta \cdot v = R_b \cdot i + R_1 \cdot i_1 - R_2 \cdot i_2 \qquad [4.4]$$

en donde:

R_0 = resistencia propia de la espira en cortocircuito;
R_1 = resistencia de contacto con la delga 1;
R_2 = resistencia de contacto con la delga 2.

La corriente de entrada en la escobilla es I_i que se divide en i_1 e i_2:

$$I_i = i_1 + i_2$$

$$i_1 = i_i + i$$

$$i_2 = i_i - i$$

Si $i_i = \frac{I_i}{2}$, sustituyendo

$$i_1 = \frac{I_i}{2} + i \text{ e } i_2 = \frac{I_i}{2} - i$$

Sabiendo también que la R_1 y la R_2 están en función de la resistencia de contacto de toda la escobilla R, y que T es tiempo de conmutación, y t el tiempo en un instante del proceso, se tiene:

$$R_1 = R \cdot \frac{T}{T - t} \text{ y } R_2 = R \cdot \frac{T}{t}$$

Sustituyendo en la ecuación [4.4] queda:

$$-L \frac{\Delta i}{\Delta t} + 2\,n \cdot l \cdot \beta \cdot v = R_b \cdot i + R \cdot \frac{T}{T - t} \cdot \left(\frac{I_i}{2} + i\right) - R \cdot \frac{T}{t} \cdot \left(\frac{I_i}{2} - i\right)$$

que es la llamada *ecuación de Arnold.*

La resolución de la ecuación de Arnold es difícil por desconocerse los valores e_2, i_1, i_2 y de las resistencias R_1 y R_2.

Aproximadamente puede escribirse que: $e_1 = 0$, $e_2 = 0$ y $R_b = 0$, con lo cual se tiene:

$$0 = R \cdot \frac{T}{T - t} \cdot \left(\frac{I_i}{2} + i\right) - R \cdot \frac{T}{t} \cdot \left(\frac{I_i}{2} - i\right)$$

dividiendo por R y despejando i, queda:

$$i = \frac{I_i}{2} \cdot \left(1 - 2\,\frac{t}{T}\right) = i_i \cdot \left(1 - 2\,\frac{t}{T}\right)$$

La variación de i es lineal (fig. 4.44).

Además, la corriente en la espira en cortocircuito depende sólo de las resistencias de contacto entre escobillas.

Esta conmutación es ideal y es a la que se debe tender a la hora de construir una máquina de corriente continua.

Los valores de las densidades de corriente son:

$$I_1 = \frac{i_1}{s_1}$$

$$I_2 = \frac{i_2}{s_2}$$

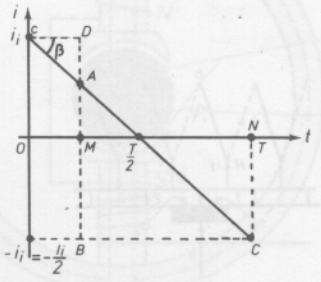


Fig. 4.44 Variación lineal de la intensidad.

No se producirán chispas si el $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ es lo menor posible, para un tiempo de t = T.

4.7.2 *Mejora del proceso de conmutación*

Para mejorar el proceso de conmutación hay que poner en práctica los siguientes puntos:

— colocar pocas espiras por bobina;

— interesa que el tiempo de conmutación sea lo mayor posible;

— las escobillas tienen que ser de un material tal que aumente la resistencia de contacto;

— puede hacerse una buena conmutación, si se utilizan arrollamientos de paso corto de ranuras;

— usar los bobinados escalonados en donde dos bobinas contiguas tienen lados inferiores en ranuras distintas, disminuyendo el efecto de inducción mutua;

— uso de polos de conmutación; la posibilidad de chispas en el colector debe contrarrestarse mediante el auxilio de polos de conmutación (fig. 4.45);

— finalmente, los devanados de compensadores ayudan no solamente en los problemas planteados por la conmutación sino que eliminan también la reacción del inducido.

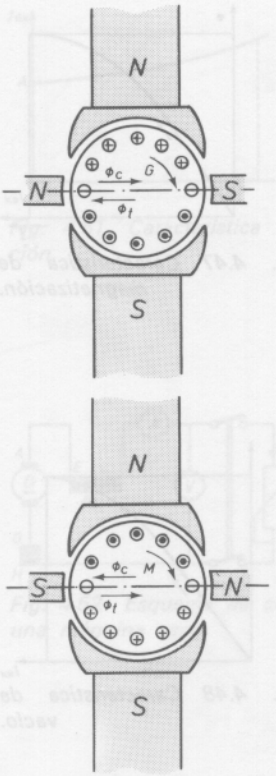


Fig. 4.45 Polos de conmutación.

4.8 Tipos de dinamos según su excitación

Atendiendo a la excitación, las máquinas de corriente continua pueden dividirse en:

Grupo de excitación. Grupo generador o convertidor en el cual el generador o los generadores suministran corriente continua que se utiliza principalmente para la excitación de las máquinas eléctricas.

Máquina magnetoeléctrica. Máquina en la cual el campo magnético está producido por un imán permanente.

Máquina de excitación interna. Máquina de colector en la cual el flujo principal se produce mediante uno de los circuitos del rotor al colector.

Máquina autoexcitada. Máquina que es capaz de producir ella misma su propia excitación.

Máquina de excitación independiente. Excitación producida por una corriente independiente de la máquina.

Máquina de excitación en derivación. Máquina cuya excitación es producida por una corriente derivada entre los bornes principales de la máquina.

Máquina de excitación en serie. Máquina cuya excitación se debe a la corriente del inducido o una fracción de la misma.

Máquina de excitación mixta. Está constituida por una bobina en derivación y otra en serie.

Excitación mixta aditiva (sustractiva). Excitación mixta aditiva en la cual el devanado en serie está calculado de manera tal que la diferencia de potencial en vacío entre los bornes de la máquina se mantenga con la carga nominal.

Excitación hipercompound (hipocompound) de un generador. Excitación mixta aditiva (sustractiva) en la cual el devanado en serie está calculado de manera que la diferencia de potencial entre los bornes de la máquina aumenta (disminuye) con la carga.

Excitación diferencial. Excitación con dos devanados recorridos por corrientes distintas y cuyas fuerzas magnetomotrices son de distinto sentido.

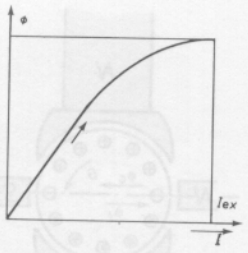


Fig. 4.47 Característica de magnetización.

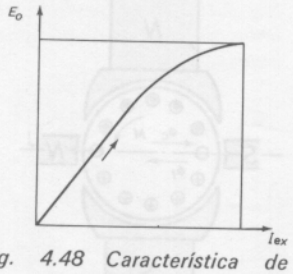


Fig. 4.48 Característica de vacío.

4.9 Máquina de corriente continua con excitación independiente. Característica en vacío

La excitación de la máquina se realiza con el auxilio de una fuente de alimentación exterior de corriente continua sensiblemente constante (fig. 4.46).

La regulación de flujo principal se hace mediante un reóstato colocado en serie con el bobinado inductor.

El flujo inductor depende de la fuerza magnetomotriz de los devanados inductores.

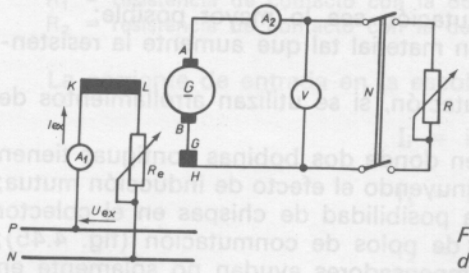


Fig. 4.46 Excitación independiente.

La representación gráfica de esta función está indicada en la figura 4.47, y se la llama *característica* o *curva de magnetización.*

Si la máquina tiene el circuito exterior abierto y gira a una velocidad constante, el valor de la fuerza electromotriz es igual a la tensión en bornes; este valor depende del flujo inductor. La característica magnética de la máquina se conoce con el nombre de *característica de vacío* (fig. 4.48).

La inducción de trabajo tiene que estar cerca de la zona de saturación.

La estabilidad de la máquina es mayor en esta zona que en la parte recta de la característica.

4.9.1 *Característica exterior de una máquina de c. c. con excitación independiente*

Viene representada por la variación de la tensión en bornes de la máquina en función de la corriente que suministra el generador, cuando la velocidad y la intensidad de excitación se mantiene constante (fig. 4.49).

$$U = f\ (I) \qquad v = \text{cte.} \qquad I_{ex.} = \text{cte.}$$

Al comenzar la prueba, el circuito exterior tiene que estar abierto.

Se excita la máquina de manera que la tensión señalada por el voltímetro *V* sea igual o ligeramente superior a la tensión de vacío.

Cerrado el interruptor *N* de carga y haciendo que la excitación de la máquina se mantenga constante, se anotan los valores leídos en el voltímetro *V* y en el amperímetro del circuito de carga.

Al aumentar la intensidad *I*, disminuye la tensión en bornes por aumento de la caída de tensión en el bobinado inducido de la máquina, en las escobillas y en los polos de conmutación.

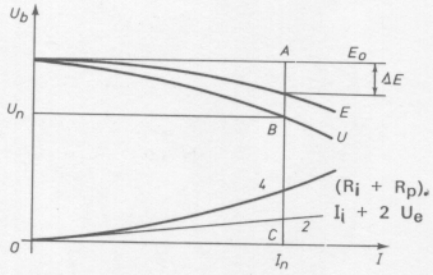


Fig. 4.49 Característica exterior y curvas de caídas óhmicas.

$$U = E_o - (R_i + R_p) \cdot I - 2\ U_e$$

Los efectos de reacción de inducido disminuyen también la tensión de salida de la máquina en un valor de $E_o - E = \Delta E$.

$$\boxed{U = E_o - (R_i + R_p) \cdot I - 2\ U_e - (E_o - E)}$$

Si se da distintos valores a la corriente de excitación de la máquina, se obtiene la familia de curvas de la figura 4.50.

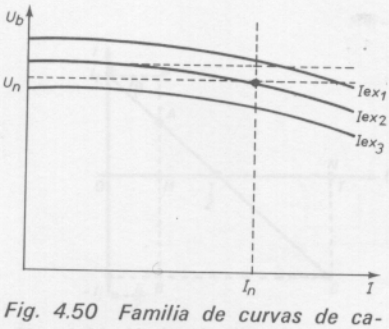


Fig. 4.50 Familia de curvas de características exteriores.

4.9.2 *Característica de regulación*

Representa la variación de la corriente de excitación en función de la intensidad de carga, manteniendo constante la tensión en bornes y la velocidad de la máquina.

$$I_{ex.} = f\ (I) \qquad U = \text{cte.} \qquad v = \text{cte.}$$

Conviene disponer de un segundo reóstato de excitación para conseguir una regulación más fina del valor de $I_{ex.}$.

Los amperímetros A_1 y A_2 comprueban las corrientes de excitación y de carga.

El voltímetro indica la tensión en bornes de la máquina.

Se excita la dinamo hasta conseguir, en circuito abierto, que la tensión V sea la de vacío, obteniendo el primer punto A de la curva característica. A continuación, se regula el reóstato de carga, de manera que la resistencia sea la mayor posible y, en consecuencia, nos dé una intensidad de salida muy débil.

Esta experiencia hace disminuir la tensión y la velocidad de la máquina, por lo cual se varían los reguladores de velocidad de motor de arrastre de la dinamo y el reóstato de campo para mantener constante la tensión en bornes y la velocidad.

Los resultados obtenidos de I e $I_{ex.}$ se anotan según queda indicado en la figura 4.51.

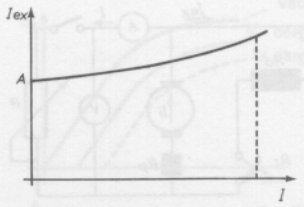


Fig. 4.51 Característica de regulación.

4.10 Máquina de corriente continua con excitación en serie

En esta máquina el devanado inductor está conectado en serie con el inducido (fig. 4.52); por tanto, se verifica la igualdad:

$$I_{ex.} = I_{carga}$$

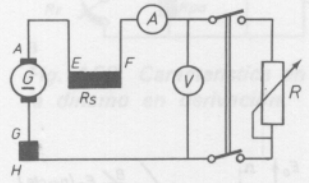


Fig. 4.52 Esquema de conexión de una máquina serie.

Las pérdidas por efecto Joule en el inductor son muy pequeñas debido a la pequeña resistencia del bobinado inductor.

El funcionamiento en vacío I = 0 supone que $I_{ex.} = 0$, lo que indica que la dinamo en serie no puede autoexcitarse en vacío.

La característica de vacío $E_o = f(I_{ex.})$ sólo puede obtenerse separando el devanado inductor del inducido de excitación independiente y excitando la máquina con una fuente de alimentación de corriente continua exterior.

Esta característica viene representada en la figura 4.53.

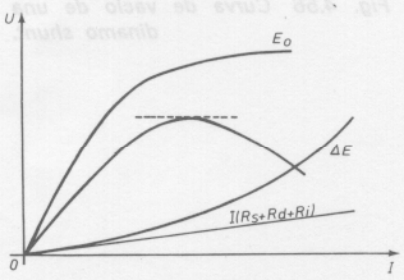


Fig. 4.53 Característica de vacío y de reacción de inducido de la máquina serie.

4.10.1 *Característica exterior de una máquina de c. c. con excitación en serie*

La curva corresponde a la gráfica U = f (I) siempre que la velocidad de la máquina se mantenga constante.

La tensión en bornes es:

$$U = E_o - (R_i + R_p + R_s)\, I - 2\, U_e$$

teniendo que la caída de tensión por reacción del inducido vale ΔE, se tiene:

$$\boxed{U = E - \Delta E - (R_i + R_p + R_s)\, I - 2\, U_e}$$

La figura 4.54 viene determinada por:

— curva 1, excitación en vacío;
— curva 2, reacción del inducido;
— curva 3, caída de tensión de la máquina;
— curva 4, característica exterior.

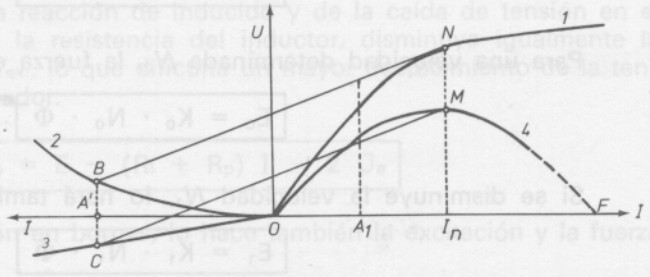


Fig. 4.54 Característica exterior de la dinamo serie.

Se observa en la característica que, a partir del punto M para una intensidad I_n, la curva desciende y el valor de la tensión en bornes disminuye a medida que aumenta la intensidad en el circuito de carga.

Si la tensión U se hace cero, la intensidad OF es muy grande; se dice entonces que estamos en la zona de cortocircuito.

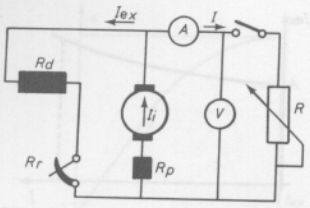


Fig. 4.55 Esquema de conexión de una máquina derivación.

La excitación inicial de la máquina viene determinada por el pequeño imán permanente que está colocado en los polos inductores.

Si al cerrar el circuito exterior se aprecia una disminución de la tensión, es señal de que la máquina se está desmagnetizando y, por tanto, debilitando el campo remanente en lugar de reforzarse.

Se corrige este error invirtiendo la conexión del devanado inductor.

4.11 Dinamo con excitación en derivación. Máquina shunt

La excitación en esta máquina está producida por una corriente derivada entre sus bornes principales (fig. 4.55).

El devanado inductor está constituido por un gran número de espiras de muy poca sección.

Al trazar la característica de vacío, el devanado inductor se alimenta mediante el empleo de una batería de acumuladores. Como la tensión en bornes del generador es constante, la intensidad de excitación debe también permanecer constante durante el período de la prueba.

Al ser la resistencia del inductor muy grande, es preciso que el reóstato tenga idénticos valores con objeto de poder regular ampliamente la excitación de la máquina.

Si la máquina es autoexcitada, debe poseer un cierto magnetismo remanente, y el sentido de giro ha de ser el correcto ya que, con una maniobra falsa, la excitación se debilitaría y el campo remanente se desexcitaría no produciéndose fuerza electromotriz alguna.

Trabajando el generador en vacío, la intensidad de excitación $I_{ex.}$ suele tener un valor de $I_{ex.} = (1{,}5\ \% - 3{,}5\ \%)\ I$.

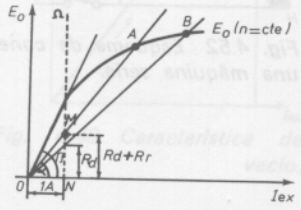


Fig. 4.56 Curva de vacío de una dinamo shunt.

La curva de vacío de la f. e. m. inducida en función de la corriente de excitación (fig. 4.56):

$$E_o = f\ (I_{ex.})$$

El consumo de tensión lo determina la expresión $U_{ex.} = I_{ex.}\ (R_d + R_r)$, y se representa por una recta que nace del origen de ordenadas. Al variar la resistencia de excitación, se obtienen diferentes fuerzas electromotrices y la $tg\ \alpha = R_d + R_r$ que queda reflejada en el proceso, de manera que si $R_r = 0$, la pendiente es mínima en el punto *B* de la curva, y los valores de la corriente de excitación y la f. e. m. de la máquina son máximos, supuesto naturalmente que R_d es constante.

4.11.1 *Influencia de las variaciones de velocidad*

El valor de la f. e. m. de una dinamo viene dado por la expresión:

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \cdot N \cdot \Phi$$

si hacemos que $\frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60}$ sea constante, queda:

$$\boxed{E = K \cdot N \cdot \Phi}$$

Para una velocidad determinada N_o, la fuerza electromotriz en vacío vale:

$$\boxed{E_o = K_o \cdot N_o \cdot \Phi}$$

Si se disminuye la velocidad N_1, lo hará también la f. e. m.

$$\boxed{E_1 = K_1 \cdot N_1 \cdot \Phi}$$

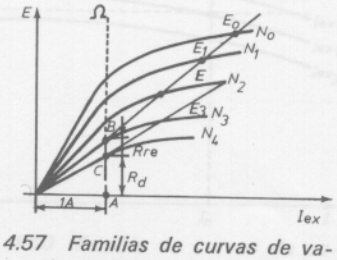


Fig. 4.57 Familias de curvas de vacío a diferentes velocidades.

Como quiera que toda disminución de la tensión origina un decrecimiento de la intensidad de excitación y del flujo inductor, se deduce (fig. 4.57) que, si el decrecimiento de la velocidad de la máquina es muy grande, la curva de vacío y la recta de resistencia del inductor se confunden.

La característica en el punto *B* es inestable y la velocidad del generador es crítica, de manera que, si el número de revoluciones de la máquina decrece a un valor N_4, la dinamo no puede excitarse.

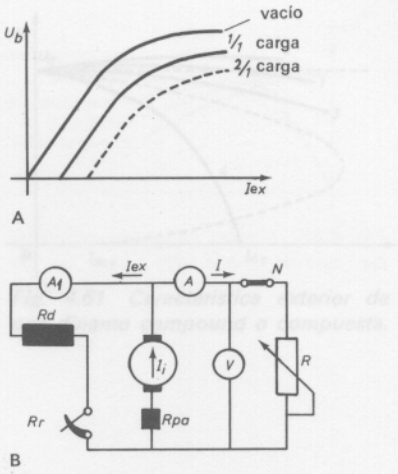


Fig. 4.58 Característica en carga de la dinamo en derivación.

4.12 Generador en derivación en carga. Característica exterior

a) *Característica de carga*

La característica en carga (fig. 4.58A) viene dada por la tensión en bornes en función de la intensidad de excitación, manteniendo constante la velocidad de la máquina y la intensidad.

$$U = f\ (I_{ex.}) \qquad v = cte. \qquad I = cte.$$

La intensidad que circula por el inducido vale:

$$I_i = I + I_{ex.}$$

Cerrando el interruptor *N* del circuito exterior (fig. 4.58B) y con una intensidad de carga constante, se regulan los reóstatos *R* y R_r para obtener los puntos de característica, de manera que el amperímetro A_1 de excitación y el voltímetro *V* marquen los valores adecuados para la construcción de la curva.

b) *Característica externa*

Viene estudiada por la variación de la tensión en bornes en función de la intensidad de carga, permaneciendo constante la velocidad de la máquina y la resistencia de excitación.

$$U = f\ (I) \qquad v = cte. \qquad R_d + R_r = cte.$$

La excitación no permanece constante, pues ello implicaría que la suma de las dos resistencias consideradas deberían variar.

Sólo si la tensión en bornes permaneciese constante, podría hacerse que la intensidad de excitación $I_{ex.}$ también lo fuese.

Por tanto, se estudia aquí la característica externa para un valor constante de la resistencia del circuito inductor (fig. 4.59).

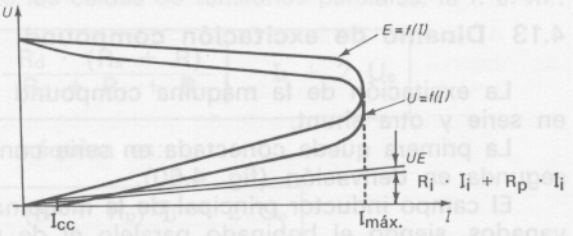


Fig. 4.59 Característica externa.

Al aumentar la carga irá decreciendo la tensión en bornes de la máquina, como consecuencia de la reacción de inducido y de la caída de tensión en el mismo. Al ser constante la resistencia del inductor, disminuye igualmente la intensidad de excitación $I_{ex.}$, lo que dificulta un mayor decrecimiento de la tensión de salida del generador.

$$\boxed{U_b = E - (R_i + R_p)\ I_i - 2\ U_e}$$

Al disminuir la tensión en bornes, lo hace también la excitación y la fuerza electromotriz:

$$I_{ex.} = \frac{U_b}{R_d + R_r}$$

La característica externa de una dinamo shunt presenta un curso decreciente superior al de la máquina de excitación independiente.

Los puntos que merecen especial atención en la curva son:

— Resistencia de carga R (crítica), valor por el cual la intensidad de carga comienza a descender.

— Intensidad máxima (corriente crítica), valor máximo que alcanza la intensidad de la máquina.

— Corriente de cortocircuito I que se tiene cuando el valor de la intensidad de excitación y la tensión en bornes de la máquina son cero.

Si a la característica externa se le suma la caída de tensión interna de la máquina $U = R_i \cdot I_i + R_p \cdot I_i$, más la tensión debida a la acción de las escobillas $2\ U_e$, se tiene la característica interna de la máquina.

La dinamo shunt en su funcionamiento es estable por disminuir la tensión en bornes a medida que aumenta la intensidad de carga.

4.12.1 *Tensiones y corrientes en una dinamo shunt*

La f. e. m. en una dinamo shunt viene expresada por

$$E = K \cdot n \cdot \Phi = \left[R_i + R_p + \frac{(R_d + R_r) \cdot R}{R_d + R_r + R} \right] \cdot I_i + 2\ U_e$$

La tensión en bornes de la máquina tiene un valor de:

$$U = E - (R_i + R_p) \cdot I_i - 2\ U_e$$

Se cumple también que

$$U = (R_r + R_d) \cdot I_{ex.} = R \cdot I$$

La intensidad total del generador es:

$$I_i = I + I_{ex.}$$

El valor de la intensidad de carga y el de excitación valen:

$$I = \frac{U}{R} \qquad I_{ex.} = \frac{U}{R_r + R_d}$$

4.13 Dinamo de excitación compound

La excitación de la máquina compound consta de una bobina inductora en serie y otra shunt.

La primera queda conectada en serie con el inducido de la máquina, y la segunda en derivación (fig. 4.60).

El campo inductor principal de la máquina está producido por los dos devanados, siendo el bobinado paralelo el de mayor excitación.

Los devanados pueden conectarse de manera que los flujos producidos por ambos se sumen, con lo cual se tiene la máquina compound normal, o que

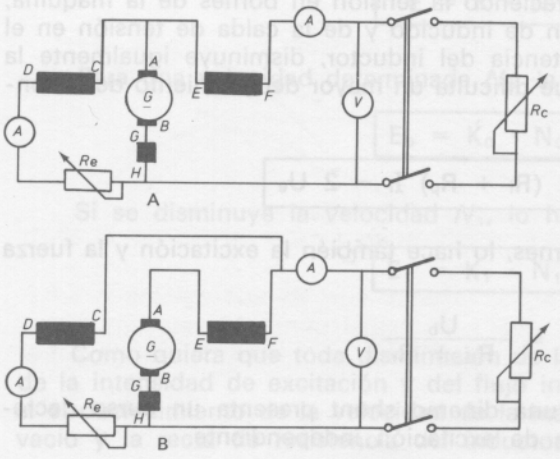


Fig. 4.60 Conexión de la dinamo de excitación compound.

se resten, en cuyo caso al devanado en serie se le denomina anticompound o compound diferencial.

La característica en vacío se obtiene alimentando el devanado en derivación con una fuente externa, o también mediante la autoexcitación empleando solamente el devanado en derivación; en ambos casos, su estudio es análogo a la máquina shunt.

$$E_o = f\,(I_{ex.}) \qquad I = 0 \qquad v = \text{cte.}$$

Característica exterior

La composición de los ampervueltas de los generadores shunt y en serie adecuadamente combinados pueden dar las ventajas que en carga tienen cada una de estas máquinas, para obtener la dinamo compound con una característica de curso sensiblemente horizontal.

La idea de la composición de las dos máquinas es lograr una tensión de salida constante entre las zonas de vacío y carga. Se vio cómo, en la característica exterior de una dinamo en serie, la curva presentaba una zona ascendente; y en la shunt, la característica descendía sensiblemente; con ambas combinadas resulta la curva de característica exterior de la figura 4.61.

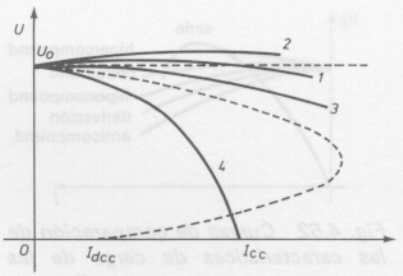


Fig. 4.61 Característica exterior de una dinamo compound o compuesta.

4.13.1 *Estudio de corrientes y tensiones en la dinamo compound*

En la dinamo compound, en conexión corta, la resistencia combinada de los dos circuitos paralelos y el circuito serie tienen por expresión:

$$R_C = \frac{R_d \cdot (R_s + R)}{R_d + R_s + R}$$

La resistencia total valdrá:

$$R_i + R_p + \frac{R_d \cdot (R_s + R)}{R_d + R_s + R}$$

La fuerza electromotriz generada en el inducido tiene por valor:

$$E = K \cdot n \cdot \Phi$$

y, si el cálculo se realiza mediante las caídas de tensiones parciales, la f. e. m.:

$$E = \left[R_i + R_p + \frac{R_d \cdot (R_s + R)}{R_d + R_s + R} \right] \cdot I_i + 2\,U_e$$

La tensión en bornes de la máquina es:

$$V_b = E - (R_i + R_p)\,I_i - 2\,U_e$$

La intensidad de corriente en la máquina en derivación corta vale:

$$I_i = I + I_{ex.}$$

la corriente I de carga circula por el bobinado en serie.

En la dinamo en conexión larga, la intensidad tiene la misma expresión; el valor de I_i es la intensidad que circula por el bobinado en serie.

4.14 Ventajas e inconvenientes de la dinamo en serie, derivación y compound

a) *Serie*

La tensión en bornes aumenta al crecer la intensidad de corriente de carga; por tanto, la dinamo serie es una máquina inestable.

Para ponerla en marcha es necesario cortocircuitar los bornes de salida.

La dinamo en serie apenas se construye, ya que sus aplicaciones son muy reducidas; sin embargo, como motor de c. c. tiene gran aplicación en tracción eléctrica y aparatos de elevación, como se verá en el tema de los motores.

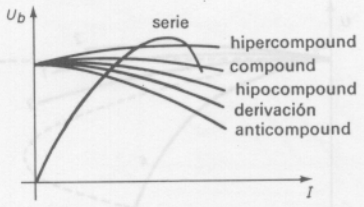


Fig. 4.62 Curvas de comparación de las características de carga de las dinamos.

b) *Derivación*

Es una máquina estable; disminuye la tensión en bornes al aumentar la intensidad de carga.

Presenta el inconveniente de variar algo el valor de la tensión a consecuencia de las oscilaciones de carga.

Para la puesta en marcha, es necesario abrir el circuito exterior. Se obtiene, con esto, que no haya corriente de carga, para que fácilmente se pueda excitar la máquina.

Los cortocircuitos bruscos en las dinamos son muy peligrosos, y ello impone la obligación de proteger las máquinas mediante cortacircuitos o, mejor, interruptores automáticos rápidos o extrarrápidos.

c) *Compound*

La máquina compound se emplea casi exclusivamente para excitar los alternadores, y en redes de tracción eléctrica.

Al ponerla en marcha, es necesario abrir el circuito exterior antes de iniciar la puesta en servicio.

Para comparar gráficamente las máquinas estudiadas relacionando la tensión con la carga, bastará fijarse en la figura 4.62.

4.15 Acoplamiento de las dinamos

En las horas punta (fig. 4.63) el consumo de energía por los receptores es muy grande, y los generadores trabajan a plena carga. Resulta útil entonces disponer varias dinamos acopladas en derivación para poder tener seguridad en el servicio.

Si un solo generador tiene que aportar la potencia total en las horas punta, la carga de la máquina es muy grande y, cuando se tienen receptores desconectados de la red, la energía suministrada es menor, como consecuencia de un menor consumo, y el generador trabaja con rendimiento muy bajo.

Por otra parte, periódicamente hay necesidad de revisar, limpiar, cuando no reparar alguna avería, lo que imposibilitaría materialmente dar servicio al disponer de un solo generador. Por ello, surge la necesidad de que la potencia suministrada sea repartida por varios generadores acoplados en derivación.

4.15.1 *Acoplamiento de generadores con excitación independiente*

Al acoplar a la red una máquina de excitación independiente (fig. 4.64), se observa:

1.º Las tensiones de ambas máquinas deben ser iguales; si ocurre lo contrario, existe una corriente de circulación entre ambos generadores cuyo valor $I_c = \frac{E_1 - E_2}{\Sigma R}$ es perjudicial para el buen funcionamiento.

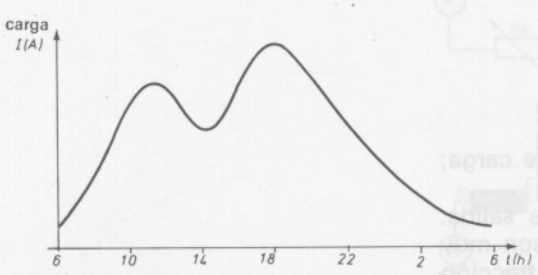


Fig. 4.63 Curva horas punta según la carga.

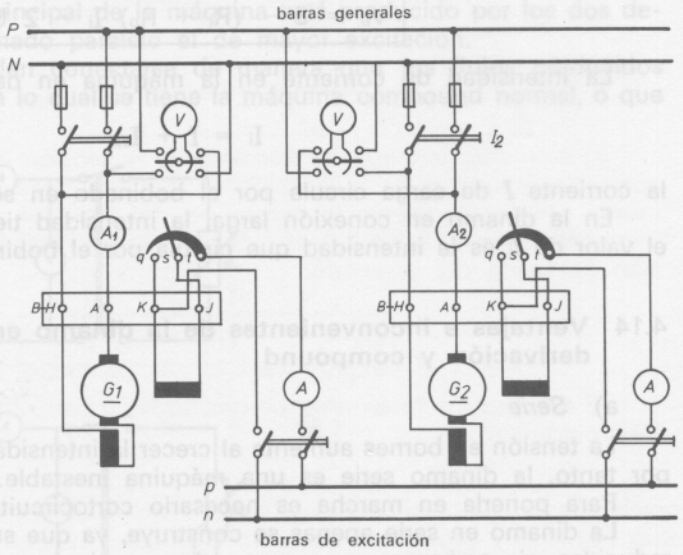


Fig. 4.64 Acoplamiento en paralelo de dos dinamos de excitación independientes.

2.º Las tensiones tienen que estar en oposición, pues de lo contrario habría fuertes y peligrosos cortocircuitos.

Si G_1 está conectada a la red y se desea acoplar G_2, debe observarse lo siguiente:

a) Se pone en marcha el motor que acciona G_2, de manera que gire al número de revoluciones por minuto establecido por el propio generador en régimen normal.

b) Usando el reóstato de campo de G_2, se excita la máquina hasta que la tensión en bornes de la misma sea igual a la marcada por el voltímetro V de la red.

c) Se acciona el interruptor I_2, conectando el generador a línea.

d) Para que G_2 ceda energía a la red, se regula la excitación de la máquina hasta que el amperímetro A_2 indique una corriente de carga adecuada suministrada por el generador.

Una vez que G_2 entra en servicio, G_1 queda descargado.

Para repetir adecuadamente la carga, se maniobra finalmente sobre las dos excitaciones, de tal manera que cada generador entregue la intensidad deseada según su potencia, y la tensión de la red se mantenga constante.

4.15.2 *Acoplamiento en paralelo de generadores en serie*

El acoplar generadores en serie (fig. 4.65) para el suministro de energía no se utiliza nunca, por su gran inestabilidad; tiene, eso sí, aplicación en el frenado para máquinas de tracción y grandes motores de corriente continua (excitación serie), en donde se necesita un gran par de arranque.

4.15.3 *Acoplamiento en paralelo de generadores shunt*

El acoplamiento de generadores shunt se ejecuta del mismo modo que en caso de excitación independiente.

Para que estas máquinas trabajen en buenas condiciones, es preciso que sus características externas sean análogas, a fin de que el reparto de carga de ambas sea proporcional a la potencia nominal de cada generador.

Supongamos que los dos generadores de la figura 4.66 tienen diferente característica.

En la máquina G_1 el descenso de la característica externa varía más rápidamente que la G_2 (fig. 4.67). La intensidad total que suministran los dos generadores no se distribuye por partes iguales.

La potencia debe repartirse de forma que la máquina G_2 quede más cargada que la G_1.

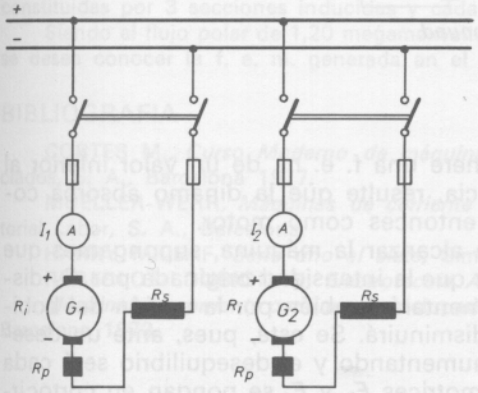


Fig. 4.65 Acoplamiento en paralelo de dos dinamos serie.

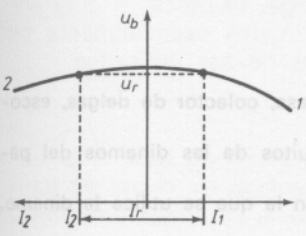


Fig. 4.67 Curva de equilibrio de carga.

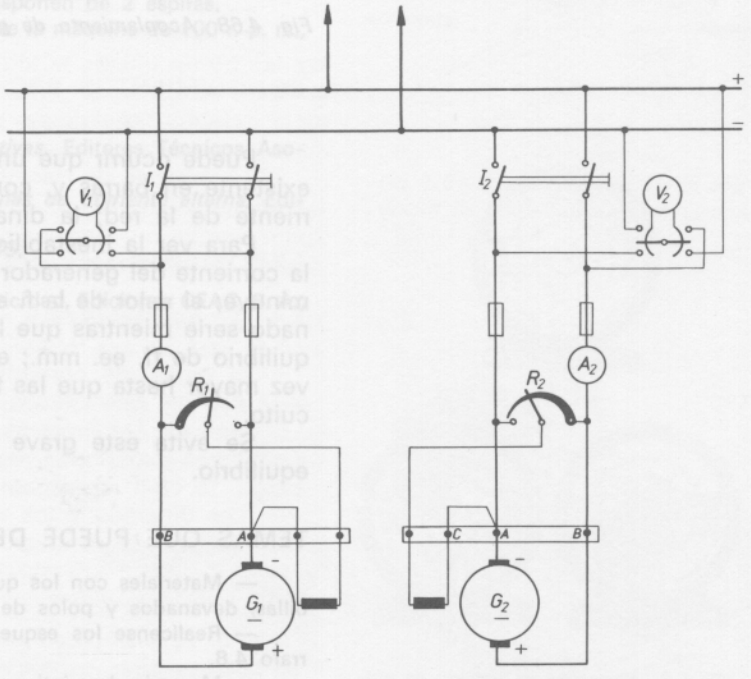


Fig. 4.66 Acoplamiento en paralelo de dos generadores shunt.

Para conseguir un mejor reparto de la intensidad, bastará regular las excitaciones de las máquinas aumentando $I_{ex.\,1}$ en el generador G_1 y disminuyendo la corriente de excitación en G_2, siempre que se mantenga constante la tensión de salida.

Para evitar este ajuste, lo útil es colocar máquinas que tengan idéntica característica exterior.

Para desconectar de la red una máquina, se procede a la inversa, o sea, se debilita la corriente de excitación hasta anular el valor de la intensidad de carga y, en este preciso instante, se abre el interruptor general de barras y se desconecta la excitación de la máquina.

La turbina o motor de arrastre del generador debe pararse cuando han sido ejecutadas el resto de maniobras.

4.15.4 *Acoplamiento de generadores compound*

Estos generadores, al ser acoplados en derivación los arrollamientos serie, deben unirse mediante un conductor de equilibrio entre las puntas comunes de las escobillas (fig. 4.68).

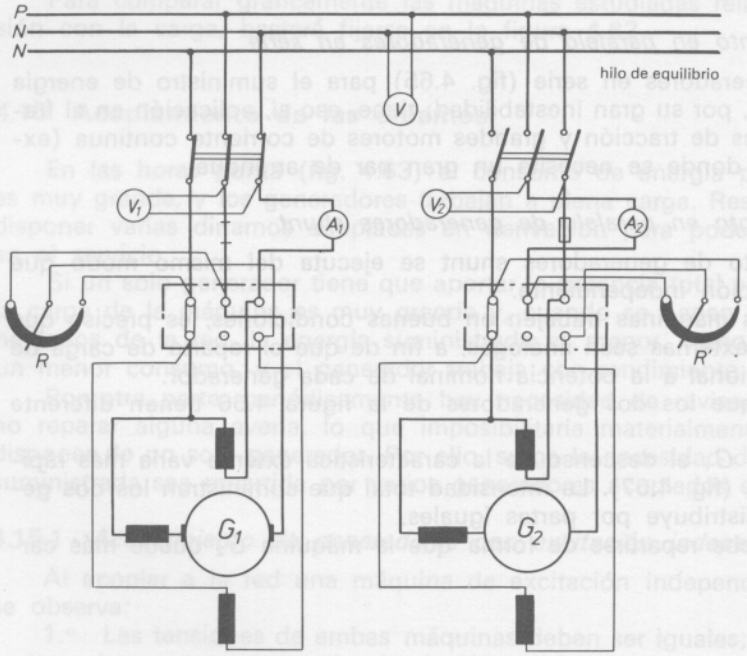


Fig. 4.68 Acoplamiento de generadores compound.

Puede ocurrir que una máquina genere una f. e. m. de un valor inferior al existente en barras y, como consecuencia, resulte que la dinamo absorba corriente de la red; la dinamo funciona entonces como motor.

Para ver la inestabilidad que puede alcanzar la máquina, supongamos que la corriente del generador G_2 aumenta y que la intensidad originada por G_1 disminuye; el valor de la f. e. m. de E_2 aumentará también por la acción del bobinado serie mientras que la f. e. m. E_1 disminuirá. Se está, pues, ante un desequilibrio de ff. ee. mm.; el proceso irá aumentando y el desequilibrio será cada vez mayor hasta que las fuerzas electromotrices E_1 y E_2 se pongan en cortocircuito.

Se evita este grave problema de inestabilidad mediante el conductor de equilibrio.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Materiales con los que se fabrican el armazón o carcasa, colector de delgas, escobillas, devanados y polos de una dinamo.

— Realícense los esquemas correspondientes a los circuitos de las dinamos del párrafo 4.8.

— Memoria descriptiva de alguna instalación industrial en la que se utilice la dinamo.

CUESTIONARIO

4.1 ¿Para qué sirve el colector de delgas?

4.2 ¿Qué factores intervienen en la f. e. m. de una dinamo?

4.3 ¿La dinamo puede producir corriente alterna?

4.4 ¿Qué sucedería si las escobillas no estuvieran colocadas en la zona neutra?

4.5 ¿Quién produce el flujo de reacción?

4.6 Si aumenta la velocidad en la dinamo, ¿qué le ocurre a la f. e. m.?

4.7 ¿Qué diferencia hay entre la característica en vacío y la característica en carga en una dinamo shunt?

4.8 ¿Qué diferencia hay entre los polos de conmutación y los polos principales?

4.9 El inducido de una dinamo serie tiene 208 espiras; la resistencia es de 0,07 Ω y la resistencia del devanado de los inductores es de 0,8 Ω. El inducido gira a 900 r. p. m. y suministra 80 A a 100 V de tensión en los bornes, siendo $\frac{a}{p} = 1$, hallar:

a) La f. e. m.

b) El flujo.

c) La potencia perdida por calentamiento en el inducido.

d) La potencia perdida por calentamiento en los inductores.

e) El rendimiento eléctrico.

4.10 Una dinamo shunt tiene una resistencia en el inducido de 0,04 Ω y 20 Ω en los inductores; suministra una corriente de 20 A con una tensión en bornes de 65 V, hallar:

a) La intensidad de la corriente en los inductores.

b) La intensidad de la máquina.

c) La f. e. m. del inducido.

d) La pérdida de potencia por calentamiento en el inducido.

e) La pérdida de potencia por calentamiento en el inductor.

f) El rendimiento eléctrico.

4.11 Calcular una dinamo compound capaz de suministrar 100 A al circuito exterior, con una tensión en los bornes de 120 V. Las pérdidas por calor deberán ser de 12,5 % en el inducido, 2,5 % en el arrollamiento inductor en derivación y 1 % en el arrollamiento inductor en serie. Hallar:

a) Las pérdidas totales por efecto Joule.

b) La resistencia del devanado inductor en serie.

c) La tensión en las escobillas.

d) La intensidad en el devanado inductor.

e) La resistencia del arrollamiento derivación.

f) La intensidad del inducido.

g) La resistencia del inducido.

h) La f. e. m. del inducido.

4.12 Una dinamo compound en derivación corta genera en su bobinado inducido una f. e. m. de 400 V. Las resistencias de sus bobinados son: inducido 0,30 Ω, polos auxiliares 0,2 Ω, bobinado principal serie 0,2 Ω, bobinado principal shunt 285 Ω. Siendo la resistencia exterior de 14,8 Ω, calcular las intensidades, tensiones y potencia útil de la dinamo.

4.13 El inducido de una dinamo hexapolar dispone de 69 ranuras, las bobinas están constituidas por 3 secciones inducidas y cada una de estas disponen de 2 espiras.

Siendo el flujo polar de 1,20 megamaxvelio y la velocidad de la máquina de 100 r. p. m., se desea conocer la f. e. m. generada en el inducido.

BIBLIOGRAFIA

CORTES M., *Curso Moderno de máquinas eléctricas rotativas,* Editores Técnicos Asociados, S. A., Barcelona 1977.

MOELLER-WERR, *Máquinas de corriente continua. Máquinas de corriente alterna,* Editorial Labor, S. A., Barcelona.

HARRY MILEAF, *Serie uno al siete,* Simusa, México 1975.

ROBERLOT-LOUBIGNAN, *Electrotecnia Aplicada.*

Máquinas de corriente continua, Enciclopedia CEAC de Electricidad, Ediciones CEAC, S. A., Barcelona 1973.

Tema 5. **Motores de corriente continua**

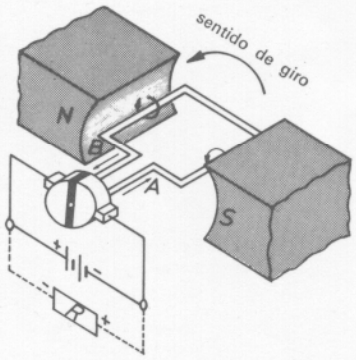


Fig. 5.1 Dinamo y motor de corriente continua.

OBJETIVOS

— *Conocer el funcionamiento eléctrico de un motor de corriente continua.*
— *Diferencia entre los motores, serie, derivación y compound.*
— *Misión de los arrancadores para esta clase de motores.*
— *Saber discernir en un motor compound los diferentes sistemas de conexiones en la excitación de la máquina.*

GUION

— Generalidades.
— Principio de funcionamiento de un motor de c. c.
— Conmutación y reacción de inducido.
— Fuerza contraelectromotriz.
— Par y potencia nominal.
— Tipos de motores según excitación.
— Sistemas de arranque de los motores de c. c.
— Características de funcionamiento de los motores de c. c.
— Control de la velocidad de los motores de c. c.

PUNTOS CLAVE

— Fuerza contraelectromotriz.
— Par del motor.
— Tipos de excitación.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Inducción eléctrica. Procedimientos de inducción.
— Simbología normalizada de máquinas eléctricas.
— Concepto de mecánica de par.

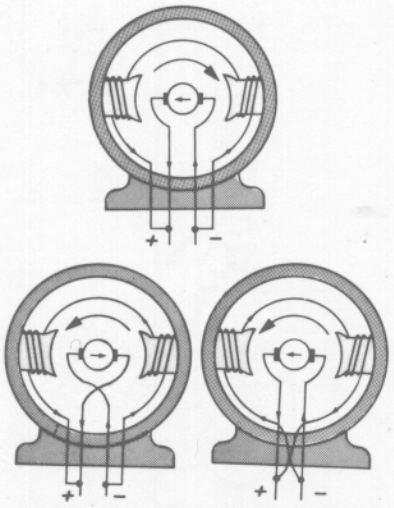


Fig. 5.2 Inversión de sentido de giro de un motor de c. c.

EXPOSICION DEL TEMA

5.1 Generalidades

El motor de corriente continua es una máquina que convierte la energía eléctrica en movimiento rotatorio con el fin de producir un trabajo útil.

Hoy día los motores de c. c. han tomado gran auge por sus características peculiares de admitir regulación de velocidad aun con grandes diferencias de carga, lo cual representa un gran logro en la tecnología eléctrica.

Las dinamos y los motores de c. c. están constituidos esencialmente por los mismos dispositivos, diferenciándose en la forma de ser utilizados.

5.1.1 *Reversibilidad*

Por *reversibilidad* entre el motor y la dinamo se entiende que, si al rotor se le hace girar, produce en el bobinado inducido una f. e. m. capaz de transformarse en energía en el circuito de carga. En cambio, si se aplica una tensión

continua al mismo bobinado de la dinamo a través del colector de delgas, el comportamiento de la máquina ahora es de motor, capaz de transformar la f. c. e. m. en energía mecánica (fig. 5.1).

En ambos casos el inducido está sometido a la acción del campo inductor principal.

5.1.2 *Inversión de sentido de giro*

La inversión de sentido de giro en un motor de c. c. depende de que tenga la corriente en el inductor e inducido.

Si se invierte el sentido del campo magnético o la corriente en el inducido, el giro del motor cambia también; pero, si se permuta la polaridad en ambos bobinados, el eje del motor gira en el mismo sentido (fig. 5.2).

Todos los cambios de polaridad de los bobinados, tanto en el inductor como en el inducido, se realizan en la caja bornes de la máquina.

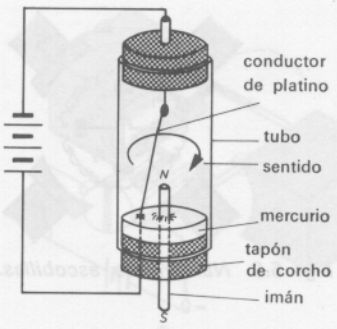


Fig. 5.3 Motor Faraday.

5.2 Principio de funcionamiento de un motor de corriente continua

La experiencia que llevó a cabo Faraday introduciendo un conductor eléctrico en un tubo que contenía mercurio y una barra de imán, le permitió descubrir la acción que producen el campo del imán y el de la corriente eléctrica al circular por el conductor. Comprobó cómo en estas circunstancias el extremo inferior del hilo en contacto con el mercurio describía un movimiento circular (fig. 5.3).

Esta experiencia, perfeccionada posteriormente, ha servido de base científica para el estudio del motor eléctrico de corriente continua.

Las dos causas capaces de imprimir movimiento al conductor en la experiencia de Faraday son: el imán, y el campo originado por la corriente que atraviesa el conductor.

Para averiguar el sentido del campo producido por la intensidad de corriente, basta aplicar la regla de la mano izquierda (fig. 5.4), si se establece el criterio de la dirección de la corriente electrónica; o la de la mano derecha, si es el sentido convencional.

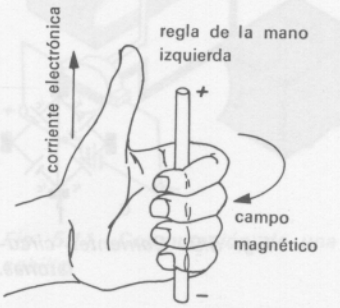


Fig. 5.4 Regla de la mano izquierda.

El desplazamiento sufrido por el conductor es consecuencia del aumento de densidad de líneas de fuerza que se acumulan en la zona del campo, donde se suman la acción del flujo principal y la del propio conductor, mientras que disminuyen en la parte opuesta (fig. 5.5). Observando la figura, se concluye que el conductor es empujado por las líneas de fuerza donde se ha acumulado mayor densidad, y que en su desplazamiento sigue la dirección hacia la zona de menor número de líneas de fuerza.

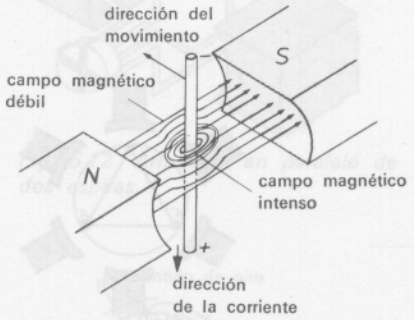


Fig. 5.5 Desplazamiento de un conductor bajo la acción de un campo.

5.2.1 *Motor elemental de corriente continua*

Si se dispone de una espira que gire libremente por la acción de un campo magnético producido por un imán y se hace que circule una corriente continua por la espira, la acción de ambos flujos produce un movimiento circular, cuyo sentido se establece aplicando la regla de los tres dedos de la mano izquierda, si el sentido de la corriente es el convencional.

El motor de corriente continua (fig. 5.6) es análogo al generador elemental ya estudiado, y los dispositivos constituyentes del mismo son: un campo magnético producido por un imán o electroimán, un conmutador o colector de delgas, las escobillas y la espira.

Circulando la corriente por la espira por la acción del campo fijo, las líneas del flujo interactúan en ambos lados de la espira, haciendo que en ésta se formen dos fuerzas paralelas en sentido contrario.

Ambas fuerzas constituyen lo que en Física se llama *par* (fig. 5.7), y determinan la energía que puede comunicar la espira al eje del motor. Al aumentar el número de espiras de la máquina, mayores serán el par y, por tanto, el valor de la f. c. e. m. y el trabajo que pueda desarrollar el motor.

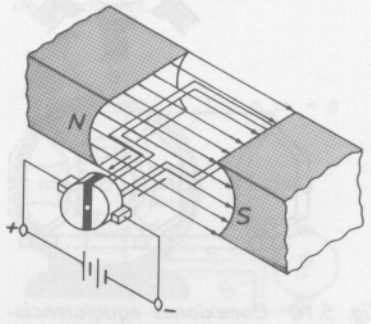


Fig. 5.6 Motor de c. c. elemental.

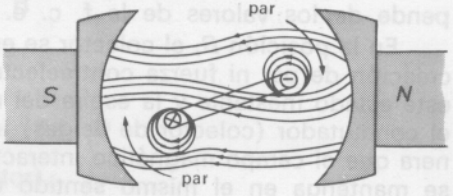


Fig. 5.7 Acción de dos campos en un conductor. Par.

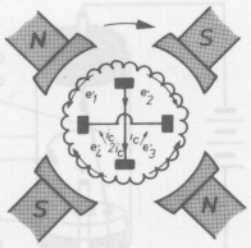


Fig. 5.8 Número de escobillas.

Al igual que en el generador elemental, el colector de delgas desempeña un papel importantísimo.

El rotor del motor no girará si la inversión de corriente no se realiza en el preciso instante en que los dos lados activos de la espira dejan de enfrentarse a los polos principales. Esta zona es la llamada *línea neutra.*

5.2.2 *Número de escobillas de una máquina de corriente continua*

Las escobillas deben poner en cortocircuito todas las bobinas situadas en la zona neutra. Si la máquina tiene dos polos, tenemos también dos zonas neutras. En consecuencia, el número total de escobillas ha de ser igual al número de polos de la máquina. En cuanto a su posición, será coincidente con las líneas neutras de los polos (fig. 5.8).

5.2.3 *Corrientes circulatorias y conexiones de compensación*

Si por falta de contacto de las escobillas con el colector de delgas, defecto de construcción o desgaste de los cojinetes, etc., el inducido queda descentrado y, como consecuencia, el entrehierro en unos polos es mayor que en los otros, siendo el flujo mayor en una región que en la otra, la f. e. m. crece en una zona del inducido y disminuye en aquella cuyo valor de entrehierro es mayor.

Como consecuencia de esta disimetría de tensión, aunque el circuito del inducido trabaje en vacío, circulará una corriente i_c, motivada por la diferencia de potencial entre las escobillas diametralmente opuestas. Así, en la figura 5.9, la corriente penetra por A y se divide recorriendo el devanado hasta salir por la escobilla B.

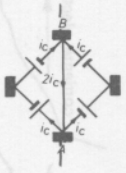


Fig. 5.9 Corrientes circulatorias.

A esta intensidad se le da el nombre de *corriente circulatoria.*

Cuando el circuito de carga está cerrado, se suma a la intensidad de régimen normal de la máquina, con lo que algunas ramas del bobinado inducido quedan más cargadas que otras.

Se evita este problema con la *conexión de compensación,* que es un conductor que une dos puntos del inducido y asegura la misma diferencia de potencial (d. d. p.).

Con este procedimiento se evita que la corriente circulatoria pase a través de las escobillas y quede sobrecargada la máquina al estar conectada al circuito exterior.

A estas conexiones se les llama también *conexiones equipotenciales* (figura 5.10).

5.3 Conmutación

Los problemas de la conmutación son iguales a los estudiados en el Tema 4.

Si el motor está formado por una espira, y se aplica una tensión continua a través de las escobillas, el colector de la figura 5.11 puede ocupar las cuatro posiciones indicadas.

En la posición A el par motor es normal, y el motor gira a una velocidad determinada por la interacción de los dos campos, el principal y el producido por la corriente que circula a través de la espira. El número de revoluciones viene determinado por la expresión

$$N = K \cdot \frac{E}{\Phi}$$

donde E es el valor de la fuerza contraelectromotriz, Φ el flujo principal producido por el campo principal, y K una constante que depende del número de espiras, polos que tiene el inductor y ramas en paralelo.

En este caso, como el número de espiras, pares de polos de la máquina y ramas en paralelo son la unidad, se deduce que el número de revoluciones depende de los valores de la f. c. e. m. y del flujo.

En la posición B, el colector se encuentra en la zona neutra; por ello no hay creación de par ni fuerza contraelectromotriz, pero la inercia de la espira vence este estado inestable y la espira del motor elemental ocupa la posición C; aquí el conmutador (colector de delgas) invierte la dirección de la corriente, de manera que el campo magnético interactúa con la espira para producir un par que se mantenga en el mismo sentido de giro del inducido del motor.

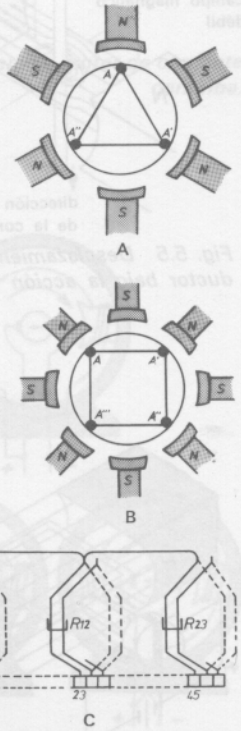


Fig. 5.10 Conexiones equipotenciales.

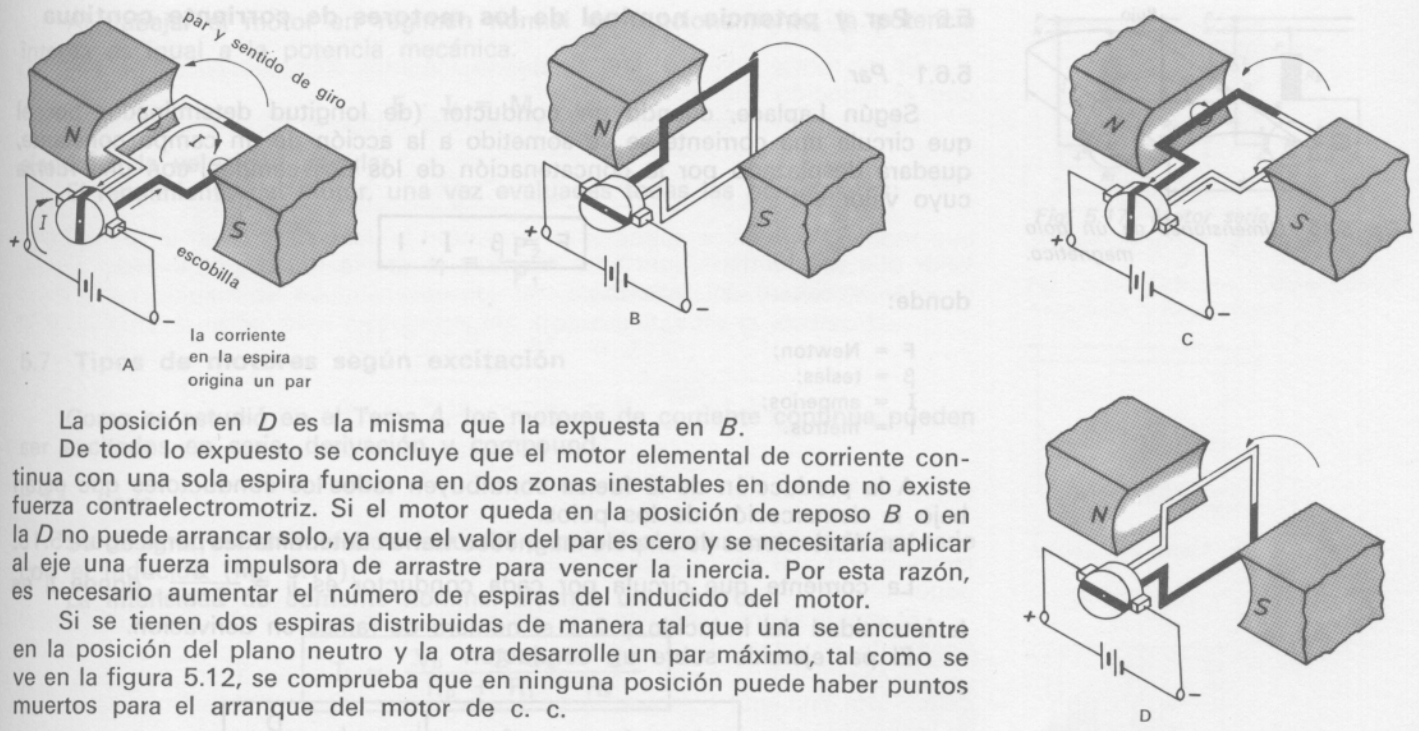


Fig. 5.11 Conmutación de una escobilla.

La posición en *D* es la misma que la expuesta en *B*.

De todo lo expuesto se concluye que el motor elemental de corriente continua con una sola espira funciona en dos zonas inestables en donde no existe fuerza contraelectromotriz. Si el motor queda en la posición de reposo *B* o en la *D* no puede arrancar solo, ya que el valor del par es cero y se necesitaría aplicar al eje una fuerza impulsora de arrastre para vencer la inercia. Por esta razón, es necesario aumentar el número de espiras del inducido del motor.

Si se tienen dos espiras distribuidas de manera tal que una se encuentre en la posición del plano neutro y la otra desarrolle un par máximo, tal como se ve en la figura 5.12, se comprueba que en ninguna posición puede haber puntos muertos para el arranque del motor de c. c.

5.4 Reacción de inducido

Al igual que en las dinamos, los motores de c. c. presentan los fenómenos de reacción de inducido y plantean los mismos problemas que aquéllas.

La reacción de inducido produce una deformación del campo magnético debido a los polos principales; esta desfiguración es de sentido contrario a la producida por el motor como generador.

El desplazamiento de la zona de conmutación en un motor es de sentido contrario al de su giro (fig. 5.13).

Las escobillas tienen que ser desplazadas angularmente, a partir de la zona neutra primitiva, en sentido contrario al giro del rotor, de manera que la producción de chispas sea mínima.

Los defectos que origina la reacción de inducido en los motores de c. c. pueden corregirse mediante el empleo de los devanados de compensación y los polos auxiliares, con objeto de mantener las escobillas en la posición de la línea neutra teórica entre los polos principales.

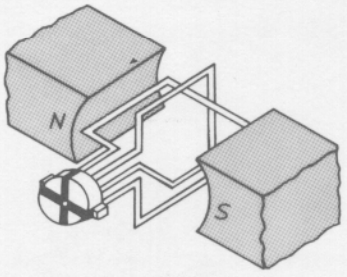


Fig. 5.12 Armadura en paralelo de dos espiras.

5.5 Fuerza contraelectromotriz

La f. e. m. que aparece en el inducido del motor al girar por la acción concatenada del campo inductor e inducido produce una tensión que se opone a la aplicada entre los terminales del inducido, y que depende de los mismos factores que la producida por el motor como generador.

Esta tensión, llamada f. c. e. m., será tanto mayor cuanto mayor sea el flujo magnético y la velocidad de rotación.

Si la fuerza contraelectromotriz se hace cero, se pone en peligro los bobinados del motor. La resistencia de éstos es del orden de 0,8 a 1,3 Ω y, como la intensidad alcanzada sería muy grande (intensidad de cortocircuito), podría quemarse el inducido de la máquina (fig. 5.14).

Se aprecia fácilmente lo expuesto con la expresión:

$$I_{cc} = \frac{V_b - 0}{\Sigma R}$$

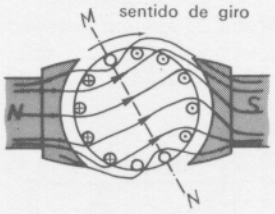


Fig. 5.13 Desplazamiento de la línea de escobillas.

Σ R es de un valor muy pequeño.

La f. c. e. m.:

$$E = \frac{p \cdot N}{a \cdot 60} \cdot n \cdot \Phi$$

y E_0 cuando N = 0 (frenado el motor).

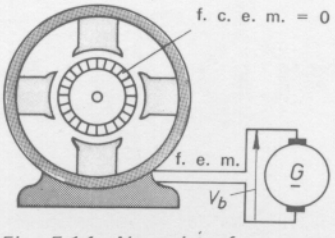


Fig. 5.14 No existe f. c. e. m.

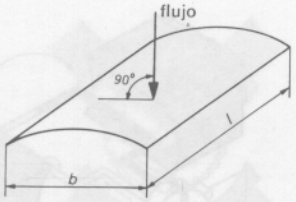


Fig. 5.15 Dimensiones de un polo magnético.

5.6 Par y potencia nominal de los motores de corriente continua

5.6.1 *Par*

Según Laplace, cuando un conductor (de longitud determinada) por el que circula una corriente se ve sometido a la acción de un campo constante, quedará desplazado por la concatenación de los dos campos, con una fuerza cuyo valor es:

$$F = \beta \cdot I \cdot l$$

donde:

F = Newton;
β = teslas;
I = amperios;
l = metros.

A la producción de la fuerza contribuyen todos los conductores que están bajo la demarcación de los polos.

Las dimensiones de un polo magnético vienen determinadas por la figura 5.15.

La corriente que circula por cada conductor es $i_i = \frac{I_i}{2\ a}$, donde I_i es la intensidad del inducido y 2 *a* el número de ramas en derivación.

El par ejercido sobre un conductor:

$$M_c = f_c \cdot r = \beta \cdot \frac{I_i}{2\ a} \cdot l \cdot \frac{D}{2}$$

El par total es la suma de los pares ejercidos en cada conductor:

$$M = n \cdot M_c = f_c \cdot r \cdot n = \beta \cdot \frac{I_i}{2\ a} \cdot l \cdot \frac{D}{2} \cdot n$$

El valor de la inducción:

$$\beta = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{b \cdot l}$$

La longitud del arco polar vale:

$$b = \frac{\pi \cdot D}{2\ p}$$

Sustituyendo los valores hallados, se tiene:

$$M = n \cdot \frac{\Phi}{\frac{\pi \cdot D}{2\ p} \cdot l} \cdot \frac{I_i}{2\ a} \cdot l \cdot \frac{D}{2} = \frac{1}{2\ \pi} \cdot \frac{p}{a} \cdot n \cdot \Phi \cdot I_i$$

las unidades físicas son:

$$M = N \cdot m = \text{Newton} \cdot \text{metro}$$

5.6.2 *Potencia y rendimiento*

La potencia que absorbe el motor de la red es $V_b \cdot I_i$; no toda se transforma en potencia mecánica sobre el eje del motor; una parte se consume en forma de calor en la armadura, otra se utiliza para vencer las resistencias pasivas y otra parte se transforma en calor por efecto Joule.

Esta potencia perdida no puede producir trabajo útil en el eje del motor. Por ello, la potencia de salida de un motor es igual a la potencia de entrada menos las pérdidas (fig. 5.16).

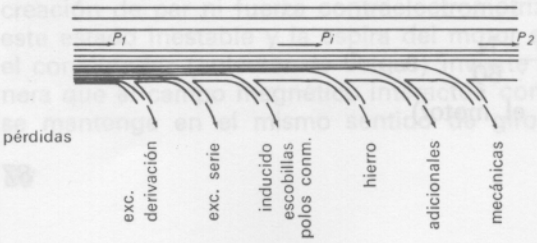


Fig. 5.16 Distribución de un polo magnético.

Al trabajar el motor en régimen normal de funcionamiento, la potencia interna es igual a la potencia mecánica.

$$E \cdot I_i = M \cdot \omega$$

siendo ω la velocidad angular.

El rendimiento del motor, una vez evaluadas todas las pérdidas, es:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

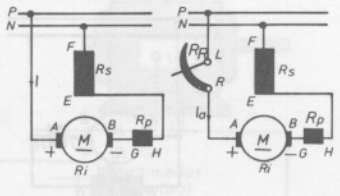


Fig. 5.17 Motor serie.

5.7 Tipos de motores según excitación

Como se estudió en el Tema 4, los motores de corriente continua pueden ser excitados en serie, derivación y compound.

5.7.1 *Serie*

Se designa así al bobinado inductor principal al estar conectado en serie con el inducido (fig. 5.17).

La intensidad de corriente nominal alcanza un valor de

$$I_i = \frac{V_b - 2\,U_e - E}{R_p + R_i + R_s}$$

y el valor de la f. c. e. m. del motor vale:

$$E = V_b - (R_p + R_i + R_s)\,I_i - 2\,U_e$$

En el proceso de arranque, el valor de la intensidad es muy grande por no existir f. c. e. m.; y, por tanto, la corriente que circula por el bobinado inducido y el de serie es la de cortocircuito:

$$I_{cc} = \frac{V_b - 2\,U_e}{(R_p + R_i + R_s)}$$

Se evitan los efectos perjudiciales de esta intensidad de cortocircuito colocando una resistencia en serie R_R con el inducido del motor (fig. 5.17).

Siendo la intensidad en el proceso de arranque en un valor de:

$$I = \frac{V_b - 2\,U_e}{(R_p + R_i + R_s) + R_R}$$

Como el período de arranque es de un tiempo muy corto, del orden de segundos, se puede admitir una intensidad de puesta en marcha de un valor superior al nominal, pero siempre dentro de las normas que indique el fabricante del motor.

El motor serie se caracteriza por tener un elevado par de arranque, del orden de *2,5 a 4,5 veces superior* al par de rotación nominal.

En efecto, como el bobinado inductor está conectado en serie con el inducido del motor, la corriente que circula por ambos arrollamientos en el momento de arranque es muy grande, creciendo a valores exagerados el flujo de la máquina.

El motor serie es muy inestable y presenta el peligro de embalarse cuando disminuye el par resistente. Basta observar que el número de revoluciones del motor vale:

$$N = K \cdot \frac{V_b - \Sigma\, R \cdot I_i}{\Phi}$$

Si disminuye la carga, lo hace también la intensidad que absorbe de la red; luego decrecen $\Sigma R \cdot I_i$ y el flujo principal; por consiguiente, el numerador de la expresión aumenta y el denominador decrece, lo que da origen a un crecimiento del número de revoluciones del motor.

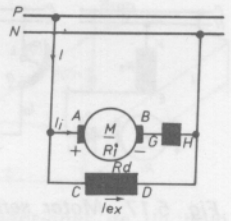


Fig. 5.18 Motor derivación.

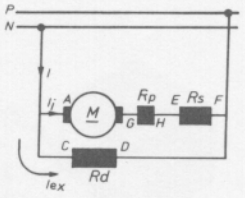


Fig. 5.19 Motor compound.

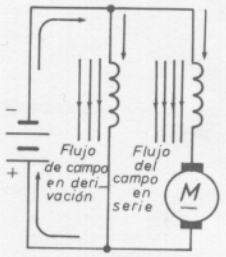


Fig. 5.20 Motor compound acumulativo.

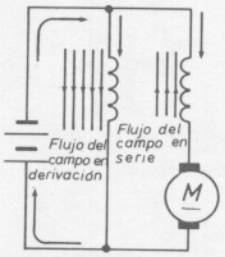


Fig. 5.21 Motor compound diferencial.

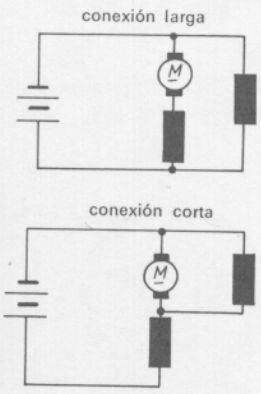


Fig. 5.22 Motor en conexión derivación larga y corta.

5.7.2 *Derivación*

En el motor derivación el bobinado inductor está conectado en paralelo con el inducido (fig. 5.18).

La intensidad de corriente de excitación adquiere la expresión:

$$I_{ex.} = \frac{V_b}{R_d}$$

valor que se mantiene constante mientras lo sea la tensión de la red.

La intensidad del inducido:

$$I_i = \frac{V_b - E - 2\ U_e}{R_p + R_i}$$

la corriente total tiene la expresión de:

$$I = I_i + I_{ex.}$$

El par de arranque del motor es mayor que el nominal, sin ser por ello tan elevado como el motor serie. Adquiere un valor del orden de 1,5 a 2 veces superior al par nominal.

El motor shunt tiene una gran estabilidad de marcha y su velocidad prácticamente se conserva constante.

Si disminuye la carga, lo hace también el flujo de reacción; con lo que el campo útil aumenta ligeramente y el valor de la caída de tensión experimenta un decrecimiento; el número de revoluciones del motor tiende a mantenerse constante:

$$N = K \cdot \frac{V_b - \Sigma\ R \cdot I}{\Phi}$$

Idéntico razonamiento puede hacerse al aumentar la carga.

En un motor shunt, el valor que adquiere la velocidad, desde su funcionamiento en vacío hasta cuando trabaja a plena carga, suele ser de un 10 %.

5.7.3 *Compound*

El motor de excitación compound, o compuesta (fig. 5.19), es una combinación del motor serie y shunt.

Está constituido por un bobinado de excitación serie y otro en derivación conectado con el inducido del motor.

Para comprender la acción de los dos campos serie y shunt, basta saber que, si la carga aumenta, aminora la velocidad y crece la intensidad que circula por el inducido, lo cual provoca un aumento del campo en el devanado serie, se obtiene mayor cantidad de flujo interactuante y el par aumenta. Análogo razonamiento puede hacerse si la carga disminuye.

La combinación de los dos campos ha agregado al motor shunt alguna de las cualidades que el motor serie tiene.

Atendiendo al control de la intensidad de ambos campos, el motor compound se divide en compound acumulativo y compound diferencial (figs. 5.20 y 5.21).

En el primero, el campo serie y el derivación se combinan de tal forma que el total es de una mayor densidad de líneas de fuerza; sin embargo, en el diferencial las bobinas inductoras están colocadas de forma que se resta la acción de los dos flujos.

La mayor parte de los motores compound, atendiendo a su conexión, se montan en excitación corta o larga (fig. 5.22).

Se ha indicado que el par de arranque del motor compound aditivo es mayor que el del shunt, pero sin alcanzar el valor del motor serie.

Adquiere la expresión:

$$M = K \cdot (\Phi_d + \Phi_s)\ (I_i + I_{ex.})$$

La estabilidad de marcha de este motor no presenta peligro de embalarse al disminuir la carga:

$$N = K \cdot \frac{V_b - 2\ U_e - (R_i + R_p + R_s)\ I_i}{\Phi_d + \Phi_s}$$

La presencia del flujo Φ_d impide que la máquina se embale; se ve, en la expresión, que el denominador nunca será cero; por ello, el número de revoluciones por minuto estará siempre controlado por el flujo creado por la bobina shunt.

Si el motor es diferencial, el par de arranque adquiere la expresión:

$$M = K \cdot (\Phi_d - \Phi_s)\ (I_i + I_{ex.})$$

Por ser el flujo diferencial, el momento de arranque es bastante menor que en un motor compound aditivo.

La estabilidad de marcha presenta la característica de variar muy poco la velocidad, si están bien calculados los ampervueltas de la excitación.

En efecto:

$$N = K \cdot \frac{V_b - 2\ U_e - (R_i + R_p + R_s)\ I_i}{\Phi_d - \Phi_s}$$

Si aumenta I_i, decrecen el numerador e igualmente el denominador, por el aumento experimentado en el flujo Φ_s.

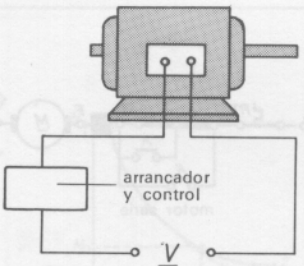


Fig. 5.23 Esquema bloque de un arrancador y controlador.

5.8 Sistemas de arranque de los motores de c. c.

En el momento de arrancar un motor de corriente continua, la intensidad que absorbe de la red es muy grande por no existir f. c. e. m. en los devanados del inducido. Esta intensidad puede hacer que se quemen las escobillas y el colector de delgas, e incluso el propio devanado del inducido.

Para evitar este riesgo, se usan dispositivos especiales llamados *arrancadores* que, además de favorecer el creciente aumento de la f. c. e. m., sirven para acelerar y regular la velocidad del motor.

El arrancador tiene sólo la misión de acelerar progresivamente el motor hasta que haya adquirido la velocidad de funcionamiento normal. Sin embargo, existe otro dispositivo capaz de controlar la velocidad, dentro de la misma unidad física (fig. 5.23); se llama *arrancador y controlador de velocidad;* en este dispositivo hay un mecanismo que desconecta el motor de la red en caso de que falte la tensión de línea.

En el proceso de arranque, pues, lo que más importa es reducir la intensidad que circula por el inducido al tiempo que el motor adquiere paulatinamente la velocidad de régimen.

La manera de reducir la tensión aplicada al inducido puede obtenerse mediante resistencias intercaladas entre la red de alimentación y el inducido (figura 5.24), bien por medio de grupos rotativos especiales, de variadores de tensión, o también con equipos electrónicos basados en tiristores, transistores, etc.

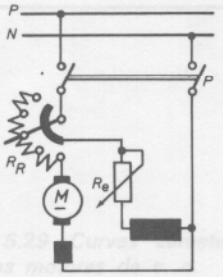


Fig. 5.24 Resistencias colocadas en serie con el inducido del motor.

Las resistencias variables, utilizadas para este trabajo, son las denominadas *reóstatos de arranque* (fig. 5.25), que están constituidos por varias resistencias metálicas y un número determinado de contactos fijos llamados *plots.*

El arranque de un motor de c. c. suele hacerse hoy en día mediante contactores temporizados con diferentes resistencias colocadas en serie, que van cortocircuitándose escalonadamente hasta eliminar la última resistencia, de manera que el inducido queda directamente conectado a la red en un tiempo prefijado, una vez eliminadas las resistencias (fig. 5.26).

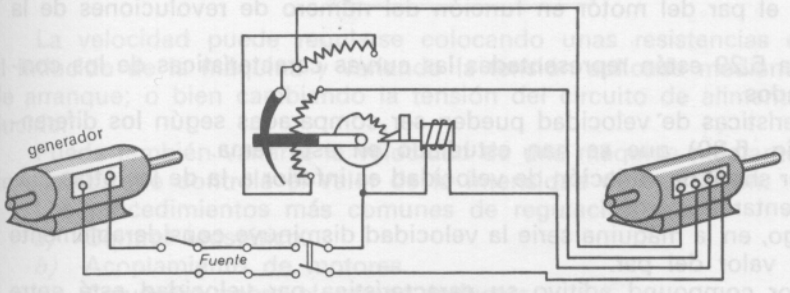


Fig. 5.25 Dispositivo de control de velocidad.

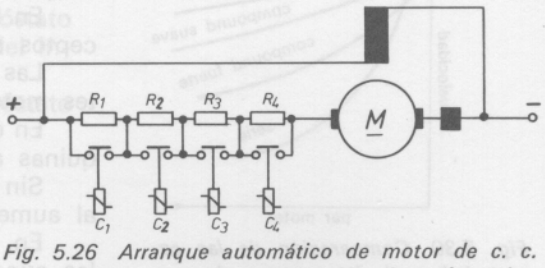


Fig. 5.26 Arranque automático de motor de c. c. por eliminación de resistencias.

La figura 5.27 inserta el mando automático en el período de arranque de un motor serie, de un shunt y de un compound; y en la figura 5.28, se ve la inversión de marcha de estos tres motores.

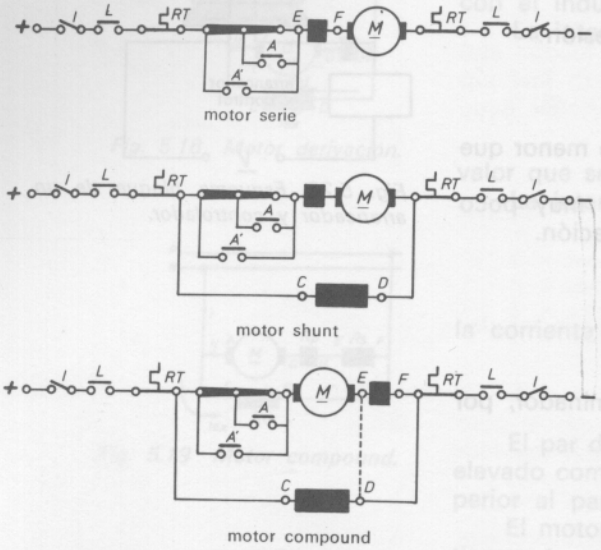


Fig. 5.27 Mando automático de los motores de c. c.

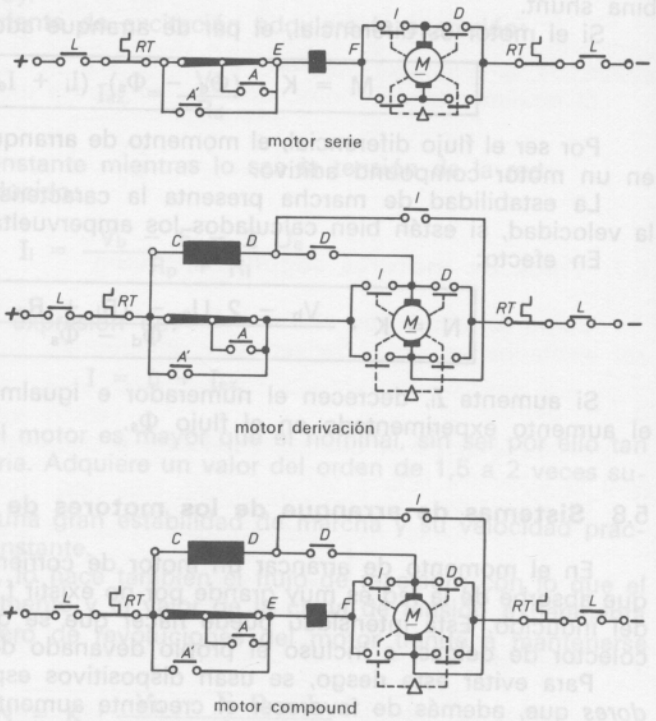


Fig. 5.28 Inversión de los motores de c. c.

5.9 Características de funcionamiento de los motores de corriente continua

Las características mecánicas más importantes de los motores de corriente continua, en función de su excitación, son:

a) *Característica de velocidad:*

$$N = f\ (I_1)$$

que se interpreta: velocidad de un motor en función de la intensidad de inducido.

b) *Característica del par:*

$$M = f\ (I_i)$$

que indica: par del motor en función de la intensidad del rotor.

c) *Característica propiamente mecánica:*

$$N = f\ (M)$$

que representa el par del motor en función del número de revoluciones de la máquina.

En la figura 5.29 están representadas las curvas características de los conceptos enunciados.

Las características de velocidad pueden ser comparadas según los diferentes motores (fig. 5.30) que se han estudiado en este tema.

En el motor shunt, la variación de velocidad es inferior a la de las otras máquinas al aumentar la carga.

Sin embargo, en la máquina serie la velocidad disminuye considerablemente al aumentar el valor del par.

En el motor compound aditivo su característica par velocidad está entre las curvas límites del shunt y el serie.

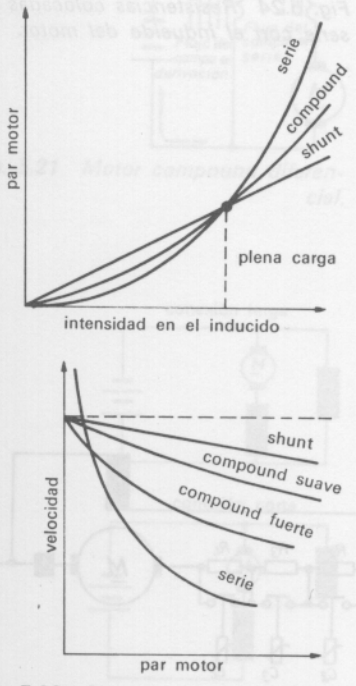


Fig. 5.30 Comparación de las características de los motores de c. c.

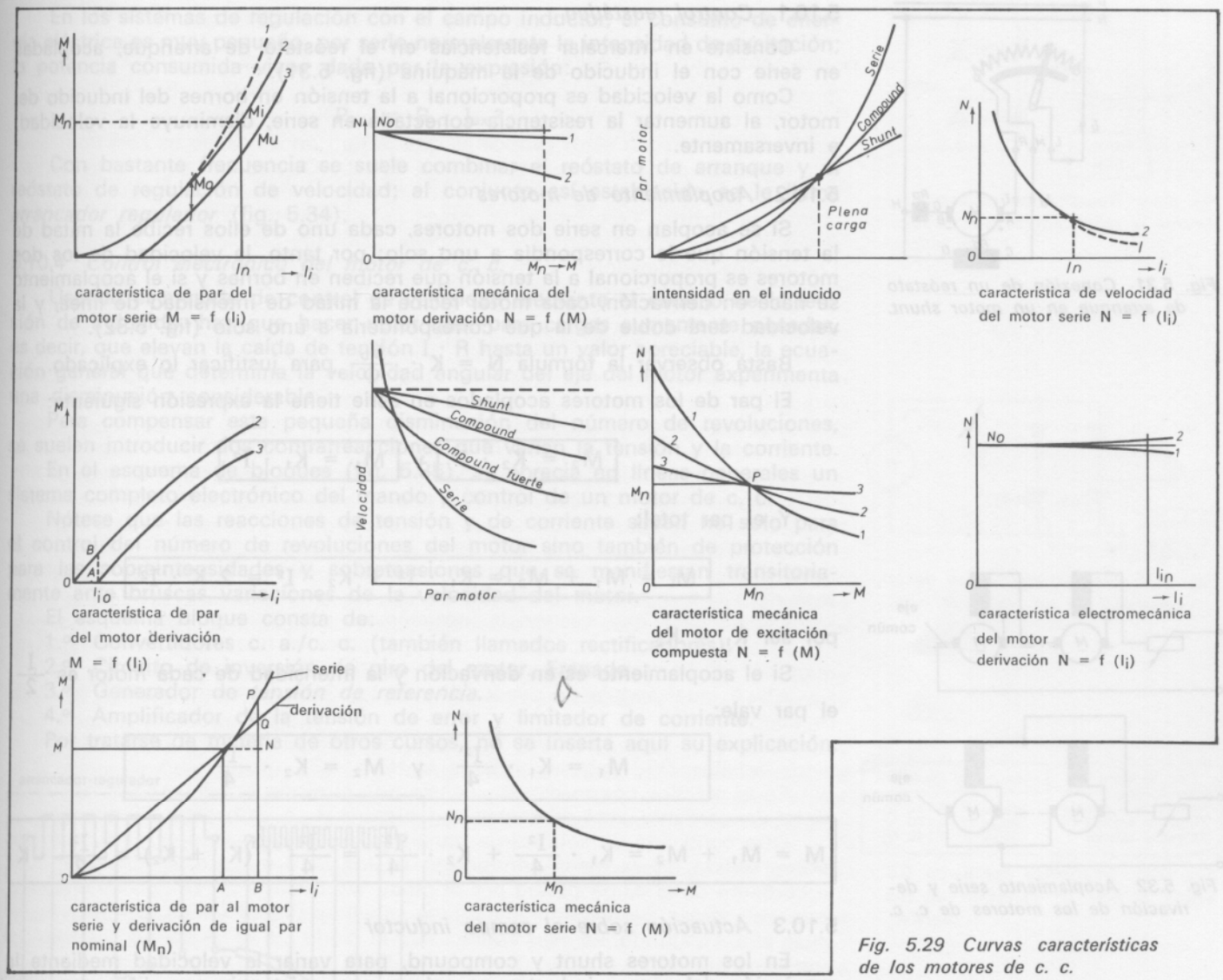


Fig. 5.29 Curvas características de los motores de c. c.

5.10 Control de la velocidad de los motores de c. c.

La regulación de la velocidad de los motores de corriente continua puede realizarse siempre que se varíen los parámetros de tensión y flujo de la expresión:

$$N = \frac{V_b - 2\,U_e - \Sigma\, R \cdot I_i}{\Phi} = K \cdot \frac{V_b}{\Phi}$$

En el arranque, el motor es regulado con el valor del flujo e intensidad del inducido:

$$M = K_2 \cdot I_i \cdot \Phi$$

La velocidad puede regularse colocando unas resistencias en serie con el inducido de la máquina y variando la tensión aplicada mediante el reóstato de arranque; o bien cambiando la tensión del circuito de alimentación del inducido.

Puede también variarse la velocidad de una máquina mediante un reóstato de campo, que controla el valor de la intensidad de excitación.

Los procedimientos más comunes de regulación son:

a) Control reostático.
b) Acoplamiento de motores.
c) Actuación sobre el campo inductor.
d) Control electrónico.

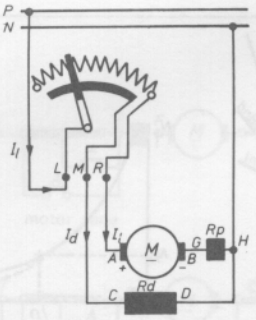


Fig. 5.31 Conexión de un reóstato de arranque en un motor shunt.

5.10.1 *Control reostático*

Consiste en intercalar resistencias en el reóstato de arranque, acopladas en serie con el inducido de la máquina (fig. 5.31).

Como la velocidad es proporcional a la tensión en bornes del inducido del motor, al aumentar la resistencia conectada en serie, disminuye la velocidad; e inversamente.

5.10.2 *Acoplamiento de motores*

Si se acoplan en serie dos motores, cada uno de ellos recibe la mitad de la tensión que le correspondía a uno solo; por tanto, la velocidad de los dos motores es proporcional a la tensión que reciben en bornes y si el acoplamiento se hace en derivación, cada motor recibe la mitad de intensidad de línea, y la velocidad será doble de la que correspondería a uno solo (fig. 5.32).

Basta observar la fórmula $N = K \cdot \frac{V_b}{\Phi}$ para justificar lo explicado.

El par de los motores acoplados en serie tiene la expresión siguiente:

$$\boxed{M_2 = K_2 \cdot I^2} \quad y \quad \boxed{M_1 = K_1 \cdot I^2}$$

Y el par total:

$$\boxed{M_t = M_1 + M_2 = K_1 \cdot I^2 + K_2 \cdot I^2 = 2\,K \cdot I^2}$$

por ser $K_1 = K_2$.

Si el acoplamiento es en derivación y la intensidad de cada motor es $\frac{I}{2}$, el par vale:

$$\boxed{M_1 = K_1 \cdot \frac{I^2}{4} \quad y \quad M_2 = K_2 \cdot \frac{I^2}{4}}$$

$$\boxed{M = M_1 + M_2 = K_1 \cdot \frac{I^2}{4} + K_2 \cdot \frac{I^2}{4} = \frac{I^2}{4} \cdot (K_1 + K_2) = \frac{I^2}{2} \cdot K}$$

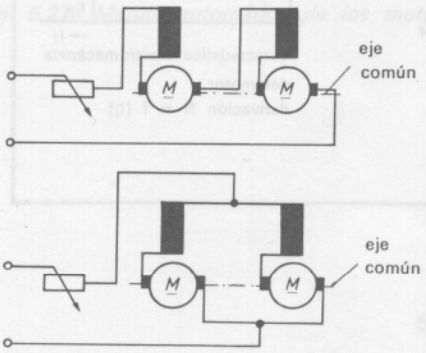


Fig. 5.32 Acoplamiento serie y derivación de los motores de c. c.

5.10.3 *Actuación sobre el campo inductor*

En los motores shunt y compound, para variar la velocidad mediante la regulación del campo inductor, se coloca una resistencia con diferentes puntos de tensión en serie con el bobinado inductor de estas máquinas (fig. 5.33).

En un motor serie el reóstato de regulación irá acoplado en derivación con el bobinado serie, de manera que, variando la resistencia shunt R_1 acoplada en derivación con el bobinado serie, se varía la intensidad de excitación de la máquina y, por tanto, se hace crecer o decrecer la velocidad del motor.

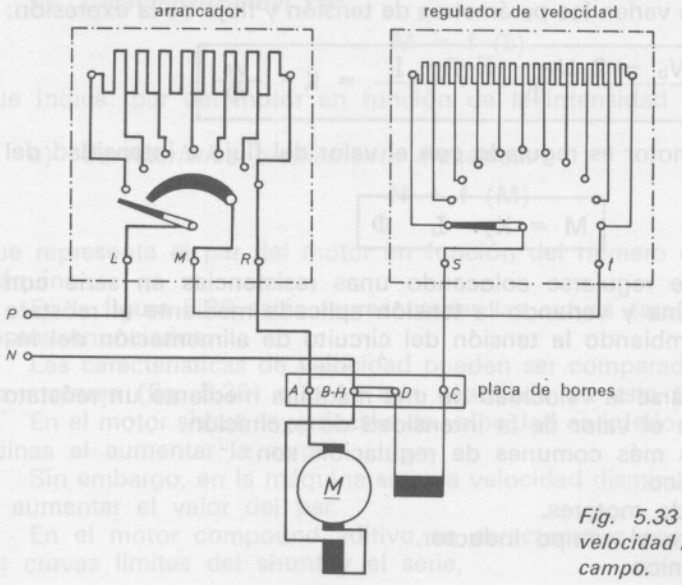


Fig. 5.33 Regulación de la velocidad mediante reóstato de campo.

NACHO

En los sistemas de regulación con el campo inductor, el consumo de energía eléctrica es muy pequeño, por serlo normalmente la intensidad de excitación; la potencia consumida viene dada por la expresión:

$$P_{ex.} = R \cdot I_{ex.}^2$$

Con bastante frecuencia se suele combinar el reóstato de arranque y el reóstato de regulación de velocidad; al conjunto así establecido se le llama *arrancador regulador* (fig. 5.34).

5.10.4 *Control electrónico del motor de c. c.*

Usando el método de control de velocidad mediante el cambio de la tensión de inducido, hay que hacer notar que, para cargas sumamente pesadas, es decir, que elevan la caída de tensión I · R hasta un valor apreciable, la ecuación general que determina la velocidad angular del eje del motor experimenta una disminución considerable.

Para compensar esta pequeña disminución del número de revoluciones, se suelen introducir dos contrarreacciones que varíen la tensión y la corriente.

En el esquema de bloques (fig. 5.35), se aprecia en líneas generales un sistema completo electrónico del mando y control de un motor de c. c.

Nótese que las reacciones de tensión y de corriente sirven no sólo para el control del número de revoluciones del motor sino también de protección para las sobreintensidades y sobretensiones que se manifiestan transitoriamente ante bruscas variaciones de la velocidad del motor.

El esquema bloque consta de:

1.º Convertidores c. a./c. c. (también llamados rectificadores).
2.º Circuito de inversión de giro del motor. Frenado.
3.º Generador de *tensión de referencia.*
4.º Amplificador de la tensión de error y limitador de corriente.

Por tratarse de materia de otros cursos, no se inserta aquí su explicación.

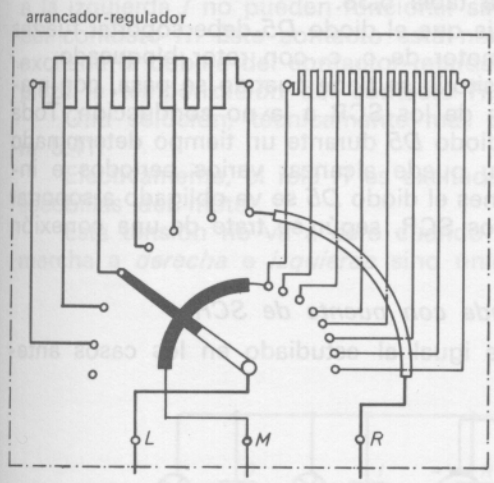


Fig. 5.34 Arrancador regulador.

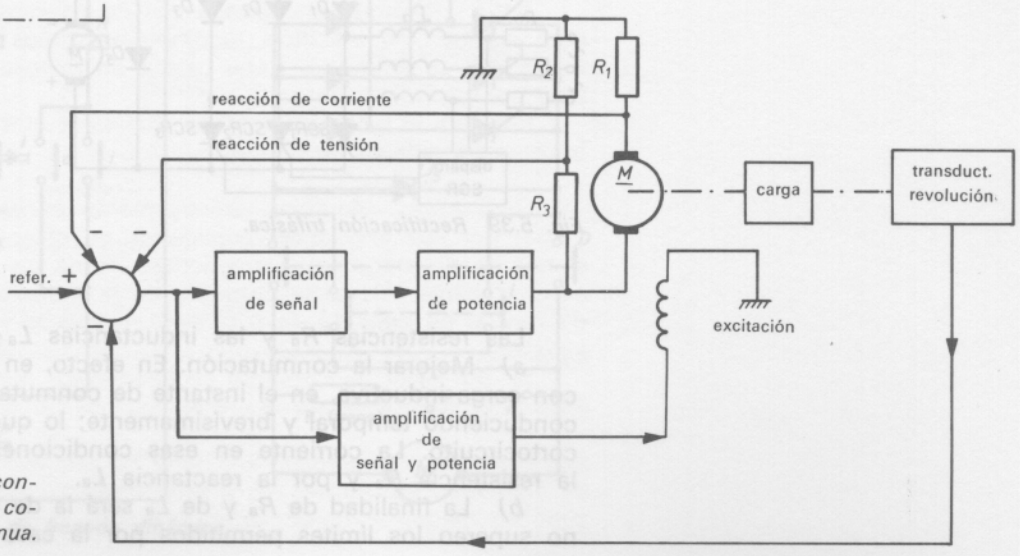


Fig. 5.35 Diagrama bloque del control electrónico de un motor de corriente continua.

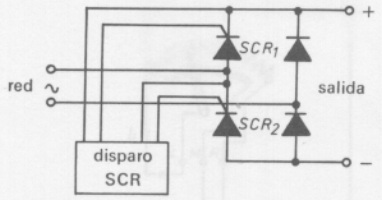


Fig. 5.36 Rectificación mediante tiristores o rectificadores controlados de silicio.

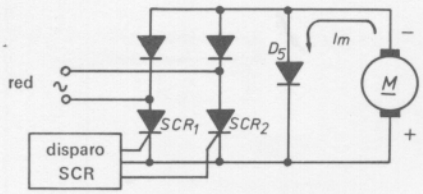


Fig. 5.37 Control electrónico de la velocidad de un motor de c. c.

Tipo de conexión	$Id_{máx.}$ *del diodo D5*
Monofase a puente	$Id_{máx.} = 0{,}262\ I_C$
Trifase a estrella	$Id_{máx.} = 0{,}160\ I_C$
Trifase a puente	$Id_{máx.} = 0{,}140\ I_C$

Fig. 5.38 Intensidad del diodo D5 *según el tipo de conexión de los puentes.*

5.11 Alimentación del motor de c. c. Rectificadores

Uno de los métodos clásicos para obtener una fuente de c. c. es el de la dinamo. En algunas industrias donde se consume c. c. en muchas aplicaciones, hay una cabina de producción de c. c. mediante grupos motor-dinamo. Las ventajas que ofrecen estos grupos es que la tensión de salida es casi constante y la forma de onda está casi totalmente filtrada. Otra fuente de c. c. la forman las baterías de acumuladores; el mantenimiento de dichas instalaciones es caro y se justifica únicamente en casos de emergencia. Por último, el método mejor es el de los *convertidores estáticos,* llamados simplemente rectificadores. Los diodos rectificadores, convenientemente conectados, rectifican la c. a. de media onda, o de onda completa, tanto con tensión monofásica como trifásica.

5.11.1 *Rectificador de salida regulable mediante tiristores*

La reciente aparición de los tiristores, o rectificadores controlados de silicio (SCR), ha supuesto una considerable simplificación de los circutios y un aumento del rendimiento de la instalación.

En efecto, los SCR pueden controlar grandes potencias con señales de mando de pequeñísima potencia; otra importante ventaja es la pequeña caída de tensión en los extremos del SCR cuando éste se halla en estado de conducción (fig. 5.36).

El circuito de la figura 5.37 tiene las mismas características que el de la figura 5.36. No obstante y puesto que los SCR tienen los cátodos en común, será necesario añadir el diodo *D5.*

Las ventajas que supone la inserción de dicho diodo son:

a) La forma de onda en la carga (el motor es una carga fuertemente inductiva) es del todo idéntica a la que se tendría con carga óhmica.

b) A igual ángulo de conducción de los SCR, la tensión media de salida es más elevada.

Para determinar la corriente media máxima que debe poder soportar el diodo auxiliar *D5,* téngase presente la tabla 5.38.

En la práctica ocurre con frecuencia que el diodo *D5* debe soportar fuertes picos de corriente para alimentar el motor de c. c. con rotor bloqueado.

Otra condición de sobrecarga transitoria se tiene cuando se pasa, con maniobra brusca, de la plena conducción de los SCR a la no conducción. Toda la corriente de la carga pasará por el diodo *D5* durante un tiempo determinado que, con carga fuertemente inductiva, puede alcanzar varios períodos e incluso algún segundo. En esas condiciones el diodo *D5* se ve obligado a soportar una corriente doble o triple de la de los SCR, según se trate de una conexión monofase o trifase.

5.11.2 *Rectificación trifásica controlada con puente de SCR*

El funcionamiento es exactamente igual al estudiado en los casos anteriores (fig. 5.39).

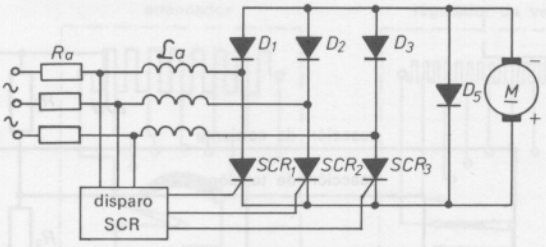


Fig. 5.39 Rectificación trifásica.

Las resistencias R_a y las inductancias L_a tienen como finalidad:

a) Mejorar la conmutación. En efecto, en un circuito rectificador trifásico con carga inductiva, en el instante de conmutación, los diodos *D1* y *D2* están conduciendo temporal y brevísimamente; lo que equivale a decir que están en cortocircuito. La corriente en esas condiciones está limitada únicamente por la resistencia R_a y por la reactancia L_a.

b) La finalidad de R_a y de L_a será la de limitar la corriente a valores que no superen los límites permitidos por la casa constructora.

5.12 Frenado dinámico

El principio del frenado dinámico consiste en lograr que un motor actúe como generador, para obligarlo a detenerse. Si las bornas de conexión del inducido se desconectan de la red de alimentación y se trasladan inmediatamente a una resistencia y se conserva excitado el campo, el motor se detiene rápidamente.

Mientras el motor está operando normalmente, la polaridad de la línea de alimentación determina el sentido de la corriente en el bobinado del inducido, aunque sufra la oposición de una ligera y más reducida fuerza contraelectromotriz.

Sin embargo, cuando se conmutan los terminales del mismo desde la línea a una resistencia, la f. c. e. m. antagonista invierte el sentido de la corriente en el inducido y trata de que se invierta el sentido de giro del motor. Recuérdese que la f. c. e. m. es una tensión generada que resulta de la rotación del inducido la cual, a su vez, depende de la energía mecánica almacenada en el conjunto giratorio. Por consiguiente, el motor va reduciendo su velocidad, ya que es solicitado a girar en sentido inverso, y al hacerlo así consume y reduce la energía de rotación.

Como es natural, una vez se ha estacionado el motor, no queda ya almacenada energía mecánica alguna, de modo que la inversión no llega a efectuarse.

Durante este período de conversión de la energía, el motor sigue reduciendo su marcha, hasta que la velocidad es cero, siendo el intercambio de energía completo. La rapidez de la parada depende de la velocidad de la conversión de la energía, la cual viene determinada por el valor de la resistencia; para valores pequeños de ésta, la energía se disipa rápidamente, lo cual origina una pronta parada.

Para garantizar estas importantísimas condiciones, se deben tener en cuenta algunos detalles fundamentales. Se exponen, a continuación, algunos esquemas que consideramos interesantes.

En la figura 5.40, los contactores de marcha a la derecha *D* y de marcha a la izquierda *I* no pueden funcionar simultáneamente por la presencia en serie del contacto *R*. Este contacto está normalmente cerrado, pero se abre al ser excitada la bobina del contactor-retardador *R*; al desexcitarse la bobina *R*, empieza la temporización del contacto *R*.

Otra solución, técnicamente más segura, viene representada en la figura 5.41.

Efectivamente, el relé *R* es excitado cada vez que existe tensión entre las escobillas del motor.

Esta tensión no va a cero cuando se abren los contactos de los relés de marcha a *derecha* e *izquierda* sino únicamente cuando el motor está parado.

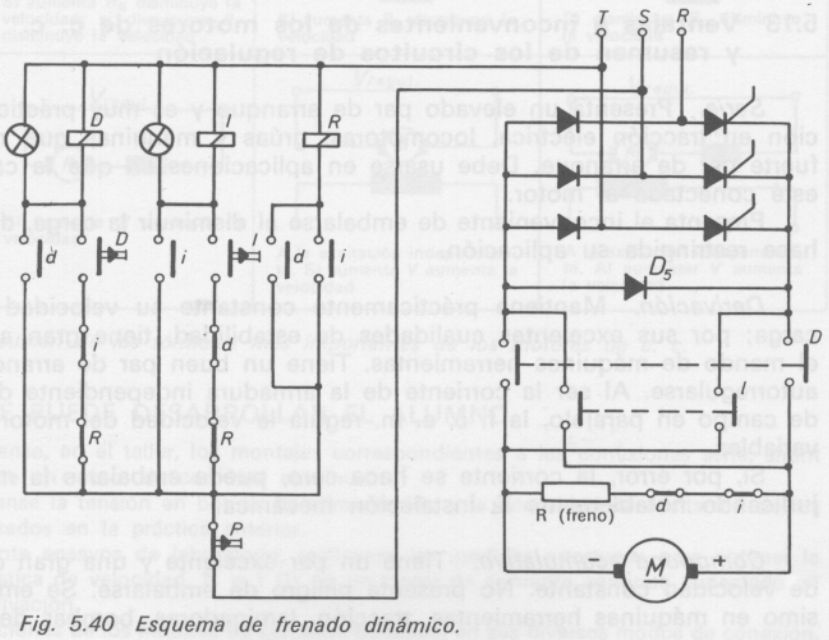


Fig. 5.40 Esquema de frenado dinámico.

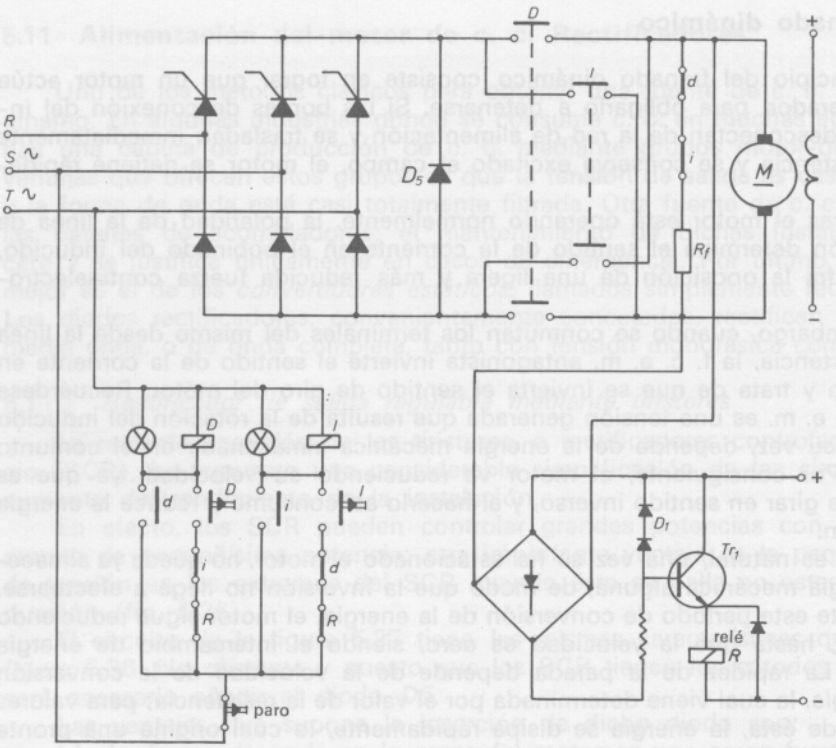


Fig. 5.41 Esquema de frenado dinámico con incorporación de una fuente de alimentación.

En esas condiciones, la f. e. m. generada por el motor es nula. Por tanto, no será posible excitar ninguno de los dos contactores *D-I* hasta tanto que el motor no esté totalmente parado. Las ventajas de este nuevo esquema son:

a) Seguridad de funcionamiento.

b) Inversión de giro más rápida puesto que, apenas el motor está en condiciones de recibir tensión invertida, el relé *R* da su consentimiento a la maniobra.

c) Puede usarse en todos los casos, tanto si existe frenado dinámico como si no lo hay (no todas las máquinas permiten el frenado dinámico).

El puente de diodos que alimenta la base del transistor debe ser calculado para poder soportar la tensión de armadura máxima.

5.13 Ventajas e inconvenientes de los motores de c. c. y resumen de los circuitos de regulación

Serie. Presenta un elevado par de arranque y es muy práctica su utilización en tracción eléctrica, locomotoras, grúas y máquinas que necesitan un fuerte par de arranque. Debe usarse en aplicaciones en que la carga siempre esté conectada al motor.

Presenta el inconveniente de embalarse al disminuir la carga, dificultad que hace restringida su aplicación.

Derivación. Mantiene prácticamente constante su velocidad al variar la carga; por sus excelentes cualidades de estabilidad, tiene gran aplicación en el mando de máquinas herramientas. Tiene un buen par de arranque y puede autorregularse. Al ser la corriente de la armadura independiente del devanado de campo en paralelo, la f. c. e. m. regula la velocidad del motor para cargas variables.

Si, por error, la corriente se hace cero, puede embalarse la máquina perjudicando notablemente la instalación mecánica.

Compound acumulativo. Tiene un par excelente y una gran característica de velocidad constante. No presenta peligro de embalarse. Se emplea muchísimo en máquinas herramientas, tracción, laminadoras, bombas de pistón, etc.

Compound diferencial. El par de arranque es muy pequeño y la velocidad absolutamente constante bajo cargas variables en margen reducido.

Tiene muy pocas aplicaciones, probablemente debido a que con motores de c. a. se pueden obtener características aun mejores que las de este tipo.

5.13.1 *Resumen de los circuitos de regulación*

En la tabla de la figura 5.42 se insertan las ecuaciones características de regulación y control de la velocidad de los motores de c. c.

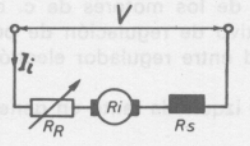
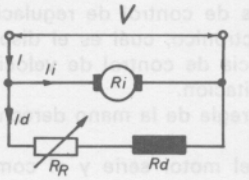
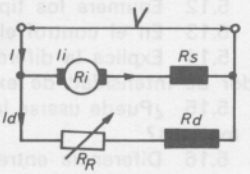
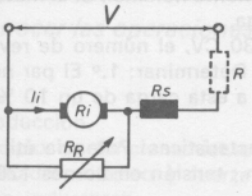
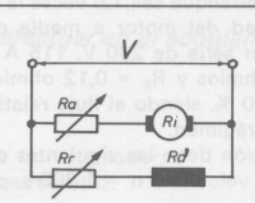
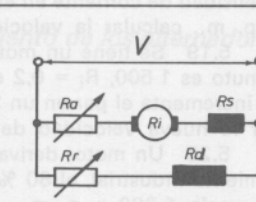
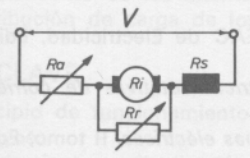
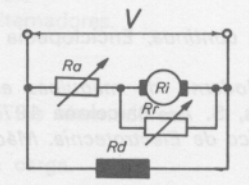
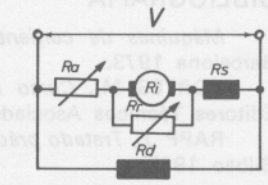
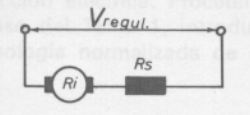
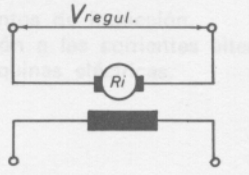
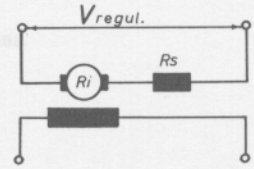
	Serie	*Derivación*	*Compound*
Resistencia en la excitación	 $N = K \frac{V - I(R_s + R_i + R_R)}{\Phi_s}$ Al aumentar R_S disminuye la velocidad	 $N = K \frac{V - I_i R_i}{\Phi_d}$ Al aumentar R_R aumenta la velocidad	 $N = K \frac{V - I_i (R_s + R_i)}{\Phi_d + \Phi_s}$ Si aumenta R_R lo hace la velocidad
Resistencia en la excitación y en el inducido	 $N = K \frac{V - I R_s - R_i I_i}{\Phi}$ Si disminuye R_R lo hace la velocidad. R es limitadora	 Al aumentar R_a disminuye la velocidad Al aumentar R_r aumenta la velocidad	 Al aumentar R_a disminuye la velocidad Al aumentar R_r aumenta la velocidad
Resistencia serie y shunt en el inducido	 Si aumenta R_a disminuye la velocidad; si disminuye R_r disminuye la velocidad	 Si aumenta R_a disminuye la velocidad	 Si disminuye R_r disminuye la velocidad
Tensión en los bornes	 Si aumenta V aumenta la velocidad	 A la excitación independiente. Si aumenta V aumenta la velocidad	 A la excitación independiente. Al aumentar V aumenta la velocidad

Fig. 5.42 Resumen de las fórmulas más importantes de los motores de c. c.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Realícense, en el taller, los montajes correspondientes a las conexiones serie, shunt y compound de un motor de corriente continua.

— Regúlense la tensión en bornas de alimentación y la intensidad de excitación de los montajes realizados en la práctica anterior.

— Mediante ensayos de laboratorio, realícense las medidas oportunas para obtener la curva característica de velocidad, N = f (I) en un motor de corriente continua conectado en serie y en derivación.

— Aplicaciones de los motores de corriente continua, en sus diversos modos de conexión.

CUESTIONARIO

5.1 ¿Cuál es la diferencia entre un motor compound acumulativo y un motor diferencial?

5.2 ¿Tiene mejor regulación de velocidad el motor compound acumulativo que el motor derivación?

5.3 ¿Qué motor conviene usar para obtener alto par de arranque, el serie o el derivación?

5.4 ¿Qué ocurre si el bobinado serie de un motor se abre?

5.5 ¿Qué sucede en el motor shunt si la excitación se desconecta?

5.6 ¿Por qué el motor produce f. c. e. m.?

5.7 Si a un motor serie se le quita la carga, ¿qué ocurre?

5.8 ¿Qué valores intervienen en el par de un motor?

5.9 ¿A qué es igual la potencia interna de un motor?

5.10 ¿Cuánto vale la potencia en el eje del motor?

5.11 ¿Qué misión hacen los arrancadores en los motores de c. c.?

5.12 Enumera los tipos de control de regulación de los motores de c. c.

5.13 En el control electrónico, cuál es el dispositivo de regulación de potencia.

5.14 Explica la diferencia de control de velocidad entre regulador electrónico y el variador de intensidad de excitación.

5.15 ¿Puede usarse la regla de la mano derecha e izquierda tanto en generadores como en motores?

5.16 Diferencia entre el motor serie y el compound diferencial.

5.17 Un motor shunt de cuatro polos está sometido a la tensión de 250 V. En su bobinado inducido la f. c. e. m. es de 210 V. La resistencia interna del inducido y polos de conmutación vale 0,125 ohmios ¿Cuál es la intensidad de corriente que recorre el inducido por una sola rama?

5.18 Un motor serie tiene las siguientes resistencias: Inducido 0,15 ohmios; inductor principal 0,10 ohmios; y auxiliar 0,05. La f. c. e. m. vale 218 V, sabiendo que la tensión de la línea es de 232 V. Hallar el valor de la resistencia del reóstato de arranque si se desea que la intensidad de corriente en el arranque sea 1,5 veces la corriente nominal. Si el motor gira a 1 400 r. p. m., calcular la velocidad del motor a media carga.

5.19 Se tiene un motor serie de 230 V, 115 A y 30 CV, el número de revoluciones por minuto es 1 500, R_i = 0,2 ohmios y R_s = 0,12 ohmios. Determinar: 1.º El par nominal. 2.º Si se incrementa el par en un 30 %, siendo el flujo relativo a esta carga de un 10 % superior, hallar la nueva velocidad de régimen.

5.20 Un motor derivación tiene las siguientes características: Potencia útil = 4 CV; rendimiento industrial, el 80 %; velocidad n = 1 200 r. p. m.; tensión en bornes 120 V; velocidad de vacío 1 280 r. p. m.

El arrollamiento de excitación pierde el 5 % de la potencia absorbida, e igual pérdida se produce en el devanado inducido. Hallar: la f. c. e. m. de plena carga y la resistencia del reóstato para que la corriente absorbida no exceda de dos veces la corriente de plena carga.

BIBLIOGRAFIA

Máquinas de corriente continua, Enciclopedia CEAC de Electricidad, Ediciones CEAC, Barcelona 1973.

CORTES M., *Curso Moderno de máquinas eléctricas rotativas de corriente continua,* Editores Técnicos Asociados, S. A., Barcelona 1977.

RAPP J., *Tratado práctico de Electrotecnia. Máquinas eléctricas,* II tomo, Editorial Vagma, Bilbao 1965.

Tema 6. Máquinas de corriente alterna rotativa

OBJETIVOS

— *Deducir el valor de la f. e. m. generada por los alternadores.*
— *Diferenciar los elementos que componen los estatores y rotores de estas máquinas.*
— *Analizar los ensayos que se efectúan en estas máquinas para su comprobación.*
— *Conocer las operaciones a efectuar en el acoplamiento de los alternadores.*

GUION

— Introducción.
— Principio de funcionamiento de un alternador.
— Alternador trifásico y fuerza electromotriz.
— Polos inductores.
— Excitación de las máquinas.
— Características generales.
— Ensayos.
— Diagramas.
— Acoplamiento de los alternadores.
— Distribución de carga de los alternadores.

PUNTOS CLAVE

— Principio de funcionamiento de los alternadores.
— Ensayos.
— Acoplamiento y distribución de carga.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Inducción eléctrica. Procedimientos de inducción.
— Repaso del Tema 1, introducción a las corrientes alternas.
— Simbología normalizada de máquinas eléctricas.

EXPOSICION DEL TEMA

6.1 Introducción

Según la naturaleza de la corriente generada o utilizada por las máquinas de corriente alterna rotativas, éstas se dividen en:

Máquinas excitadas con corriente continua. Ejemplo, motores síncronos y alternadores.

Máquinas de corriente alterna, que funcionan solamente con esta clase de corriente, como son los motores de inducción y los de colector.

6.1.1 *Características comunes de las máquinas síncronas*

Las características que diferencian a las máquinas síncronas son:

a) El devanado inductor se excita con corriente continua (fig. 6.1).

b) El devanado inducido genera corriente alterna y las bobinas van alo-

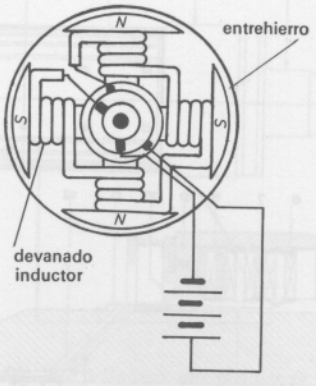


Fig. 6.1 Devanado inductor.

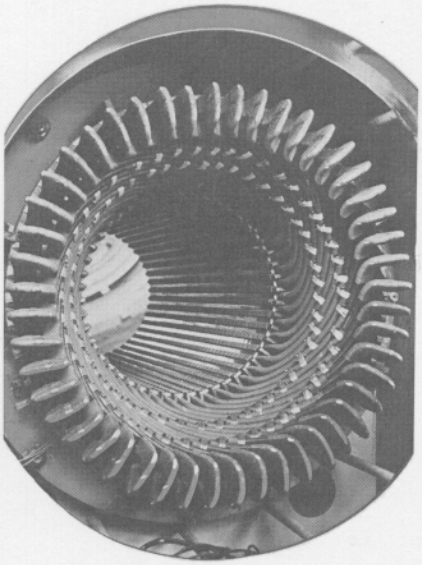


Fig. 6.2 Estator bobinado.

jadas en la carcasa, cuyas dimensiones dependen de la potencia de la máquina (fig. 6.2).

c) La conexión con el devanado inductor se realiza directamente mediante anillos de cobre o latón, que están unidos al eje y sobre los que frotan las escobillas, por medio de las cuales se comunica la energía eléctrica al bobinado inductor.

d) La velocidad del motor de arrastre debe mantenerse constante y el número de revoluciones por minuto depende de la frecuencia y del número de polos de la máquina.

e) Según el sistema inductor, las máquinas pueden ser homopolares y heteropolares.

6.1.2 *Número de fases del inducido y clase de rotores de las máquinas síncronas*

Fases

Atendiendo al número de fases del inducido, las máquinas síncronas se dividen fundamentalmente en:

a) monofásicas;
b) bifásicas;
c) trifásicas.

Rotores

Atendiendo a las características especiales de construcción, los rotores pueden ser:

a) rotor de polos salientes (fig. 6.3);
b) rotor de polos cilíndricos (fig. 6.4).

Las máquinas de polos salientes están concebidas para velocidades relativamente pequeñas; en cambio, en las de rotor cilíndrico, la velocidad del generador es muy grande.

La construcción del rotor de polos salientes se emplea normalmente en generadores de centrales hidráulicas (fig. 6.5); y las de rotor cilíndrico, en centrales cuyas máquinas son movidas por turbinas de vapor (fig. 6.6).

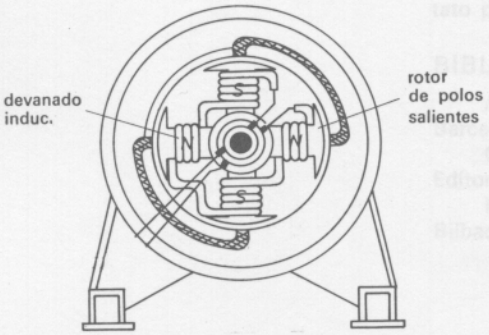


Fig. 6.3 Rotor de polos salientes.

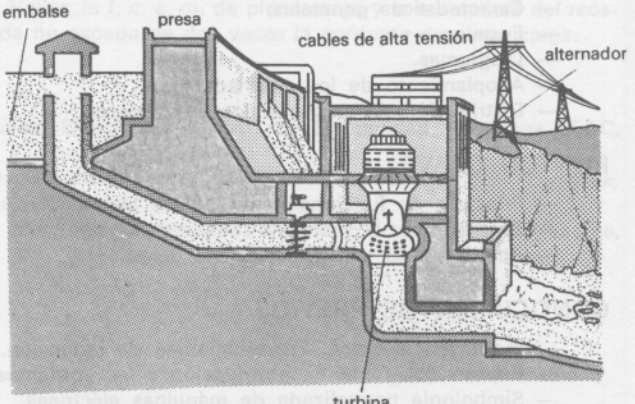


Fig. 6.5 Central hidráulica.

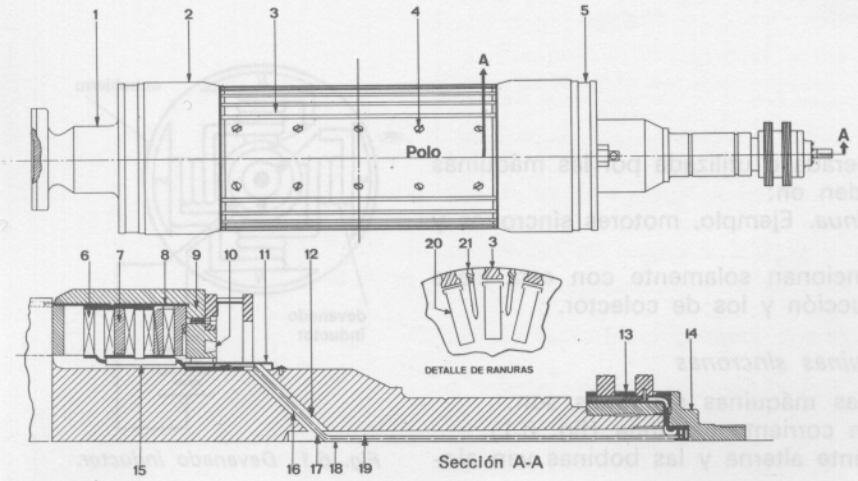


Fig. 6.4 Rotor de polos cilíndricos: 1, eje; 2, zuncho; 3, cuña de ranura; 4, tapón equilibrado; 5, ventilador; 6, bobina de rotor; 7, taco separador de cabezas; 8, aislamiento de zuncho; 9, anillo de centrado; 10, ranura para pesos de equilibrado; 11, tapa de la conexión; 12, cuña soporte; 13, conjunto colector; 14, extensión de eje; 15, conexión; 16, cable de excitación; 17, aislamiento de cable; 18, separador; 19, cuña soporte; 20, cajetín de ranura; 21, cuña de ranura de ventilación.

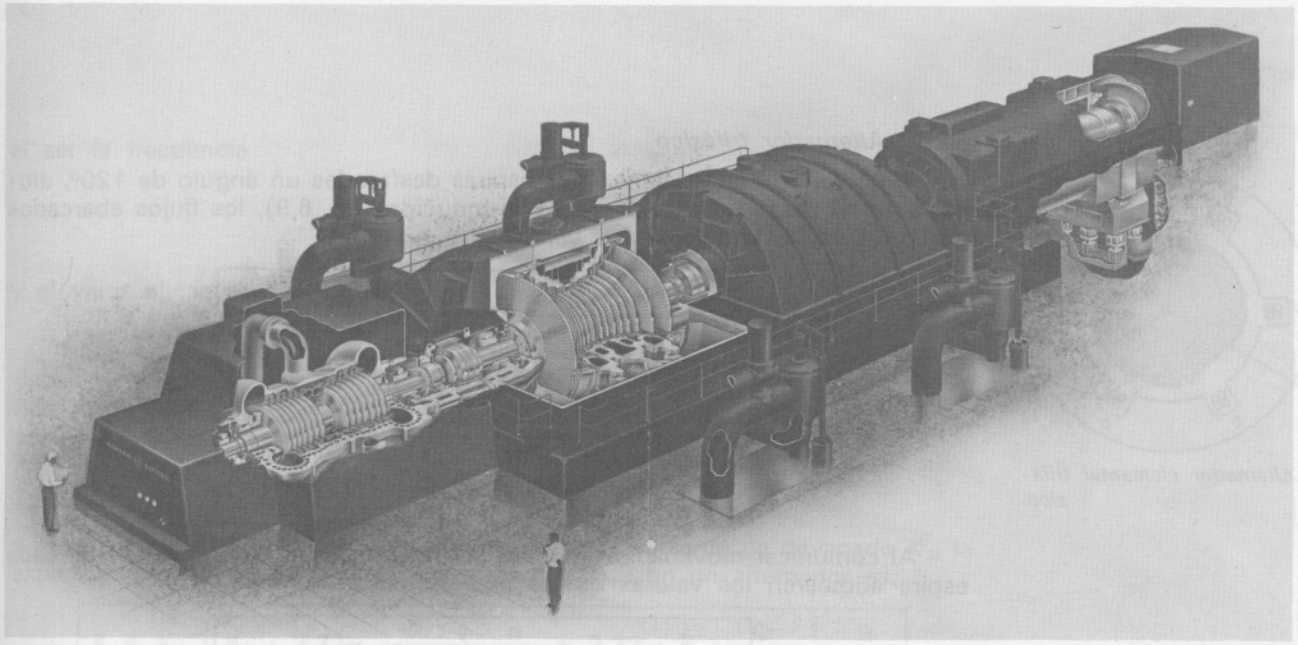


Fig. 6.6 Turbina de generador.

6.2 Principio de funcionamiento de un alternador

En el Tema 4 se ha estudiado el generador elemental de corriente alterna y los principios fundamentales de los fenómenos de inducción por los cuales se produce energía eléctrica en una espira por la acción de un campo magnético.

En los grandes alternadores, los rotores son excitados con corriente continua y el campo inductor principal es el elemento móvil, diferente del sistema usado en las dinamos.

Si el alternador se encuentra en reposo y se excita con corriente continua el rotor, el flujo que se origina y atraviesa el estator es constante y la f. e. m. inducida en la espira es cero ya que, en estas condiciones, no da lugar a ninguna variación de campo.

Pero si se arrastra el rotor, mediante un par externo, a una velocidad angular ω, el valor del flujo que atraviesa la espira dependerá de la posición que tenga ésta con respecto al campo inductor del rotor.

Si entre el eje de la espira del estator y el eje del rotor hay una diferencia de α grados (fig. 6.7), las líneas de fuerza que cortan a los conductores del inducido de la máquina serán:

$$\Phi' = \Phi_0 \cdot \cos \alpha$$

Si n es el número de conductores:

$$\Phi_1 = n \cdot \Phi_0 \cdot \cos \alpha = n \cdot \Phi_0 \cdot \cos \omega t \qquad [6.1]$$

La expresión de la f. e. m.:

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{n \cdot \Delta\Phi \cdot \cos \omega t}{\Delta t}$$

transformada matemáticamente, queda:

$$E_0 = n \cdot \Phi_0 \omega$$

que representa el valor de la f. e. m. máxima.

La f. e. m. instantánea:

$$e = -E_0 \cdot \operatorname{sen} \omega t = E_0 \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \qquad [6.2]$$

Comparando las fórmulas obtenidas [6.1] y [6.2], se observa que el flujo y la f. e. m. están desfasados un ángulo de 90° (fig. 6.8).

La corriente eficaz que entrega la máquina al circuito de carga depende de la potencia del generador y del consumo de la potencia instalada.

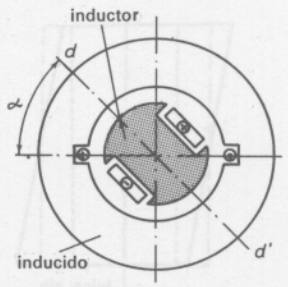


Fig. 6.7 Desviación entre el inducido e inductor.

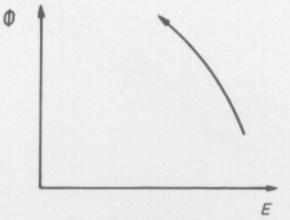


Fig. 6.8 Defase del flujo y la fuerza electromotriz.

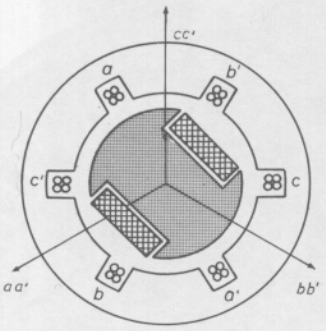


Fig. 6.9 Alternador elemental trifásico.

6.2.1 *Alternador trifásico*

Suponiendo que se tienen tres espiras desfasadas un ángulo de 120°, alojadas en las ranuras de la periferia del inducido (fig. 6.9), los flujos abarcados por cada espira adquieren los valores:

$$\Phi_a = \Phi \cdot \cos \omega t$$

$$\Phi_b = \Phi \cdot \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$\Phi_c = \Phi \cdot \cos \left(\omega t - 2 \cdot \frac{2\pi}{3}\right)$$

Al comunicar movimiento al rotor, las ff. ee. mm. que se generan en cada espira adquieren los valores de las expresiones:

$$e_a = E_0 \cdot \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$e_b = E_0 \cdot \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$e_c = E_0 \cdot \cos \left(\omega t - 2\,\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right)$$

Estas tres fuerzas electromotrices, desfasadas un ángulo de 120°, constituyen un sistema trifásico equilibrado.

6.2.2 *Valor de la f. e. m. generada por fase en una máquina síncrona*

La f. e. m. inducida en un conductor de longitud *l*, en centímetros, y que se mueve a una velocidad *v*, en centímetros por segundo, por la acción de un campo, viene dada por la expresión:

$$E = \frac{\beta \cdot l \cdot v}{10^8}$$

Llamando *n/2* al número de espiras en serie por fase, el número de conductores que producen la f. e. m. total será *n*. Pero solamente son conductores activos aquellos que se encuentran bajo la acción de los polos.

Si se llama a_p la longitud del arco polar, y *D* el diámetro del estator, se obtiene que el número de conductores que se encuentran situados frente a los polos es:

$$n \cdot \frac{2p \cdot a_p}{\pi \cdot D}$$

La fuerza electromotriz media en cada fase del bobinado inducido vale:

$$E_{med.} = n \cdot \frac{2p \cdot a_p}{\pi \cdot D} \cdot \frac{\beta \cdot l \cdot v}{10^8}$$

y sustituyendo el valor de la velocidad lineal por:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

se tiene:

$$E_{med.} = n \cdot \frac{2p \cdot a_p}{\pi \cdot D} \cdot \frac{\beta \cdot l}{10^8} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

como quiera que

$$\Phi = \beta \cdot s = \beta \cdot l \cdot a_p$$

al ser la frecuencia

$$f = \frac{p \cdot N}{60}$$

y el valor eficaz de la fuerza electromotriz

$$E = 1{,}11\ E_{med.}$$

sustituyendo, resulta finalmente que:

$$E = 2{,}22\ \frac{\Phi \cdot f \cdot n}{10^8}$$

y teniendo en cuenta el factor de forma K_1 y el coeficiente de devanado K_2, la expresión general de la f. e. m. generada por fase en un alternador es:

$$E = K_1 \cdot K_2 \cdot 2{,}22\ \frac{\Phi \cdot f \cdot n}{10^8} = 2{,}22 \cdot K \cdot \frac{\Phi \cdot f \cdot n}{10^8}$$

6.3 Polos inductores

El sistema inductor del rotor, como ya se ha visto, puede ser de polos salientes o polos lisos.

Los primeros son semejantes a los empleados en las máquinas de corriente continua. La fijación debe hacerse de tal forma que presente garantía de suficiente solidez y resistencia a los esfuerzos que se originan por la fuerza centrífuga y las propias de la acción magnética para no poner en peligro el buen funcionamiento de la máquina y las bobinas de excitación.

La razón por la que la construcción de la expansión polar en el entrehierro no es constante, es que interesa eliminar los armónicos de la f. e. m., por ello, se recurre a dar la distancia gradualmente a partir del centro del polo (fig. 6.10).

Ayuda también a eliminar los armónicos y a obtener un valor de f. e. m. alterna lo más senoidal posible el inclinar las piezas polares con respecto al propio eje (fig. 6.11).

En los generadores que disponen de rotores que llevan grandes velocidades y que son arrastrados por turbinas de vapor, los polos se construyen normalmente de un cilindro de acero de alta resistencia mecánica.

Los devanados van alojados en las ranuras del rotor y perfectamente aislados de las paredes de la ranura por medio de cajetines de papel prespan.

Las cabezas de bobinas del rotor situadas fuera de las ranuras del cuerpo se aseguran contra la fuerza centrífuga por medio de zunchos cilíndricos de alta resistencia y mecanizados de forjas de acero amagnético.

La refrigeración, si es por aire, se canaliza a través de los conductores de cobre, de tal manera que el aire se halle en contacto directo con el cobre penetrando por todas las espiras y efectuando una vuelta completa (fig. 6.12). La salida del aire se realiza por las aberturas hechas en las cuñas de salida y, mediante los canales del núcleo, se dirige a los tubos de la carcasa donde están los refrigerantes, de donde pasará a los ventiladores, completando así el circuito.

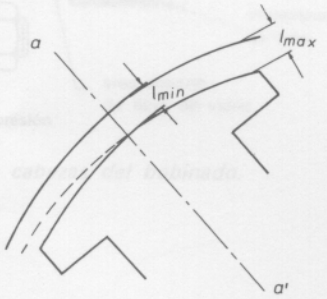


Fig. 6.10 Variación del entrehierro en una máquina síncrona.

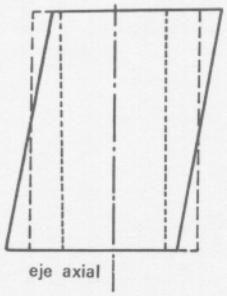


Fig. 6.11 Inclinación de las piezas polares.

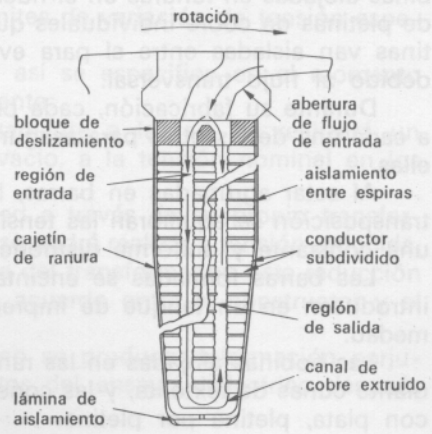


Fig. 6.12 Sección de una ranura del rotor de un alternador.

6.4 Excitación de las máquinas

Las bobinas de excitación de los alternadores de polos salientes se alimentan con fuentes de corriente continua de baja tensión, a través de los anillos sujetos al eje de la máquina y aislados perfectamente, sobre los cuales frotan las escobillas.

La figura 6.13 indica el sistema de excitación y generación de corriente continua mediante el empleo de una dinamo shunt que, a la vez, precisa de una segunda excitatriz de potencia muy pequeña, que tiene por objeto producir el campo inductor de la dinamo principal.

La llamada dinamo piloto suele llevar, incorporado en el estator, un imán permanente que produzca un pequeño campo magnético capaz de producir la f. e. m. necesaria para autoexcitarse, y ser posteriormente el propio bobinado shunt el que refuerce la excitación de la dinamo piloto.

Con el desarrollo tecnológico de los semiconductores, las dinamos de excitatriz han sido hoy sustituidas por los elementos rectificadores, eliminando el sistema de escobillas y colocando el puente rectificador montado sobre el propio rotor (fig. 6.14).

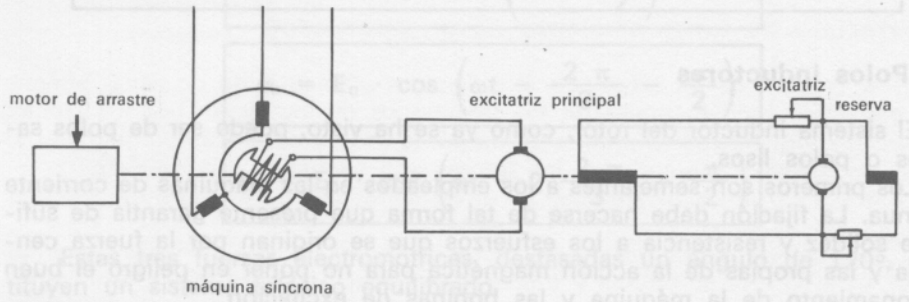


Fig. 6.13 Excitación de una máquina síncrona.

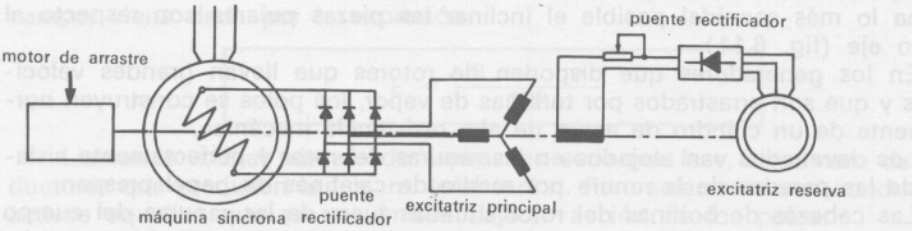


Fig. 6.14 Excitación sin escobillas de un alternador.

6.5 Bobinados del estator

El bobinado del estator en las grandes máquinas está constituido por bobinas alojadas en ranuras en el núcleo magnético y formadas por cierto número de pletinas de cobre individuales que se agrupan en barras (fig. 6.15). Las pletinas van aisladas entre sí para evitar corrientes parásitas y puntos calientes, debido al flujo transversal.

Durante su fabricación, cada pletina es cuidadosamente ensayada respecto a cada una de las otras para asegurar que no existan fallos de aislamiento entre ellas.

Al estar agrupadas en barras, las pletinas deben ser transpuestas. En esta transposición se equilibran las tensiones generadas en las pletinas y se asegura una constante y uniforme distribución de corriente y calentamiento.

Las barras formadas se encintan con varias capas de cinta de mica y se introducen en un tanque de impregnación en vacío, donde se elimina la humedad.

Las bobinas alojadas en las ranuras del núcleo (fig. 6.16) se aseguran mediante cuñas de textolita, y las conexiones entre bobinas se realizan soldándolas con plata, pletina por pletina.

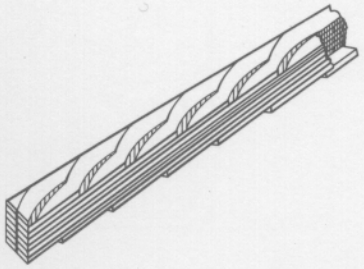


Fig. 6.15 Transposición de espiras aisladas en una barra de estator.

Las cabezas de bobina son trabajadas para adaptarlas a la forma que se representa en la figura 6.17.

En el sistema de refrigeración, si es de aire, éste se toma de la atmósfera por medio de ventiladores colocados en el rotor y se envía a través de la máquina, para refrigerar generador, colector, sistema de excitación y comportamiento del reductor.

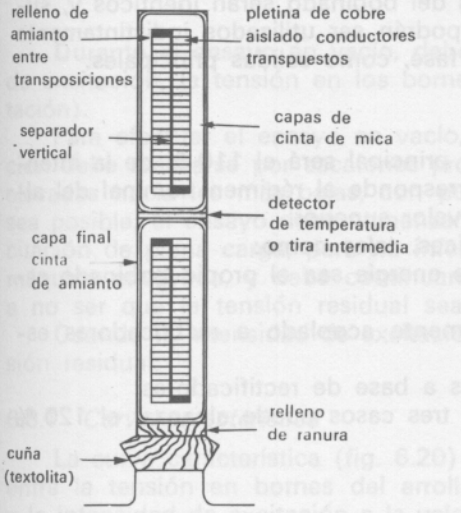


Fig. 6.16 Detalle de relleno de la ranura del estator.

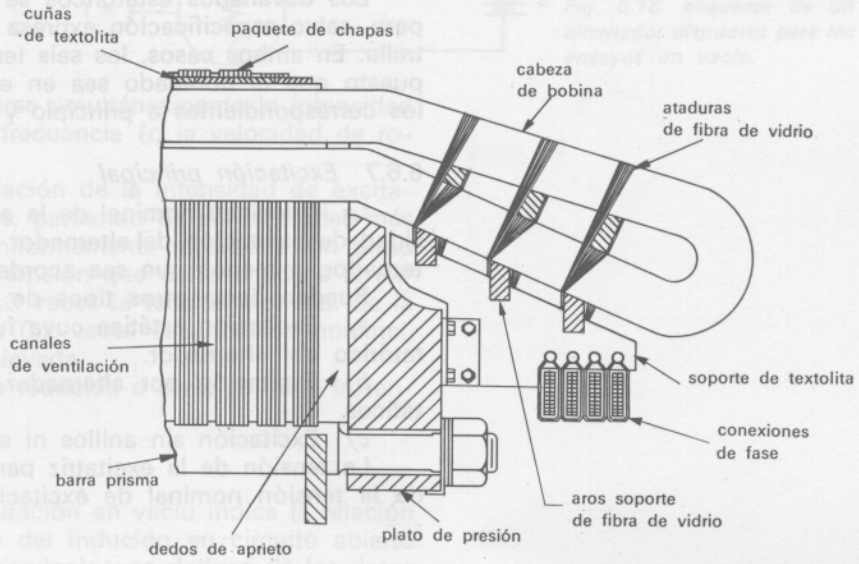


Fig. 6.17 Disposición de las cabezas del bobinado.

6.6 Características generales

Las características que se enumeran, según normas UNE, son aplicables a los diferentes tipos de alternadores trifásicos; y son las siguientes.

6.6.1 *Tensión nominal*

La tensión nominal será fijada por acuerdo entre el constructor y el comprador.

6.6.2 *Velocidad*

La velocidad nominal será de 1 500 ó 3 000 r. p. m.

6.6.3 *Límites de la variación de tensión*

Los límites entre los que puede variar la tensión en los bornes del alternador, a la potencia nominal, serán de $\pm$ 5 % de la tensión normal.

6.6.4 *Ensayo de cortocircuito brusco*

El alternador será construido para poder soportar un cortocircuito brusco cuando dé la carga nominal dentro de los límites de variación de tensión especificados en el apartado 6.6.3.

Si se considera necesario un ensayo, y así se especifica en el momento del pedido, se realizará de la manera siguiente:

a) Para alternadores conectados directamente a la red, se realizará un ensayo en cortocircuito brusco trifásico en vacío, a la tensión nominal en los bornes del alternador.

b) Para alternadores conectados a la red a través de su propio transformador, el ensayo en los bornes del alternador se podrá realizar a tensión reducida, teniendo en cuenta el efecto de la impedancia del transformador. Esta reducción de la tensión de ensayo debe ser objeto de acuerdo entre el constructor y el comprador.

El ensayo se considera satisfactorio si no se produce deformación perjudicial y si el alternador satisface los requisitos del ensayo dieléctrico después del ensayo de cortocircuito brusco.

6.6.5 *Sobrevelocidad*

Los motores de los alternadores serán ensayados a 1,2 veces la velocidad nominal máxima, durante 2 minutos.

6.6.6 *Devanados estatóricos*

Los devanados estatóricos se podrán conectar en estrella o en triángulo pero, salvo especificación expresa y en contra, la conexión prevista es en estrella. En ambos casos, los seis terminales del bobinado serán idénticos y, supuesto que el bobinado sea en estrella, podrán ser utilizados indistintamente los correspondientes a principio y fin de fase, como salidas principales.

6.6.7 *Excitación principal*

La intensidad nominal de la excitatriz principal será el 110 % de la intensidad de excitación del alternador que corresponde al régimen nominal del alternador, a menos que sea acordado un valor superior.

Pueden darse otros tipos de excitatrices, tales como:

a) Excitación estática cuya fuente de energía sea el propio bobinado estatórico del alternador.

b) Excitación por alternador directamente acoplado a rectificadores estáticos.

c) Excitación sin anillos ni escobillas a base de rectificadores.

La tensión de la excitatriz para estos tres casos puede alcanzar el 120 % de la tensión nominal de excitación.

6.7 Características de los alternadores refrigerados por aire

Las características siguientes son aplicables, según normas UNE, a los alternadores refrigerados por aire.

6.7.1 *Potencia*

Las potencias nominales de los alternadores serán:

MW	10	12	16	25	40	50	63
MVA	12,5	15	20	31,25	50	62,5	78,75

6.7.2 *Factor de potencia y relación de cortocircuito*

El factor de potencia nominal en los bornes del alternador será de 0,8 en retraso.

El valor medido de la relación en cortocircuito, a la potencia aparente nominal (MVA) y la tensión nominal (kV), no será inferior a 0,47.

6.7.3 *Refrigeradores de aire*

Los refrigeradores se construirán de forma que, cuando una parte deba quedar fuera de servicio para los trabajos de mantenimiento, la instalación pueda soportar los 2/3 de la carga nominal en servicio continuo sin que sobrepase el calentamiento especificado para el alternador. En estas condiciones, la temperatura del aire de refrigeración puede ser superior a 40 °C.

Los refrigeradores serán construidos para una temperatura máxima del agua de 32 °C a la entrada, y para una presión mínima de servicio de 1,75 kg/cm^2 por encima de la presión atmosférica.

El sistema de ventilación será del tipo de aire en circuito cerrado, salvo acuerdo en contrario.

6.8 Ensayo de saturación en vacío

El ensayo de saturación en vacío se efectúa:

a) Haciendo funcionar como generador la máquina que se deba ensayar, arrastrada por la máquina de un motor apropiado (fig. 6.18).

b) Haciendo funcionar la máquina como motor en vacío por medio de una red de tensión trifásica simétrica (fig. 6.19).

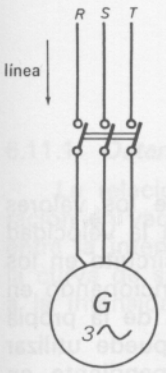


Fig. 6.19 Generador funcionando como motor.

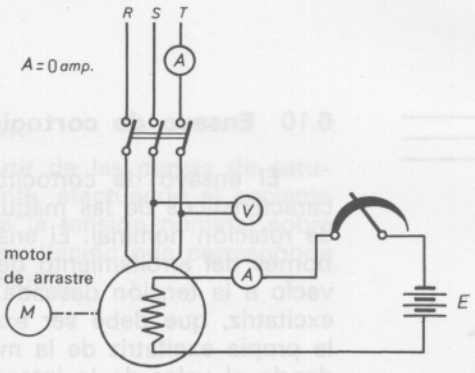


Fig. 6.18 Esquema de un alternador dispuesto para los ensayos en vacío.

Durante el ensayo en vacío, deben medirse simultáneamente la intensidad de excitación, la tensión en los bornes y la frecuencia (o la velocidad de rotación).

Para efectuar el ensayo en vacío, la variación de la intensidad de excitación debe realizarse por escalones progresivos, partiendo de las tensiones más elevadas hacia las más bajas, con puntos uniformemente repartidos; en tanto sea posible, el ensayo debe comenzarse a la tensión que corresponde a la excitación de plena carga, pero no inferior a 1,3 veces la tensión nominal de la máquina ensayada, y debe continuarse hasta 0,2 veces esta tensión nominal, a no ser que la tensión residual sea más elevada.

Cuando la intensidad de excitación se ha reducido a cero, se mide la tensión residual.

6.8.1 *Curva característica*

La curva característica (fig. 6.20) de saturación en vacío indica la relación entre la tensión en bornes del arrollamiento del inducido en circuito abierto y la intensidad de excitación a la velocidad nominal; y se deduce de los datos en vacío.

Si, por causa de una tensión residual elevada, la curva de saturación corta el eje de ordenadas por encima del origen, es necesario introducir una corrección.

A este efecto, la parte recta de la curva de vacío se prolonga hasta su punto de intersección con el eje de abscisas. La longitud de abscisas, limitada por la prolongación de la curva, representa el valor de la corrección que deberá añadirse a todos los valores medidos de la intensidad de excitación.

Si, durante el ensayo, la frecuencia difiere de su valor nominal, todos los valores de la tensión medidos deberán reducirse a la frecuencia nominal.

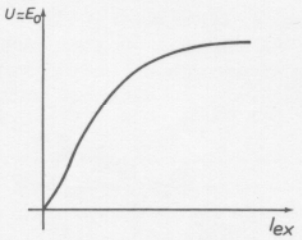


Fig. 6.20 Curvas de saturación en vacío y de cortocircuito trifásico permanente.

6.9 Ensayo de cortocircuito trifásico permanente

Para realizar el ensayo de cortocircuito trifásico permanente se efectúa arrastrando la máquina ensayada como generador, por medio de un motor apropiado (fig. 6.21).

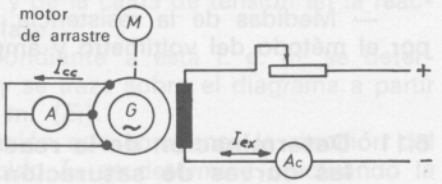


Fig. 6.21 Esquema para la obtención de las características de cortocircuito.

El cortocircuito debe realizarse lo más cerca posible de los bornes de la máquina, aplicándose las intensidades de excitación después de establecer el cortocircuito.

Durante el ensayo de cortocircuito permanente, deberán leerse simultáneamente la intensidad de excitación y la de línea del inducido. Una de las lecturas se efectúa a una intensidad próxima a la nominal del inducido. La velocidad de rotación (o la frecuencia) puede diferir de su valor nominal pero no debe ser inferior a 0,2 veces el valor nominal.

6.9.1 *Curva característica*

La curva característica de cortocircuito trifásico permanente señala la relación entre la intensidad en el inducido puesto en cortocircuito y la intensidad de excitación; y se deduce de los datos del ensayo de cortocircuito trifásico permanente (fig. 6.22).

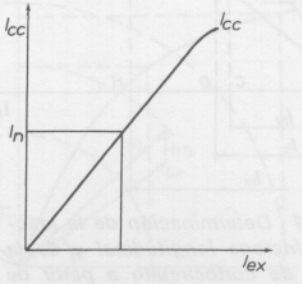


Fig. 6.22 Característica de cortocircuito de una máquina síncrona.

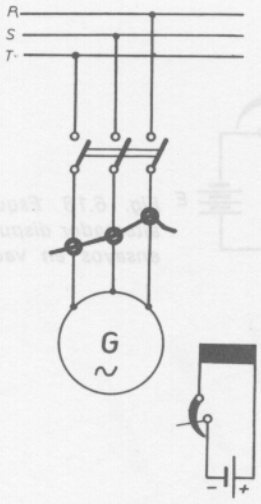


Fig. 6.23 Esquema de cortocircuito brusco en un alternador.

6.10 Ensayo de cortocircuito brusco

El ensayo de cortocircuito brusco para la determinación de los valores característicos de las máquinas síncronas (fig. 6.23) se efectúa a la velocidad de rotación nominal. El ensayo se efectúa produciendo un cortocircuito en los bornes del arrollamiento del inducido cuando la máquina está funcionando en vacío a la tensión deseada. La excitación se obtiene, en general, de la propia excitatriz, que debe ser excitada independientemente. Si no se puede utilizar la propia excitatriz de la máquina, se utilizará entonces otra independiente, en donde el valor de la intensidad nominal deberá ser, al menos, igual al doble de la intensidad de excitación en vacío de la máquina por ensayar, cuya resistencia del inducido no deberá ser superior a la de la excitación principal de la máquina.

En este caso, la excitatriz debe ser de excitación independiente.

Las tres fases deben ser puestas en cortocircuito prácticamente en el mismo instante.

Si el ensayo de cortocircuito brusco no se puede ejecutar a la tensión nominal del inducido, se recomienda efectuar los ensayos a varias tensiones del inducido (por ejemplo, a 0,3 y 0,7 veces la tensión nominal) y determinar los valores para cada uno de los ensayos.

Los resultados se llevan sobre una curva en función de la tensión en circuito abierto, antes de la puesta en cortocircuito, y los valores correspondientes a la tensión del inducido nominal se determinan aproximadamente por extrapolación.

6.10.1 *Otras clases de ensayos*

Además de los ensayos estudiados, la norma UNE describe otros, que se enumeran y no se estudian por la limitación de la obra.

— Ensayo de sobreexcitación con factor de potencia cero.
— Ensayo de excitación negativa.
— Ensayo con deslizamiento reducido.
— Ensayo de restablecimiento de la tensión.
— Ensayo de aplicación de tensión para las posiciones longitudinal y transversal del eje polar del rotor con relación al eje del campo del inducido.
— Ensayo de rotación inversa.
— Ensayo de alimentación monofásica de las tres fases.
— Ensayo de oscilación del rotor suspendido de un cable.
— Ensayo de deceleración en vacío.
— Ensayo con el rotor quitado.
— Ensayo de aceleración después de la supresión brusca de la carga con la máquina funcionando como generador.
— Ensayo de decrecimiento de la intensidad de excitación con el arrollamiento del inducido en cortocircuito.
— Medidas de la resistencia, en corriente continua, de un arrollamiento por el método del voltímetro y amperímetro o por el método de puente.

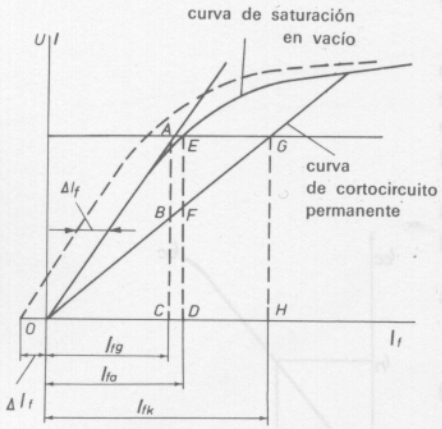


Fig. 6.24 Determinación de la reactancia síncrona longitudinal y de la relación de cortocircuito a partir de las curvas de saturación en vacío y de cortocircuito trifásico permanente.

6.11 Determinación de la reactancia síncrona longitudinal a partir de las curvas de saturación de vacío y cortocircuito permanente

La reactancia síncrona longitudinal X_d es el cociente entre dos valores: 1.º, el valor en régimen establecido del término fundamental de la componente de la tensión del inducido; y 2.º, el valor del término fundamental de dicha intensidad, mientras la máquina gira a su velocidad nominal.

La reactancia síncrona se determina a partir de las curvas de saturación en vacío y de cortocircuito trifásico permanente.

Efectuando el cociente entre la tensión que corresponde a una intensidad de excitación determinada, tomada sobre la parte recta de la curva de saturación en vacío, prolongada según necesidad, y el valor de intensidad de cortocircuito que corresponda a esa misma intensidad de excitación, tomada sobre la curva de cortocircuito (fig. 6.24), resulta:

$$X_d = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot I_{BC}} = \frac{AC}{BC} = \frac{OH}{OC} = \frac{I_{fk}}{I_{fg}}$$

6.11.1 *Determinación de la relación de cortocircuito*

La relación de cortocircuito se determina a partir de las curvas de saturación en vacío y de cortocircuito trifásico permanente, efectuando el cociente entre la intensidad de excitación que corresponda a la tensión nominal sobre la curva de saturación en vacío y la intensidad de excitación que corresponda a la intensidad nominal sobre la curva de cortocircuito:

$$K_c = \frac{OD}{OH} = \frac{I_{fo}}{I_{fk}}$$

6.12 Diagrama de Potier

La reactancia de Potier X_p, que es la dispersión equivalente utilizada en lugar de la reactancia de dispersión del inducido para determinar la excitación en carga, toma en consideración las dispersiones suplementarias del arrollamiento de excitación en carga en la zona de funcionamiento; por tanto, su valor resulta más elevado que el de la reactancia de dispersión del inducido.

Las curvas de saturación en vacío y de cortocircuito trifásico (apartados 6.8 y 6.9) se representan sobre un mismo diagrama (fig. 6.25) igualmente un punto *A*, para el que la ordenada es la tensión nominal, y la abscisa la intensidad de excitación medida, que corresponde a la intensidad nominal del inducido y a un factor de potencia cero en sobreexcitación.

Paralela al eje de abscisas, se lleva una longitud $\overline{AF}$, igual a la intensidad de excitación I_{fk} que corresponde a la intensidad nominal del inducido sobre la curva de cortocircuito.

Se traza una línea paralela a la parte inferior rectilínea de la curva de saturación en vacío a partir del punto *F* hasta su intersección con *H*, de la curva de saturación en vacío.

La longitud *GH* representa la caída de tensión en la reactancia X_p, para la intensidad nominal del inducido.

6.12.1 *Determinación de la intensidad nominal de excitación por medio del diagrama de Potier*

Para determinar la intensidad de excitación nominal por medio del diagrama de Potier se hace uso de la curva de saturación de vacío, de la curva de cortocircuito y de la reactancia de Potier (fig. 6.26).

Se toma a lo largo del eje de abscisas el vector intensidad nominal del inducido I_n. Con su ángulo φ_n, que corresponde al factor de potencia nominal, se traza el vector tensión nominal U_n. El vector $I_n \cdot X_p$ de la caída de tensión se coloca en la extremidad del vector tensión, perpendicular a la intensidad del inducido.

La suma vectorial de la tensión nominal y de la caída de tensión en la reactancia da el vector E_f de la f. e. m. por fase.

La intensidad de excitación I_{fp} correspondiente a esta f. e. m. se determina sobre la curva de saturación en vacío y se traza sobre el diagrama a partir del origen y a 90° del vector de la f. e. m. (E_f).

La componente de intensidad de excitación que compensa la reacción del inducido a la intensidad nominal del inducido I_{fa} se determina efectuando la

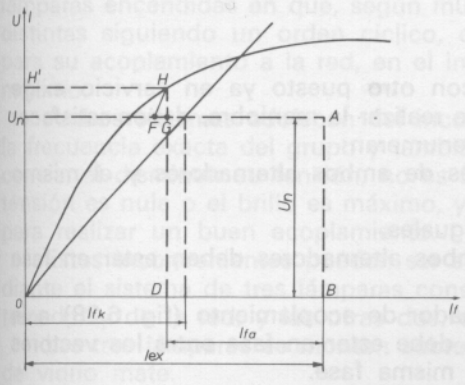


Fig. 6.25 Determinación de la reactancia de Potier.

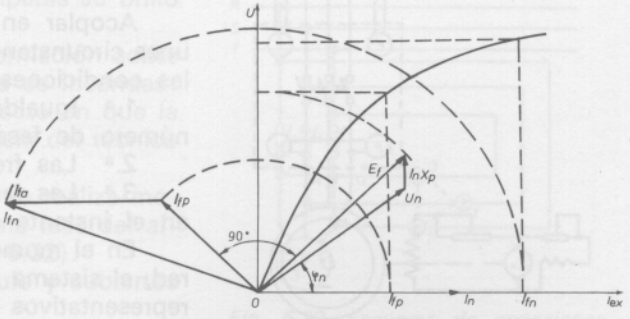


Fig. 6.26 Determinación de la intensidad nominal de excitación por medio del diagrama Potier.

diferencia entre la intensidad de excitación que corresponda a la intensidad nominal del inducido sobre la curva de cortocircuito trifásico permanente y la intensidad de excitación que corresponde a la caída de tensión en X_p, debida a la intensidad nominal del inducido sobre la curva de saturación en vacío.

El vector I_{fa} se traza a partir del extremo del vector I_{fp} paralelamente al vector de intensidad del inducido. La intensidad nominal de excitación I_{fn} es la suma vectorial de I_{fa} e I_{fp}.

6.13 Diagrama de Behn-Eschenburg

La caída de tensión de un alternador puede obtenerse mediante el diagrama de Behn-Eschenburg.

Para ello se mantiene constante la excitación en la máquina y la velocidad de rotación del motor de arrastre.

La caída de tensión interior por fase en el bobinado inducido es debida a la caída óhmica $V_R = R_f \cdot I_f$ y a la reactancia del inducido $V_X = X_p \cdot I_f$.

La resistencia por fase puede obtenerse por el método voltímetro y amperímetro o por el simple puente o doble puente.

La obtención de la resistencia del inducido R_1 de la fase *1* se calcula por medio de las fórmulas siguientes.

Para arrollamientos conectados en estrella:

$$R_1 = \frac{R_{12} + R_{31} - R_{23}}{2}$$

Para arrollamientos conectados en triángulo:

$$R_1 = \frac{2\,R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} - R_{31}} - \frac{R_{12} + R_{23} - R_{31}}{2}$$

en las que R_{12}, R_{23}, R_{31} designan las resistencias medidas respectivamente (por cualquiera de los sistemas indicados) entre los bornes 1-2, 2-3 y 3-1.

La reactancia puede obtenerse, con bastante aproximación, a partir del diagrama de Potier.

Si E_0 es la f. e. m. en vacío (para una determinada excitación y velocidad), V_f la tensión en bornes por fase, V_R y V_x las caídas de tensión en el inducido debido a las resistencias óhmica y reactiva, el valor vectorial de la f. e. m., será:

$$\vec{E_0} = \vec{V_R} + \vec{V_x} + \vec{V_f} \qquad [6.3]$$

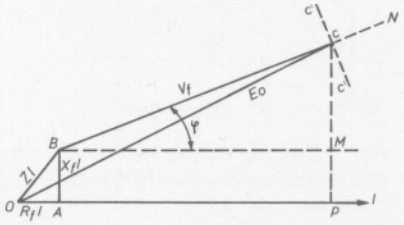


Fig. 6.27 Diagrama de Behn-Eschenburg.

Para obtener el diagrama de Behn-Eschenburg (fig. 6.27), se representa vectorialmente la expresión [6.3], que indica los valores de caídas de tensión en un régimen de trabajo determinado.

La caída de tensión en el interior del alternador viene dada por la diferencia de vectores de la f. e. m. y de la tensión en bornes de la máquina:

$$\vec{V_c} = \vec{E_0} - \vec{V_f}$$

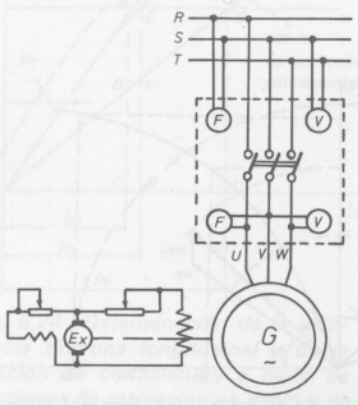


Fig. 6.28 Esquema de un alternador.

6.14 Acoplamiento de alternadores

Acoplar en paralelo un alternador con otro puesto ya en servicio exige unas circunstancias técnicas que, antes de realizar la maniobra, deben satisfacer las condiciones que a continuación se enumeran:

1.ª Igualdad de tensiones en bornes de ambos alternadores y el mismo número de fases y la misma secuencia.

2.ª Las frecuencias deben de ser iguales.

3.ª Las tensiones homólogas de ambos alternadores deben estar en fase en el instante de la conexión.

En el momento de conectar el alternador de acoplamiento (fig. 6.28) a la red, el sistema de tensiones entre ambos debe estar en fase entre los vectores representativos de las tensiones de una misma fase.

También puede expresarse indicando que, en el momento del cierre del sistema, las tensiones del alternador y de la red pueden estar en oposición de

fase. Parece una contradicción el hecho de que se admitan los dos estados de igualdad de fase y oposición de fase; significa, sin embargo, que en ambos casos se trata del convenio de sentido de vectores, en el que se encuentran en fase en el tiempo, en el primer caso, y en oposición en el segundo.

Si al acoplar el alternador a barras, la frecuencia de éste es diferente de la que tiene la red, y las tensiones eficaces son sensiblemente iguales, la tensión resultante es suma de ambas y la frecuencia resultante vale, como se ve en la figura 6.29,

$$f = f_1 - f_2$$

siendo:

f_1 = frecuencia de la red.
f_2 = frecuencia de la máquina por acoplar.

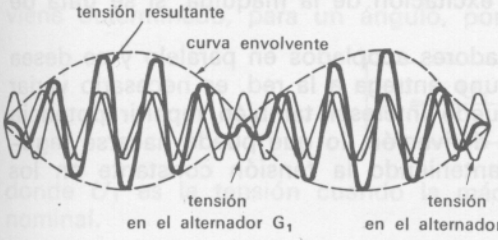


Fig. 6.29 Oscilaciones de tensiones, cuando las frecuencias no son iguales.

Para realizar una eficaz conexión, se dispone de los *sincronoscopios* de lámparas o de aguja con las que, maniobrados adecuadamente, puede obtenerse un buen acoplamiento a la red.

6.14.1 *Sincronoscopios*

Los más simples son los llamados sincronoscopios de lámparas.

Consiste en colocar tres lámparas conectadas entre los bornes homólogos de entrada y salida del interruptor general de conexión (fig. 6.30); la tensión a que pueden estar sometidas las lámparas es doble a la tensión de red.

Las lámparas, mientras las tensiones del alternador y frecuencia de la red no sean iguales, se encenderán y apagarán continuamente.

Excitando adecuadamente el alternador, se obtiene que la tensión de la máquina sea igual a la tensión de la red y, regulando el motor primario, se llega a conseguir que la frecuencia del alternador sea la misma que la señalada por el frecuencímetro de red.

El centelleo de las lámparas, realizada la maniobra anterior, será cada vez más largo; y, aprovechando el instante en que las lámparas se encuentren apagadas, se realiza la maniobra de conexión.

Si no hay sucesión de fases entre las barras y el alternador, se nota en la no coincidencia del encendido y apagado de las tres lámparas, lo que obliga a cambiar el orden de sucesión de fases sobre las barras o sobre el propio alternador.

La maniobra de sincronización de lámparas apagadas difiere de las llamadas lámparas encendidas en que, según muestra la figura 6.31, se conectan a fases distintas siguiendo un orden cíclico, debiéndose cerrar el interruptor general, para su acoplamiento a la red, en el instante de alcanzar las lámparas su brillo máximo.

Ambos sistemas adolecen del inconveniente de falta de información sobre la frecuencia exacta del grupo y también de que, en una lámpara de incandescencia, al disminuir su tensión, no es fácil saber el momento exacto en que la tensión es nula o el brillo es máximo, y se necesita una gran pericia del técnico para realizar un buen acoplamiento.

Estos inconvenientes pueden ser subsanados si la conexión se realiza mediante el sistema de tres lámparas conectadas, una sobre la misma fase del alternador y de la red, y las otras dos, sobre fases cruzadas (fig. 6.32).

Las tres lámparas se montan sobre los vértices de un triángulo y cubiertos de vidrio mate.

Cuando las frecuencias del sistema no son iguales, se observa un brillo que da la impresión de una luz giratoria en un sentido de giro determinado.

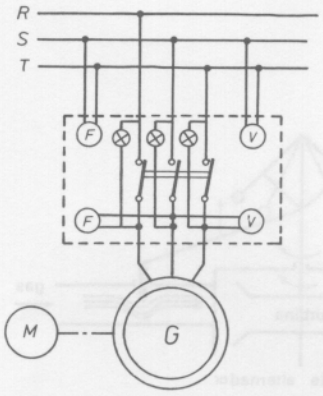


Fig. 6.30 Conexiones de un alternador para ser acoplado en paralelo con la red. Sincronoscopio de lámparas apagadas.

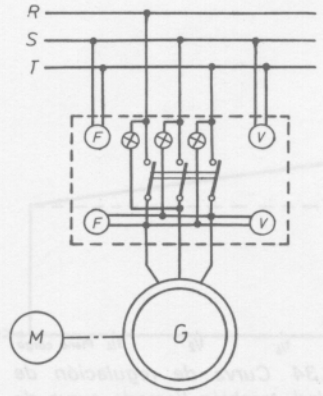


Fig. 6.31 Conexión de un alternador para ser acoplado en paralelo con la red. Sincronoscopio de lámparas encendidas.

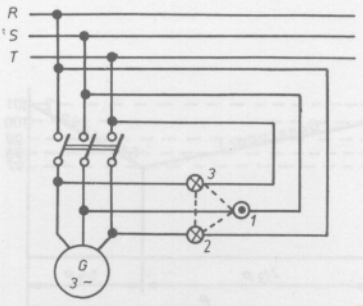


Fig. 6.32 Esquema de conexiones de un alternador a la red. Sincronoscopio de lámparas.

Si el alternador gira a una velocidad inferior a la de sincronismo, la luz gira en un sentido; y si la velocidad de la máquina es superior a la síncrona, el destello de luz gira en sentido opuesto.

Con este dispositivo es fácil averiguar la frecuencia del alternador y la velocidad del motor primario.

En el instante de conectar el alternador a la red, debe estar apagada la lámpara cuya conexión se ha realizado en la misma fase del sistema, y en las dos lámparas restantes del sincronoscopio, que se encuentran conexionadas en fases distintas, el brillo será máximo.

6.15 Reparto de carga entre generadores que trabajan acoplados en paralelo

Al conectar un alternador a una red de potencia infinita, hay que maniobrar sobre el par de arrastre del motor primario, si lo que se desea entregar a la línea es potencia activa, y variar la excitación de la máquina, si se trata de modificar la potencia reactiva.

Si en una central hay varios alternadores acoplados en paralelo y se desea modificar la potencia activa que cada uno entrega a la red, es necesario variar los pares de los motores primarios. Puede interesar también repartir potencia reactiva de las máquinas acopladas en derivación, lo que puede hacerse regulando la excitación del generador, manteniendo la tensión constante en los bornes.

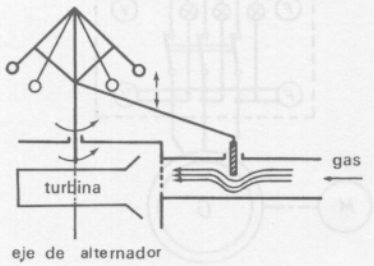


Fig. 6.33 Regulador centrífugo.

6.15.1 *Reparto de la carga entre dos generadores trifásicos síncronos que trabajan acoplados en paralelo*

Los motores primarios que accionan las máquinas generadoras disponen de unos reguladores de velocidad que tienen por misión aumentar o disminuir la velocidad del grupo cuando la carga crece o decrece.

Suponiendo que disminuye la carga del alternador, el par resistente será menor y, como consecuencia, aumentará la velocidad del sistema; en este preciso instante, una válvula reguladora es accionada y disminuye la admisión del fluido que entra en la turbina; con ello, hace decrecer el par y, en consecuencia, tiende a mantener constante la velocidad del grupo.

Si la carga aumentase, el par resistente crecería y el regulador se vería obligado a contrarrestar este aumento. Uno de los reguladores más empleado es el centrífugo (fig. 6.33).

Si la central dispone de un solo grupo, la velocidad indicada será aquélla en que la regulación del número de revoluciones por minuto, desde el momento que la máquina trabaja en vacío hasta que adquiere la plenitud de carga, según la curva de la figura 6.34, es de un 3 % de pendiente, donde las velocidades quedan representadas en las ordenadas y las potencias en las abscisas.

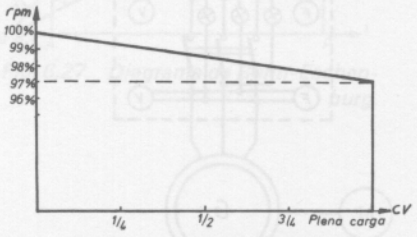


Fig. 6.34 Curva de regulación de velocidad, también llamada curva de estatismo.

Llamando f_1 a la frecuencia correspondiente a la velocidad que determina el regulador funcionando en vacío, y f_2 la frecuencia con una potencia P de plena carga, se denomina *coeficiente de regulación* o *estatismo* a la relación:

$$\delta = \frac{f_1 - f_2}{\frac{f_1 + f_2}{2}} = \frac{2\,(f_1 - f_2)}{f_1 + f_2} \approx \frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_1}$$

Para que un regulador sea óptimo, la diferencia de velocidades entre vacío y plena carga no debe exceder de un 3 %.

El reparto de la carga de dos alternadores acoplados a la red viene representada por la característica de la figura 6.35.

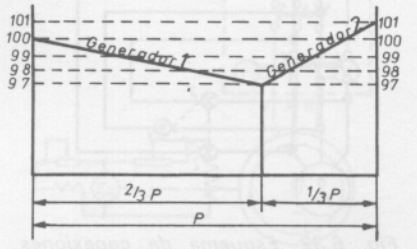


Fig. 6.35 Curva de regulación de velocidad de dos alternadores.

Es importante hacer notar que, cualquiera que sea la entrega de carga de cada uno de los generadores, la frecuencia de la red debe mantenerse constante; por lo tanto, la variación de velocidad de los motores primarios debe estar comprendida dentro del campo de regulación, para que el estatismo no alcance valores superiores al 3 %.

6.15.2 *Reparto de la potencia reactiva*

La potencia reactiva que entregan los generadores a la red al estar conectados en derivación viene determinada por el estatismo de los reguladores de tensión empleados y por la variación de intensidad de excitación de la máquina que modifica la potencia reactiva generada o absorbida por el alternador.

Si lo que se tiene son varios alternadores acoplados en derivación, la variación de la intensidad de excitación en uno puede cambiar el valor de la tensión en bornes de la máquina; se mantiene constante aquélla compensando en sentido contrario las excitaciones del resto de alternadores; por ello, al repartir la potencia reactiva entre todas las máquinas, se debe ajustar convenientemente la excitación en cada alternador, de manera que se obtenga un ángulo φ y una tensión V constantes en todos los alternadores.

La figura 6.36 indica gráficamente el reparto de las potencias reactivas entre dos alternadores, provistos cada uno de su correspondiente regulador de tensión; puede determinarse la corriente reactiva de cada máquina trazando una horizontal a partir de U_n hasta cortar las curvas correspondientes; los valores obtenidos de P_{r1} y P_{r2} y de $I_{ex.1}$ e $I_{ex.2}$ son respectivamente las potencias reactivas y las intensidades de excitación de cada máquina.

La misión de los reguladores de tensión consiste en limitar e impedir que la intensidad de excitación sea excesiva y que la tensión en bornes de la máquina exceda de los valores normales de plena carga. El estatismo de tensión viene determinado, para un ángulo, por la relación:

$$\varepsilon = \frac{U_1 - U_2}{U_2}$$

donde U_1 es la tensión cuando la máquina trabaja en vacío; y U_2, tensión nominal.

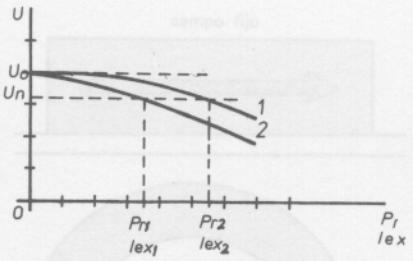


Fig. 6.36 Determinación gráfica del reparto de potencias reactancias entre dos alternadores.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Realícense, en el laboratorio, dos ensayos de: saturación en vacío y de cortocircuito brusco, así como sus curvas características.

— En el laboratorio de máquinas eléctricas, realícense las operaciones necesarias para el acoplamiento de dos alternadores en paralelo. Acoplados éstos, procédase al reparto de cargas.

CUESTIONARIO

6.1 ¿Qué ventajas e inconvenientes tienen los generadores de corriente alterna sobre los generadores de corriente continua?

6.2 ¿Puede ser autoexcitado un generador de corriente alterna?

6.3 ¿Qué bobinado produce el campo principal?

6.4 ¿Qué factores intervienen en la f. e. m. inducida en un alternador?

6.5 Al acoplar un generador en derivación, si la frecuencia es menor que la marcada por el frecuencímetro de línea, ¿qué maniobra hay que realizar para una adecuada conexión con la red?

6.6 ¿Cómo se llama la impedancia interna de un generador de corriente alterna?

6.7 ¿Qué conexión se realiza normalmente en el bobinado inducido de un alternador trifásico?

6.8 En un alternador, ¿cuál es el estator?, ¿cuál es el rotor?

6.9 En un alternador, ¿se necesita anillos rozantes si la armadura es estacionaria?

6.10 Si el rotor es cilíndrico, ¿para qué tipo de alternadores se emplea este dispositivo?

6.11 ¿Qué elementos se necesitan para una buena refrigeración de aire?

6.12 ¿Cuáles son las normas necesarias para poder acoplar correctamente un alternador a la red?

6.13 ¿Cuál es el valor de la f. e. m. generada por cada fase de un alternador trifásico hexapolar que gira a 1 000 r. p. m., sabiendo que tiene 108 espiras en serie por fase y cada polo emite 450 000 maxvelios?

6.14 Si la velocidad del rotor de un alternador es de 750 r. p. m. y la máquina tiene 6 polos, ¿cuál es la frecuencia?

6.15 Un alternador trifásico tiene el bobinado del inducido conectado en estrella, ha sido sometido a los ensayos de vacío y de cortocircuito, manteniendo constante la intensidad de excitación en 20 A y la velocidad del grupo gira a 750 r. p. m.

6.16 Se mide en vacío la tensión en bornes y ésta adquiere el valor de 3 000 V y, en el ensayo en cortocircuito, la corriente medida es de 200 A. Determinar la impedancia síncrona.

BIBLIOGRAFIA

RAPP J., *Tratado práctico de Electrotecnia. Máquinas eléctricas,* II tomo, Editorial Vagma, Bilbao 1965.

CORTES M., *Curso Moderno de máquinas eléctricas rotativas,* IV tomo, Editores Técnicos Asociados, S. A., Barcelona 1977.

Máquinas de corriente alterna, Enciclopedia CEAC de Electricidad, Ediciones CEAC, S. A., Barcelona.

Tema 7. **Campo giratorio**

OBJETIVOS

— *Comprobar el efecto que realiza el campo giratorio.*
— *Analizar la velocidad del campo magnético giratorio de un sistema de corrientes polifásicas.*
— *Saber por qué gira un motor eléctrico de corriente alterna.*

GUION

— Definiciones de campo y campo giratorio.
— Concepto geométrico con aplicación en electricidad y magnetismo.
— Efecto de campo giratorio sobre un rotor.
— Campo creado por un sistema de corrientes equilibradas senoidales.
— Descomposición del campo giratorio en otros dos.
— Campo giratorio trifásico.
— Campo producido por una corriente monofásica.
— Campo producido por una corriente bifásica.
— Aplicaciones de los campos giratorios.
— Velocidad de sincronismo.

PUNTOS CLAVE

— Valor del campo giratorio.
— Aplicaciones de los campos giratorios.
— Conocer el funcionamiento del rotor de un motor.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Repaso del Tema 2, circuitos de corriente alterna.
— Operaciones con vectores.

EXPOSICION DEL TEMA

7.1 Definiciones del campo y campo giratorio

La norma UNE, al definir el *campo,* lo hace:

a) *En sentido cualitativo:* como la región del espacio en la que se manifiestan ciertos fenómenos (fig. 7.1).

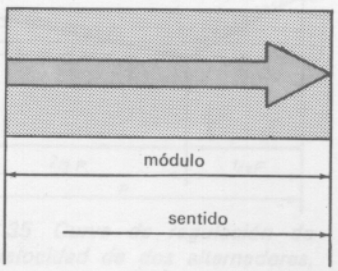


Fig. 7.2 Módulo y sentido del campo magnético.

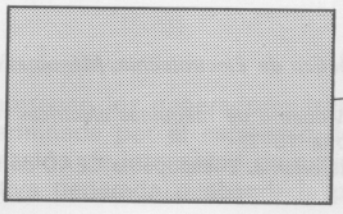
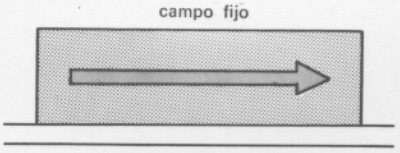


Fig. 7.1 Campo magnético.

b) *En sentido cuantitativo:* como la cantidad escalar o vectorial cuyo conocimiento permite valorar los efectos del campo (fig. 7.2).

Uniendo los dos conceptos, se define el *campo giratorio* diciendo que es el que sigue invariable con respecto a un determinado sistema giratorio de referencia (fig. 7.3).



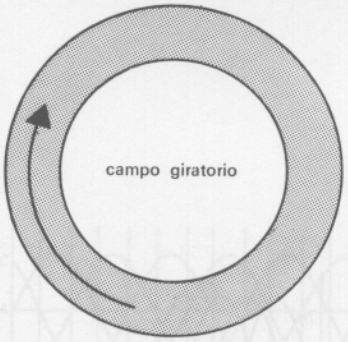


Fig. 7.3 Campo giratorio.

7.2 Concepto geométrico con aplicación en electricidad y magnetismo

a) *Cantidad escalar.* Cantidad completamente representada por un valor numérico único que lo refiere a una unidad de medida.

b) *Cantidad vectorial; vector.* Cantidad que posee, además de su valor numérico, una dirección.

c) *Campo vectorial.* Campo cuyo estado, en cada punto, está caracterizado por un vector.

d) *Campo uniforme.* Campo cuya intensidad y dirección son las mismas en todos los puntos del espacio considerado.

e) *Campo alterno.* Campo de dirección constante cuya intensidad es una magnitud alterna.

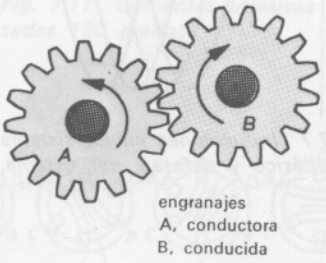


Fig. 7.4 Engranajes.

7.3 Efecto del campo giratorio sobre un rotor

Para comprender el efecto que realiza el campo giratorio sobre el rotor o rueda de un motor, puede ser útil comparar el campo giratorio con el sistema de transmisión mecánico de dos ruedas dentadas.

a) *Experiencia mecánica.* A la vista de la figura 7.4, se comprueba que el sentido de giro y la fuerza de arrastre que el engranaje *B* posee, dependen sólo del efecto originado por la rueda conductora *A* sobre la conducida *B*.

b) *Experiencia eléctrica.* Si se dispone de un sistema de corrientes polifásicas senoidales (fig. 7.5), éstas dan origen a un flujo giratorio, el cual proporciona unas fuerzas electrodinámicas capaces de poner en movimiento el rotor de un motor.

7.3.1 *Reflexión de ambas experiencias*

a) En ambos fenómenos se produce una fuerza tangencial.

b) El campo giratorio es capaz de producir, en el rotor, una velocidad al igual que lo hace la rueda conductora.

c) Fácilmente son identificables el efecto y la causa entre ambas experiencias.

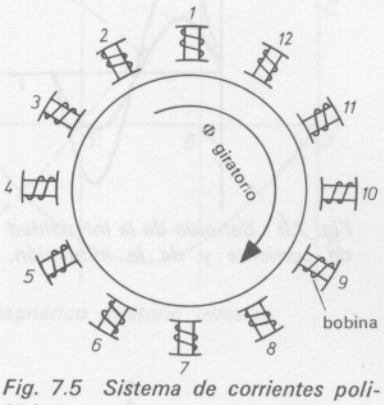


Fig. 7.5 Sistema de corrientes polifásicas.

7.4 Campo creado por un sistema de corrientes equilibradas senoidales

Un sistema equilibrado de corrientes de *m* fases que sigan una ley senoidal, y tenga situadas las bobinas en la periferia de un cilindro, crea un campo magnético giratorio; su efecto (suma vectorial de los campos producidos por cada bobina) mueven el disco (fig. 7.6) a una velocidad constante.

El vector fuerza es el campo establecido y es igual, en módulo, al producto de la mitad de la inducción máxima creada por una de las bobinas, y multiplicado por el número de las fases del sistema:

$$\beta_r = m \cdot \frac{\beta_o}{2}$$

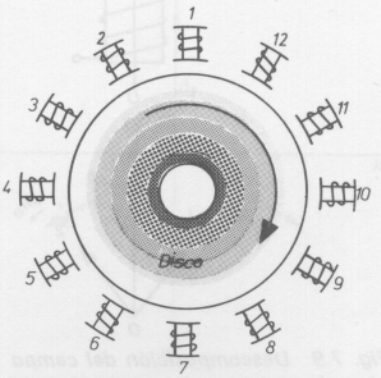


Fig. 7.6 Sistema de corrientes polifásicas de m *fases.*

7.4.1 *Intensidades e inducciones instantáneas producidas en un sistema polifásico*

A tenor de lo expuesto en el punto anterior, el valor de las intensidades instantáneas, en un sistema polifásico, valen:

$$i_1 = I_0 \cdot \operatorname{sen} \omega t$$

$$i_2 = I_0 \cdot \operatorname{sen} \left(\omega t - \frac{2\pi}{m}\right)$$

$$i_3 = I_0 \cdot \operatorname{sen} \left(\omega t - 2 \cdot \frac{2\pi}{m}\right)$$

$$i_4 = I_0 \cdot \operatorname{sen} \left(\omega t - 3 \cdot \frac{2\pi}{m}\right)$$

. . .

$$\boxed{i_n = I_0 \cdot \operatorname{sen} \left(\omega t - (n-1) \frac{2\pi}{m}\right)}$$

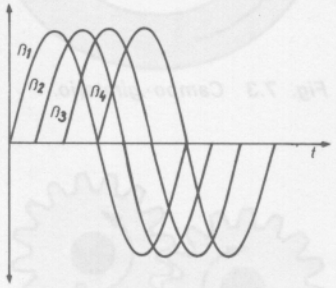


Fig. 7.7 Inducciones en un sistema polifásico y defasaje del sistema.

Las intensidades i_1, i_2, etc., son los valores instantáneos.
La corriente I_0 es el valor máximo.
Las expresiones entre paréntesis representan el desfase del sistema (fig. 7.7).
Respecto a los valores instantáneos de las inducciones, se tiene:

$$\beta_1 = \beta_0 \cdot \operatorname{sen} \omega t$$

$$\beta_2 = \beta_0 \cdot \operatorname{sen} \left(\omega t - \frac{2\pi}{m}\right)$$

$$\beta_3 = \beta_0 \cdot \operatorname{sen} \left(\omega t - 2 \cdot \frac{2\pi}{m}\right)$$

$$\beta_4 = \beta_0 \cdot \operatorname{sen} \left(\omega t - 3 \cdot \frac{2\pi}{m}\right)$$

. . .

$$\boxed{\beta_n = \beta_0 \cdot \operatorname{sen} \left(\omega t - (n-1) \cdot \frac{2\pi}{m}\right)}$$

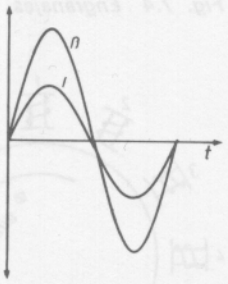


Fig. 7.8 Senoide de la intensidad de corriente y de la inducción.

De ambas fórmulas se comprueba que la intensidad de corriente está en fase con la inducción que crea (fig. 7.8).

7.4.2 *Descomposición del campo giratorio en otros dos*

Cada uno de los vectores representativos de las inducciones β_1, β_2, β_3, β_n, producidos por las intensidades parciales del sistema polifásico, pueden ser sustituidos por otros tantos pares de vectores que, partiendo de la posición normal del eje de las bobinas (fig. 7.9), dan dos vectores componentes iguales.

El módulo de estos nuevos vectores es igual a la mitad del valor máximo $\frac{\beta_0}{2}$.

En su rotación, el uno dextrógiro y el otro levógiro, giran en sentido contrario partiendo del eje *OM*.

La velocidad de los vectores es igual a la del campo alterno:

$$N = \frac{f}{p}$$

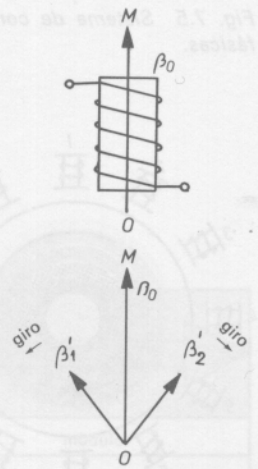


Fig. 7.9 Descomposición del campo giratorio en otros dos campos componentes.

7.4.2.1 *Teorema de Leblanc*

Un campo alterno puede descomponerse en dos giratorios de sentido contrario; la magnitud de cada uno es igual a la mitad de la magnitud del campo alterno; su velocidad de giro es igual a la que corresponde a la pulsación de la onda del campo alterno.

7.5 Campo giratorio trifásico

El devanado trifásico del estator del motor de la figura 7.10, está conectado en triángulo, y las bobinas de la misma fase han sido arrolladas en un mismo sentido.

El valor del campo es constante en módulo, aunque su posición varía continuamente en el tiempo.

Las formas de onda de las intensidades aplicadas al estator (fig. 7.11) se encuentran desfasadas un ángulo de 120°.

Para analizar la posición del campo en cada instante, basta con dividir el ciclo en seis partes; a cada división le corresponde un ángulo de 60°.

Las letras *A*, *B* y *C* representan las fases del sistema.

En la posición 1 del diagrama (fig. 7.12), la corriente en la fase *A* es cero, siendo nulo el campo en ese instante.

En cambio, en las fases *B* y *C* circula una corriente en sentido contrario, siendo positiva en la fase *C* y negativa en *B*.

Los campos tienen el mismo signo que el de la intensidad que lo origina.

La figura 7.12 aclara el sentido del campo giratorio en cada instante y la posición del mismo en el tiempo. No obstante, puede saberse fácilmente aplicando la regla de Maxwell.

En la posición 2, las intensidades de las tres fases han girado un ángulo de 60°, y el vector giratorio se ha desplazado un arco igual al de las corrientes, manteniéndose constante el módulo del vector campo.

Esta experiencia lleva a la conclusión de que, al aplicar una corriente alterna trifásica a los tres devanados, simétricamente distribuidos en el estator, produce un campo magnético giratorio.

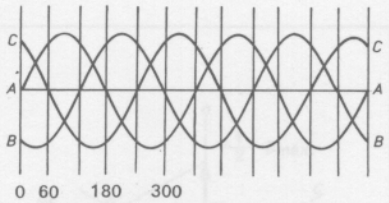


Fig. 7.11 Corrientes trifásicas defasadas 120 grados.

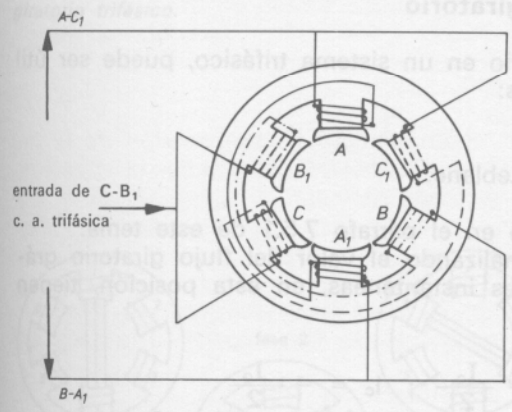


Fig. 7.10 Estator elemental trifásico de 6 polos.

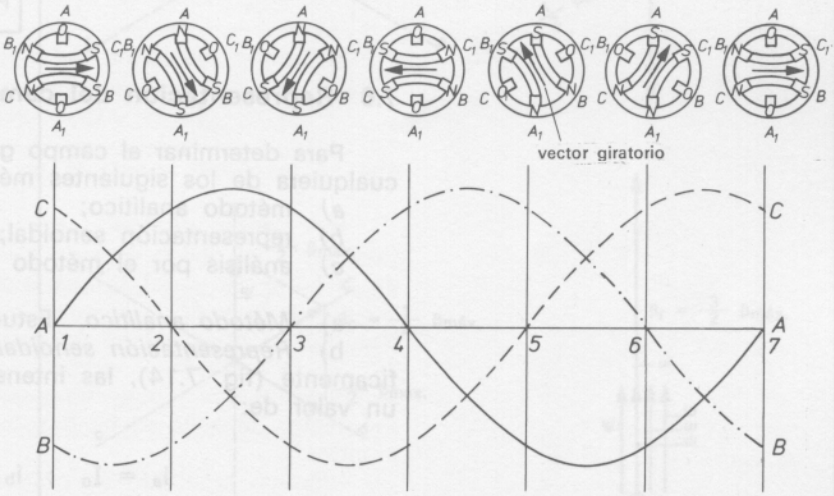


Fig. 7.12 Generación de un campo magnético giratorio trifásico.

7.5.1 *Valor del campo giratorio producido por un sistema de corrientes trifásicas*

Los tres vectores desfasados en 120° (fig. 7.13) representan los valores máximos de las inducciones.

Analíticamente se tiene:

$$\beta_1 = \beta_0 \cdot \text{sen } \omega t$$

$$\beta_2 = \beta_0 \cdot \text{sen } (\omega t - 120^\circ)$$

$$\beta_3 = \beta_0 \cdot \text{sen } (\omega t - 240^\circ)$$

Al proyectar estos valores sobre los ejes rectangulares *OX* y *OY*, queda:

a) Proyección sobre *OX*:

$$\beta_{1x} = 0$$

$$\beta_{2x} = \beta_0 \cdot \text{sen } (\omega t - 120^\circ) \cdot \cos 30^\circ$$

$$\beta_{3x} = \beta_0 \cdot \text{sen } (\omega t - 240^\circ) \cdot \cos 30^\circ$$

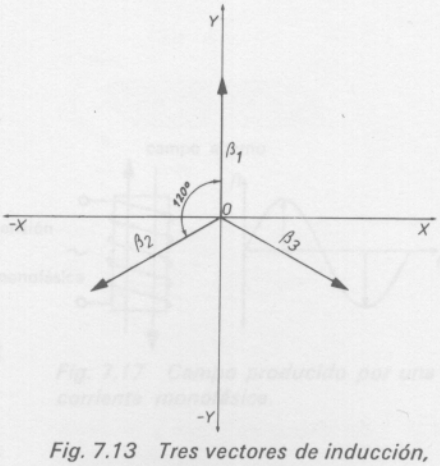


Fig. 7.13 Tres vectores de inducción, defasados 120 grados.

b) Proyección sobre *OY*:

$$\beta_{1y} = \beta_o \cdot \text{sen } \omega t$$

$$\beta_{2y} = \beta_o \cdot \text{sen } (\omega t - 120^o) \cdot \cos 60^o$$

$$\beta_{3y} = \beta_o \cdot \text{sen } (\omega t - 240^o) \cdot \cos 60^o$$

Sumando las proyecciones sobre cada uno de sus ejes y resolviendo los paréntesis, resulta:

$$\boxed{\beta_x = \beta_{1x} + \beta_{2x} + \beta_{3x} = 3 \cdot \frac{\beta_o}{2} \cdot \text{sen } \omega t}$$

$$\boxed{\beta_y = \beta_{1y} + \beta_{2y} + \beta_{3y} = 3 \cdot \frac{\beta_o}{2} \cdot \cos \omega t}$$

Por tanto, el valor de los tres campos será:

$$\boxed{\beta_r = \sqrt{\beta_x^2 + \beta_y^2} = \sqrt{\left(3 \cdot \frac{\beta_o}{2} \cdot \text{sen } \omega t\right)^2 + \left(3 \cdot \frac{\beta_o}{2} \cdot \cos \omega t\right)^2} = \frac{3}{2} \cdot \beta_o}$$

En general, para un sistema de corrientes polifásicas de *m* fases, el valor del campo giratorio se puede escribir:

$$\boxed{\beta_r = \frac{m}{2} \cdot \beta_o}$$

7.6 Representación del campo giratorio

Para determinar el campo giratorio en un sistema trifásico, puede ser útil cualquiera de los siguientes métodos:

a) método analítico;
b) representación senoidal;
c) análisis por el método de Leblanc.

a) *Método analítico.* Estudiado en el párrafo 7.5.1 de este tema.

b) *Representación senoidal.* Analizando el valor del flujo giratorio gráficamente (fig. 7.14), las intensidades instantáneas, en esta posición, tienen un valor de:

$$i_a = I_o \; ; \; i_b = -\frac{I_o}{2} \; ; \; i_c = -\frac{I_o}{2}$$

De la superposición de las tres ondas de los campos parciales, se deduce que, en el instante *p*, el campo resultante es igual a:

$$\boxed{\beta_r = \frac{3}{2} \cdot \beta_o}$$

c) *Análisis por el método de Leblanc.* Los tres devanados del estator (fig. 7.15) son recorridos por corrientes de un sistema trifásico.

El campo producido por I_a tiene una amplitud de $\beta_{máx.}$.

El vector campo (fig. 7.16A) se descompone en otros dos, cuyo módulo tiene un valor igual a $\frac{\beta_{máx.}}{2}$ y los sentidos de giro de los dos vectores son contrarios entre sí, ocupando en el espacio, en el estado inicial, la misma posición.

El campo producido por I_b (fig. 7.16B) tiene una amplitud media, al ser $i_b = -\frac{I_b}{2}$, y el sentido del campo es contrario al positivo que se le ha asignado, y mediante el método de Leblanc, se descompone asimismo en dos vectores giratorios.

Procediendo de idéntica forma, se obtiene el campo creado por I_c (fig. 7.16C), y con igual razonamiento se hallan los seis vectores giratorios (fig. 7.16D),

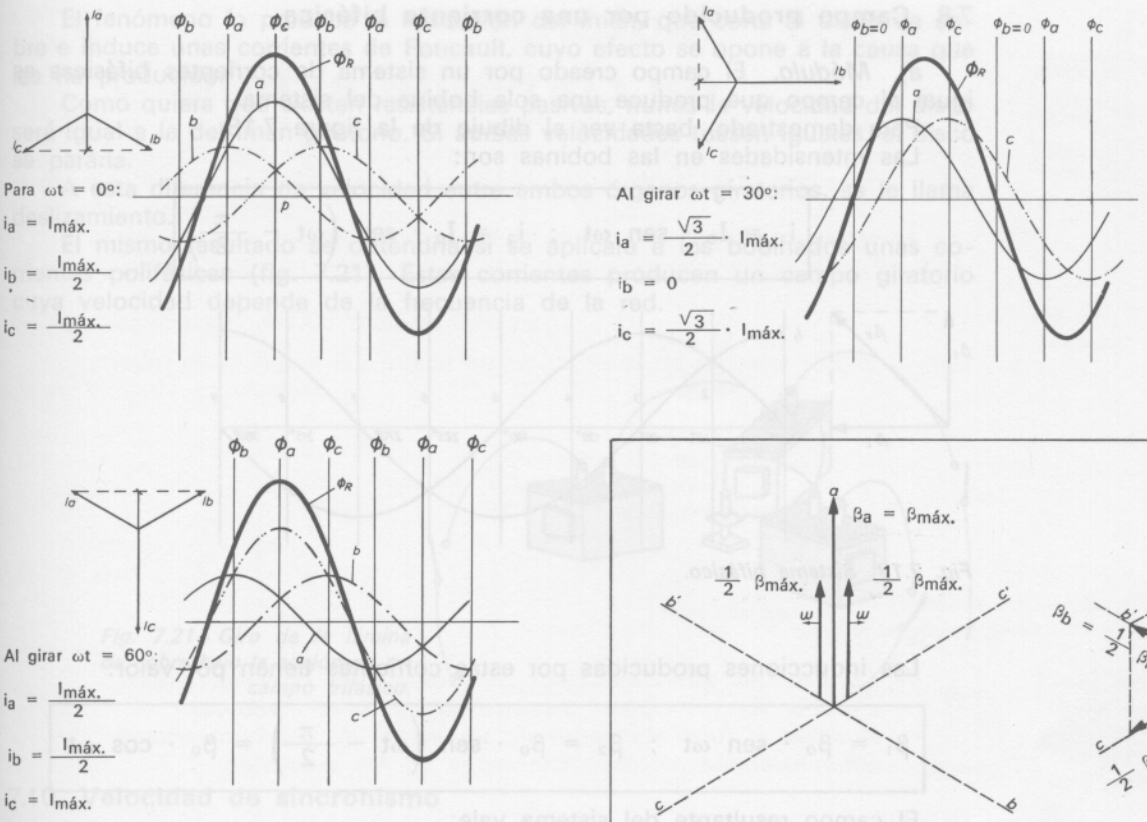


Fig. 7.14 Representación sinusoidal de un campo giratorio trifásico.

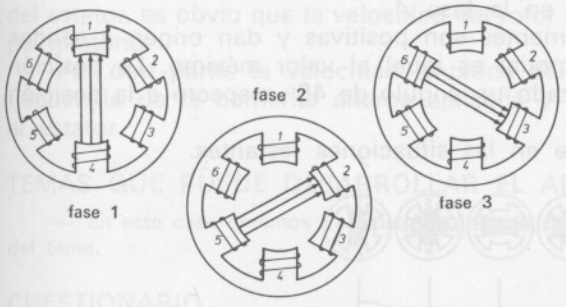


Fig. 7.15 Posición del flujo giratorio en el devanado del estator.

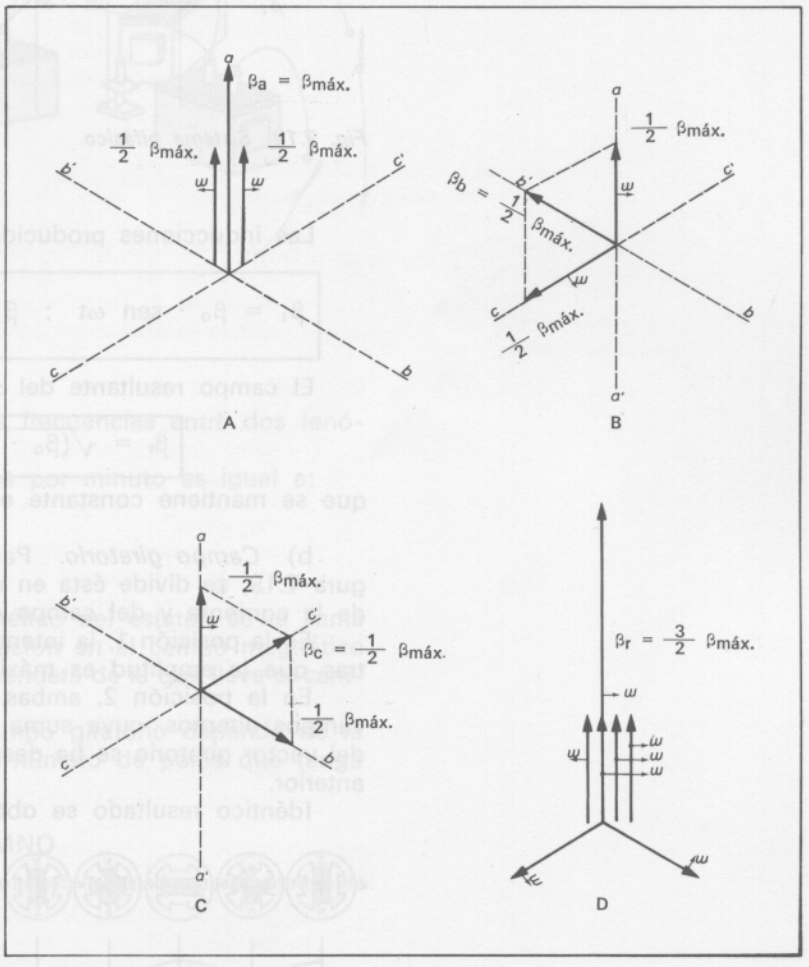


Fig. 7.16 Gráfico de Leblanc.

tres en cada sentido. Los que giran *ad dextrórsum,* el módulo tiene un valor de $\frac{3}{2}\beta_{máx.}$ y los que giran *ad sinistrórsum* la resultante del campo es cero.

7.7 Campo producido por una corriente monofásica

El campo producido por una corriente monofásica en una bobina está siempre sobre el eje de la misma (fig. 7.17), si bien su módulo variará en magnitud y sentido.

Este campo alterno puede ser sustituido por dos campos giratorios de valor constante y que giran a una velocidad de $N = \frac{f}{p}$ en sentido contrario.

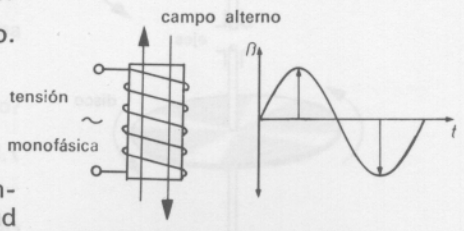


Fig. 7.17 Campo producido por una corriente monofásica.

7.8 Campo producido por una corriente bifásica

a) *Módulo.* El campo creado por un sistema de corrientes bifásicas es igual al campo que produce una sola bobina del sistema.

Para demostrarlo, basta ver el dibujo de la figura 7.18.

Las intensidades en las bobinas son:

$$i_1 = I_0 \cdot \operatorname{sen} \omega t \; ; \; i_2 = I_0 \cdot \operatorname{sen} \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

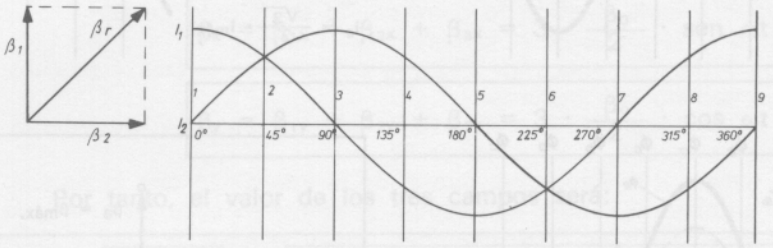


Fig. 7.18 Sistema bifásico.

Las inducciones producidas por estas corrientes tienen por valor:

$$\beta_1 = \beta_0 \cdot \operatorname{sen} \omega t \; ; \; \beta_2 = \beta_0 \cdot \operatorname{sen} \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \beta_0 \cdot \cos \omega t$$

El campo resultante del sistema vale:

$$\beta_r = \sqrt{(\beta_0 \cdot \operatorname{sen} \alpha)^2 + (\beta_0 \cdot \cos \alpha)^2} = \beta_0$$

que se mantiene constante en el tiempo.

b) *Campo giratorio.* Para mayor entendimiento y comprensión de la figura 7.19, se divide ésta en nueve partes, con objeto de estudiar la situación de la corriente y del campo giratorio en cada instante.

En la posición 1, la intensidad y la inducción son cero en la fase *B*, mientras que la amplitud es máxima en la fase *A*.

En la posición 2, ambas corrientes son positivas y dan origen a sendos campos alternos, cuya suma vectorial es igual al valor máximo. La posición del vector giratorio se ha desplazado un ángulo de 45° respecto a la posición anterior.

Idéntico resultado se obtiene en las situaciones restantes.

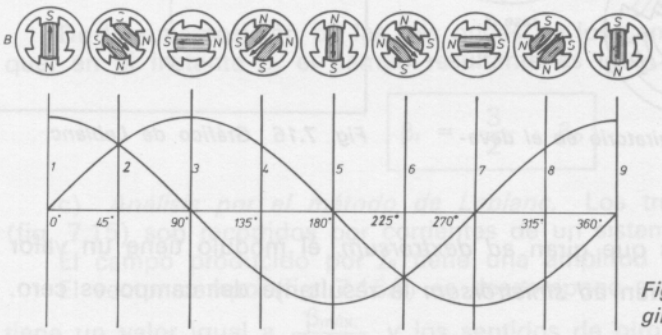


Fig. 7.19 Campo magnético giratorio bifásico.

7.9 Aplicaciones de los campos giratorios

Se dispone de un imán y un disco de cobre, ambos sobre dos ejes verticales independientes (fig. 7.20).

Si se hace girar el imán a cualquier velocidad en un sentido determinado, el disco de cobre también gira. La velocidad de éste es de un valor muy próximo a la del imán.

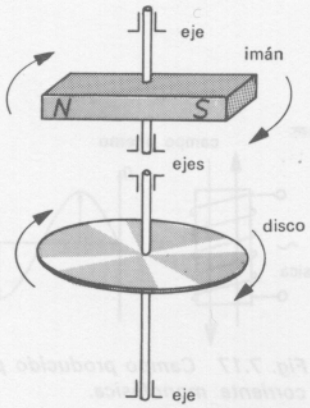


Fig. 7.20 Disco de cobre y un imán permanente.

El fenómeno lo produce la inducción del imán, que corta al disco de cobre e induce unas corrientes de Foucault, cuyo efecto se opone a la causa que las ha producido.

Como quiera que existen resistencias pasivas, nunca la velocidad del disco será igual a la del imán giratorio. Si ambas velocidades fuesen iguales, el disco se pararía.

A esta diferencia de velocidad entre ambos órganos giratorios, se le llama deslizamiento.

El mismo resultado se obtendría si se aplicara a los bobinados unas corrientes polifásicas (fig. 7.21). Estas corrientes producen un campo giratorio cuya velocidad depende de la frecuencia de la red.

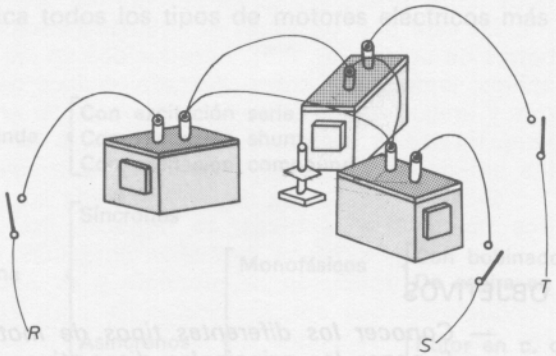


Fig. 7.21 Giro de la lámina de cobre bajo la acción de un campo trifásico.

7.10 Velocidad de sincronismo

Sincronismo se define como la identidad de frecuencias entre dos fenómenos periódicos.

La velocidad de sincronismo en revoluciones por minuto es igual a:

$$N = \frac{60 \cdot f}{p}$$

A la velocidad de rotación del campo magnético del estator, se le llama velocidad síncrona. Como el rotor sigue esta rotación en el campo magnético del estator, es obvio que la velocidad del rotor dependerá de la que lleve el campo giratorio.

Por otra parte, la velocidad síncrona del campo giratorio depende de la frecuencia de la corriente alterna aplicada y del número de polos que tenga el estator.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— En este caso creemos no existe posibilidad de poner este apartado, por el contenido del tema.

CUESTIONARIO

7.1 ¿Cuánto vale el módulo en un sistema de corrientes hexafásico?
7.2 ¿Qué es intensidad de campo?
7.3 ¿Qué es necesario acoplar a un devanado monofásico para que el flujo sea giratorio?
7.4 Explíquense los factores fundamentales que intervienen en un campo giratorio.
7.5 ¿Una corriente continua puede producir un campo giratorio?
7.6 Desarróllense las expresiones del valor del campo giratorio producido por un sistema de corrientes trifásicas.
7.7 ¿Cuánto vale el módulo de inducción si se trata de un sistema hexafásico?
7.8 ¿Cuál es el valor de la intensidad instantánea si $I_0 = 25$ A y el sistema es decafásico?
7.9 Desarrolla el método de Leblanc.

BIBLIOGRAFIA

MOELLER-WERR, *Máquinas de corriente continua. Máquinas de corriente alterna,* Editorial Labor, S. A., Barcelona 1967.

ALFARO SEGOVIA E., *Electricidad Industrial y Electrónica,* Editorial Dossat, S. A., Madrid 1964.

MORILLO FARGAN J., *Curso de Electrotecnia,* Nuevas Gráficas, S. A., Madrid 1958.

Tema 8. Motores de corriente alterna

OBJETIVOS

— *Conocer los diferentes tipos de motores de corriente alterna.*
— *Exponer los principales dispositivos de estas máquinas.*
— *Analizar el funcionamiento de un motor de corriente alterna.*
— *Diferenciar los motores asíncronos de los síncronos.*

GUION

— Generalidades.
— Rotor de jaula de ardilla y rotor bobinado.
— Deslizamiento y frecuencia del rotor.
— Principio de funcionamiento y ff. ee. mm. del rotor y estator.
— Par motor.
— Motores asíncronos monofásicos.
— Motores síncronos.
— Aplicaciones especiales de las máquinas asíncronas.
— Protección de las máquinas.

PUNTOS CLAVE

— Par motor o momento de rotación.
— Deslizamiento y frecuencia del rotor.
— Rendimiento.
— Fuerzas electromotrices rotóricas y estatóricas.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Inducción eléctrica. Procedimientos de inducción.
— Repaso del Tema 7, campo giratorio.
— Concepto de par o momento.
— Simbología normalizada de máquinas eléctricas.

EXPOSICION DEL TEMA

8.1 Generalidades

En el año 1888, publicó Ferraris su memorable trabajo sobre el campo giratorio empleando corrientes polifásicas y, con ello, creó las bases para la construcción de los motores asíncronos. Construyó también un pequeño motor bifásico con un rotor de cobre en forma cilíndrica el cual no dio los resultados apetecidos. Ferraris no se percató de la gran importancia práctica de su descubrimiento revolucionario. Es más, declaró en sus publicaciones que, el principio por él descubierto, no tenía importancia económica alguna, no siendo posible alcanzar rendimientos superiores al 50 % con los motores por entonces construidos.

Dejando a un lado lo propiamente histórico y fijando la atención en la cons-

titución de los motores eléctricos, estos tienen dos partes que les identifican del resto de receptores.

a) Estator (inductor) que es la parte fija.

b) Rotor (inducido) o parte móvil.

Ambas están formadas por núcleos de chapas magnéticas rodeados de bobinas de cobre que, al ser recorridas por una corriente eléctrica, originan unos flujos magnéticos que dan lugar al proceso de transformación con arreglo a las leyes electromagnéticas.

El rotor lleva un eje, de cuyo extremo se toma la potencia mecánica que se transmite a la máquina por medio de poleas, correas, engranajes, etc. (fig. 8.1).

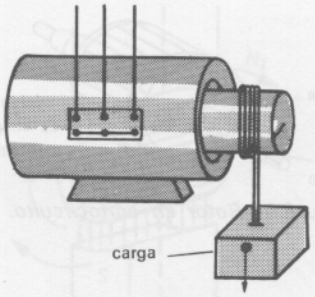


Fig. 8.1 Transmisión de la potencia mecánica.

8.1.1 *Clasificación de los motores eléctricos*

El cuadro de la figura 8.2 indica todos los tipos de motores eléctricos más corrientemente empleados.

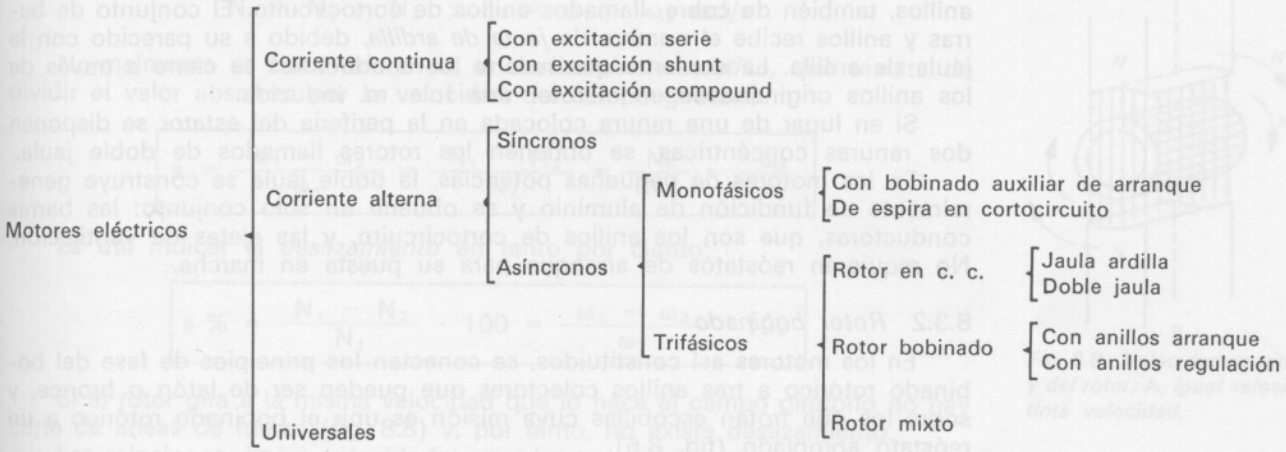


Fig. 8.2 Motores eléctricos.

8.2 Motor asíncrono trifásico: fundamento y construcción

La máquina asíncrona se compone fundamentalmente del estator y rotor (fig. 8.3). Ambos formados de chapas magnéticas apiladas, disponen de ranuras en las que se alojan los devanados estatórico y rotórico respectivamente, y en ellos tiene lugar la transformación de la potencia eléctrica absorbida en energía mecánica cedida por el eje.

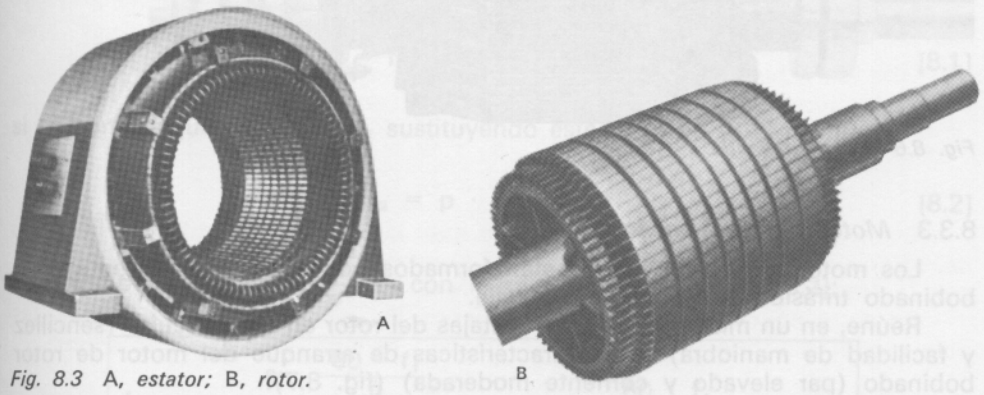


Fig. 8.3 A, *estator;* B, *rotor.*

Se denominan elementos inactivos a las partes que comprenden los dispositivos mecánicos puramente constructivos, tales como la carcasa o armazón, cojinetes, ventilador, ejes, etc.

El circuito magnético está constituido por el bloque de chapas magnéticas. El entrehierro (fig. 8.4), espacio de aire comprendido entre el estator y rotor que permite el giro de este último y tiene un valor constante en toda la circunferencia.

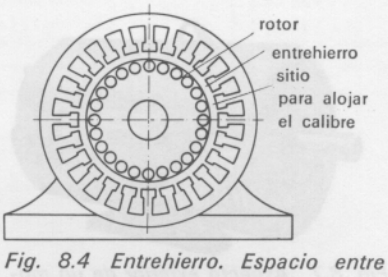


Fig. 8.4 Entrehierro. Espacio entre rotor y estator.

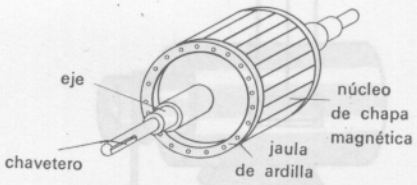


Fig. 8.5 Rotor en cortocircuito.

Los circuitos eléctricos van dispuestos: uno en las ranuras del estator, llamado estatórico o primario, y el otro en las ranuras del rotor, llamado rotórico o secundario.

El bobinado estatórico es alimentado por la tensión de línea, por lo que debe ser calculado para la tensión y frecuencia de la misma.

El bobinado rotórico admite diversas disposiciones, entre las que sobresalen los rotores en cortocircuito y los bobinados.

8.3 Rotor en cortocircuito o jaula de ardilla y rotor bobinado

8.3.1 *Rotor en cortocircuito*

En este tipo de rotor, el bobinado está formado por un cierto número de barras de cobre (fig. 8.5), introducidas en las ranuras y que van soldadas a dos anillos, también de cobre, llamados anillos de cortocircuito. El conjunto de barras y anillos recibe el nombre de *jaula de ardilla,* debido a su parecido con la jaula de ardilla. La corriente que recorre los conductores se cierra a través de los anillos originándose en el rotor una f. e. m. inducida.

Si en lugar de una ranura colocada en la periferia del estator se disponen dos ranuras concéntricas, se obtienen los rotores llamados de doble jaula.

En los motores de pequeñas potencias, la doble jaula se construye generalmente de fundición de aluminio y se obtiene un solo conjunto: las barras conductoras, que son los anillos de cortocircuito, y las aletas de ventilación. No requieren reóstatos de arranque para su puesta en marcha.

8.3.2 *Rotor bobinado*

En los motores así constituidos, se conectan los principios de fase del bobinado rotórico a tres anillos colectores que pueden ser de latón o bronce, y sobre los que frotan escobillas cuya misión es unir el bobinado rotórico a un reóstato apropiado (fig. 8.6).

Las condiciones constructivas de los devanados rotórico y estatórico son:

a) El número de polos en ambos bobinados debe ser igual.

b) Tanto el devanado rotórico como estatórico dispondrán del mismo número de fases. En la práctica se suelen utilizar los arrollamientos trifásicos.

c) El número de ranuras del rotor y estator ha de ser distinto a fin de evitar puntos muertos en el arranque del motor.

d) La tensión por fase del rotor puede elegirse a voluntad, de acuerdo con el valor de la intensidad de corriente secundaria.

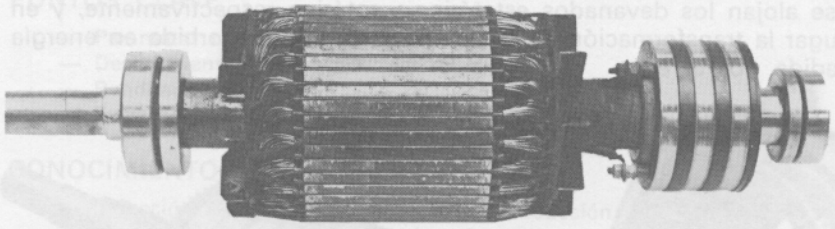


Fig. 8.6 Rotor bobinado.

8.3.3 *Motor de rotor mixto*

Los motores de rotor mixto están formados por una jaula resistente y un bobinado trifásico conectado en estrella.

Reúne, en un mismo motor, las ventajas del rotor en cortocircuito (sencillez y facilidad de maniobra) y las características de arranque del motor de rotor bobinado (par elevado y corriente moderada) (fig. 8.7).

El estator de estos motores se proyecta de manera semejante a los estudiados de rotor bobinado y cortocircuito.



Fig. 8.7 Aspecto exterior de un motor de rotor mixto.

8.4 Deslizamiento y frecuencia del rotor

8.4.1 *Deslizamiento*

Los motores trifásicos solamente pueden construirse para determinadas velocidades impuestas por el número de polos 2 p, y la frecuencia de la red f_1.

La velocidad de sincronismo del flujo giratorio en r. p. m. es:

$$N_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

Si el rotor está en movimiento y N_2 es el número de r. p. m., la velocidad angular vale:

$$\omega_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot N_2}{60} \text{ rad/s}$$

La diferencia de revoluciones por minuto del campo giratorio y del rotor recibe el nombre de *deslizamiento absoluto.*

$$N_s = N_1 - N_2 \; ; \; \omega_s = \omega_1 - \omega_2 \text{ rad/s}$$

Normalmente se hace referencia al *deslizamiento relativo,* que resulta de dividir el valor absoluto por la velocidad del campo giratorio.

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = \frac{N_1 - N_2}{N_1} = \frac{N_s}{N_1} = \frac{\omega_s}{\omega_1}$$

Es útil indicar el *deslizamiento* en tanto por ciento:

$$s\,\% = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \cdot 100 = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \cdot 100$$

Si el rotor gira a la misma velocidad que lo hace el campo giratorio no hay corte de líneas de fuerza (fig. 8.8) y, por tanto, no existe deslizamiento.

Las relaciones de las velocidades angulares y r. p. m. tiene por expresión:

$$s \cdot \omega_1 = \omega_1 - \omega_2$$

$$s \cdot \frac{2 \pi \cdot N_1}{60} = \frac{2 \pi \cdot N_1}{60} - \frac{2 \pi \cdot N_2}{60}$$

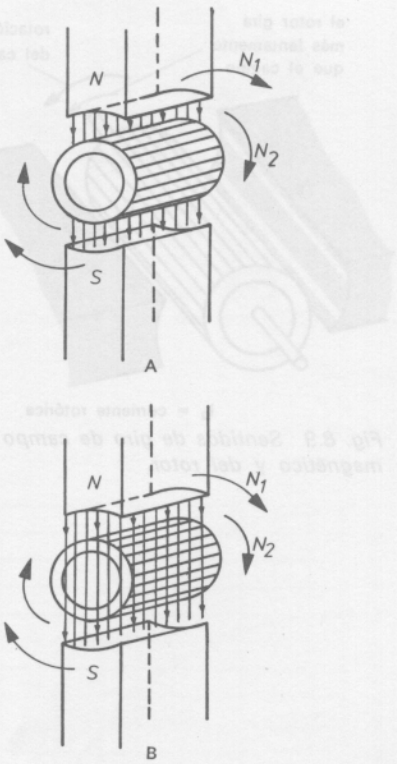


Fig. 8.8 Velocidad de giro del campo y del rotor: A, *igual velocidad;* B, *distinta velocidad.*

8.4.2 *Frecuencia del rotor*

Si el rotor está en movimiento los conductores del secundario cortan las líneas de fuerza del flujo giratorio e induce en el bobinado rotórico una f. e. m. alterna senoidal cuya frecuencia viene dada por:

$$f_2 = \frac{p}{60} \cdot N_s \qquad [8.1]$$

si se conoce que $N_s = s \cdot N_1$ sustituyendo este valor en [8.1] resulta:

$$f_2 = p \cdot \frac{s \cdot N_1}{60} \qquad [8.2]$$

por otra parte $N_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$ con lo que sustituyendo en [8.2]:

$$f_2 = p \cdot \frac{s \cdot \frac{60 \cdot f_1}{p}}{60} = p \cdot s \cdot \frac{60 \cdot f_1}{60 \cdot p} = s \cdot f_1$$

De lo que se desprende que si el rotor está en marcha la frecuencia rotórica es igual al deslizamiento por la frecuencia de la red.

El número de revoluciones por minuto del motor es:

$$N_2 = \frac{60 \cdot f_2}{p} = \frac{60 \cdot s \cdot f_1}{p} = s \cdot N_1$$

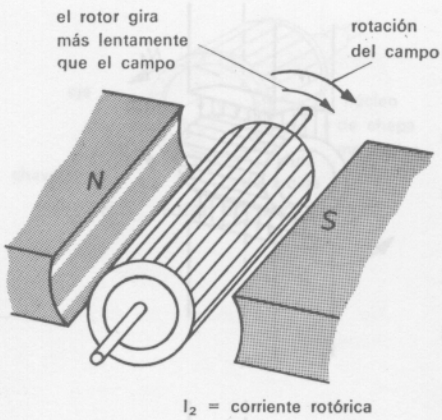


Fig. 8.9 Sentidos de giro de campo magnético y del rotor.

8.5 Campo giratorio

La potencia activa absorbida de la red por el motor asíncrono, descontando las pérdidas, se transmite mediante el campo giratorio que se crea en el devanado estatórico al rotor y se convierte en potencia mecánica.

El campo giratorio (fig. 8.9) induce en el devanado rotórico una tensión que da lugar a una corriente rotórica, supuesta la velocidad del rotor distinta de la síncrona. El hecho de que el rotor bajo carga no gire sincrónica sino asincrónicamente es consecuencia del deslizamiento de la máquina.

En el tema 7 se estudió ampliamente los efectos que producían el campo giratorio sobre el rotor o inducido de un motor.

8.6 Principio de funcionamiento y ff. ee. mm. del rotor y estator

Si el rotor lo tenemos bloqueado, el funcionamiento del motor en este estado es equivalente al de un transformador, si bien las particularidades constructivas de una y otra máquina hacen que presenten sus parámetros características diferentes.

En un transformador el campo magnético resultante de las ff. mm. mm. del primario y secundario es senoidal alternativo; mientras que en la máquina de inducción el campo magnético excitado por la onda de la f. m. m., resultante de los ampervueltas del estator y rotor, es de distribución senoidal a lo largo del entrehierro y giratorio.

Al estar el rotor del motor frenado la f. e. m. del inductor e inducido adquieren la expresión de:

$$E_1 = 2{,}22 \cdot K_1 \cdot f_1 \cdot n_1 \cdot \Phi$$

$$E_2 = 2{,}22 \cdot K_2 \cdot f_1 \cdot n_2 \cdot \Phi$$

donde:

E_1 y E_2 = ff. ee. mm. por fase del estator y rotor respectivamente;
n_1 y n_2 = número de espiras por fase de cada bobinado;
f_1 = frecuencia de la red;
K_1 y K_2 = factores de paso y distribución en los bobinados;
Φ = flujo por polo.

fórmulas que reflejan la identidad con las ff. ee. mm. del primario y secundario de un transformador y que no se demuestran por ser materia de otros cursos.

Si el eje del motor gira, el flujo corta a los conductores del rotor a la velocidad del deslizamiento. En este instante la frecuencia de rotor, como ya se ha visto, es de $f_2 = s \cdot f_1$ y la f. e. m. generada por fase en el inducido es:

$$2{,}22 \cdot K_2 \cdot f_1 \cdot s \cdot n_2 \cdot \Phi = E_2 \cdot s = E_{2s}$$

Expresión que se interpreta diciendo que: la f. e. m. generada en cada fase del rotor a la velocidad nominal es igual al producto del valor del deslizamiento por la fuerza electromotriz generada a rotor bloqueado.

En estas condiciones de funcionamiento, la intensidad rotórica I_2 que circula por el devanado constituye un circuito cerrado y adquiere el valor:

$$I_2 = \frac{s \cdot E_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2 \cdot X_2^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}$$

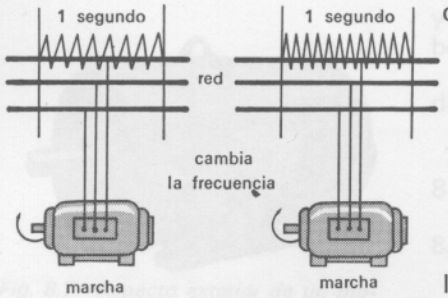


Fig. 8.10 Influencia de la frecuencia.

Al variar la frecuencia del rotor con el deslizamiento, lo hacen también la tensión inducida y la reactancia del rotor, por ser ambas magnitudes función de la frecuencia (fig. 8.10).

8.6.1 *Rotor en reposo*

La ecuación general que relaciona la tensión del primario y secundario para una sola fase, adquiere la siguiente expresión:

$$U_1 = -E_1 + R_1 \cdot I_1 + jX_1 \cdot I_1 = -E_1 + (R_1 + jX_1) \cdot I_1 \quad [8.3]$$

$$0 = E_2 - R_2 \cdot I_2 - jX_2 \cdot I_2 = E_2 - (R_2 + jX_2) \cdot I_2 \quad [8.4]$$

siendo:

U_1 y E_1 = tensión de línea y f. e. m de primario respectivamente;
E_2 = f. e. m. del rotor, inducida por el flujo giratorio.
R_1 y X_1 = resistencia y reactancia del estator;
R_2 y X_2 = resistencia y reactancia del rotor;
I_1 = intensidad absorbida de la red por el motor;
I_2 = intensidad que circula por el rotor.

Como el secundario está en cortocircuito $U_2 = 0$.

8.6.2 *Rotor en movimiento*

Si el rotor se encuentra en movimiento la ecuación del circuito estatórico sigue siendo la misma que para el caso de rotor parado, o sea:

$$U_1 = -E_1 + (R_1 + jX_1) \cdot I_1$$

En cambio, al girar el rotor, la f. e. m. rotórica es: $E_{2s} = s \cdot E_2$ y una reactancia de valor $X_{2s} = s \cdot X_2$. La tensión secundaria en cortocircuito vale:

$$0 = E_{2s} - (R_2 + jX_{2s}) \cdot I_2 = s \cdot E_2 - (R_2 - j \cdot s \cdot X_2) \cdot I_2$$

dividiendo los miembros de esta ecuación por el deslizamiento, queda:

$$0 = E_2 - \left(\frac{R_2}{s} - jX_2\right) \cdot I_2$$

8.7 Par motor

En Mecánica, se denomina momento o par de fuerza, al producto de la fuerza por el brazo de palanca sobre el que actúa y se expresa en mkg (si la fuerza viene en kilos y el brazo en metros).

En los conductores del bobinado inducido de un motor se desarrollan fuerzas electrodinámicas tangentes a la superficie cilíndrica del rotor (fig. 8.11).

Cada una de estas fuerzas desarrolla su propio momento, expresado por el producto de la fuerza sobre el conductor y el radio del cilindro del rotor. La suma de todos los pares constituye el momento de rotación resultante de la máquina, llamado también *par motor.* Su valor es:

$$M = F \cdot \frac{D}{2}$$

La fuerza media adquiere el valor de:

$$F_{med.} = 2 \cdot \beta \cdot l \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$$

y el par interno,

$$M_i = F_{med.} \cdot n_2 \cdot \frac{D}{2} = K \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad [8.5]$$

donde:

n_2 = número de conductores del rotor;
Φ = flujo por polo;
I_2 = intensidad rotórica.

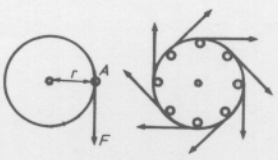


Fig. 8.11 Sentido de las fuerzas electrodinámicas.

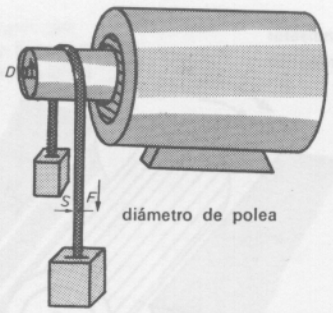


Fig. 8.12 Potencia desarrollada en el eje.

8.7.1 *Par nominal o momento de rotación nominal*

Si el rotor gira a la velocidad nominal, el par se determina partiendo de los valores de la potencia útil y de la velocidad del rotor.

En efecto: sea un motor cuyo rotor gira a una velocidad de *N* r. p. m.; si se acopla al eje una polea que tenga un diámetro de *D* metros y una correa que soporte una fuerza *F* (fig. 8.12), la potencia nominal del motor vale:

$$P = F \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{N}{60}$$

En caballos de vapor se expresa:

$$P = F \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot N}{75 \times 60} \text{ CV} \qquad [8.6]$$

como

$$2\ M = F \cdot D$$

sustituyendo en [8.6] resulta:

$$P = \frac{2 \cdot M \cdot \pi \cdot N}{75 \cdot 60}$$

y despejando el par

$$M = 716 \cdot \frac{P}{N}$$

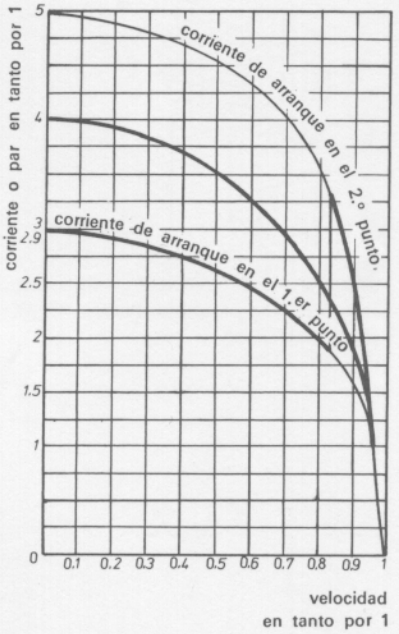


Fig. 8.13 Arranque de un motor. Curvas de par y corriente en función de la velocidad.

8.7.2 *Par de arranque*

El par de arranque o momento de rotación del motor depende de la conexión con la red. Si se conecta directamente a la tensión de alimentación, el par es elevado, pero también lo es la intensidad absorbida, siendo entonces necesario emplear alguno de los procedimientos que se estudian en el Tema 9, para reducir la intensidad que absorbe el motor en ese instante (fig. 8.13).

Como el par de arranque varía con el cuadrado de la tensión (como se verá) hay que examinar en cada caso si el motor tiene el par necesario, y saber disponer en su defecto de dispositivos adecuados de arranque, para que en cada caso pueda obtenerse el par y la intensidad idóneos.

La fórmula $M = 716 \frac{P}{N}$, no sirve para determinar el valor del par de arranque, ya que en ese momento N = 0, por lo que el valor de dicho par se determina experimentalmente mediante el freno de Prony (fig. 8.14).

El dispositivo está compuesto por dos mordazas de madera que abarcan a una polea colocada en el eje del motor; el conjunto se aprieta mediante dos tirantes *T* y dos tuercas *S*. La mordaza superior tiene una prolongación *B*, de cuyo extremo cuelga un peso *Q*. Si *d* es la distancia, en metros, desde el eje del motor al peso *Q*, el valor del par de arranque es: $M_a = Q \cdot d$ en mkg.

Prácticamente lo que importa es conocer la relación que hay entre el momento de arranque M_a y el de rotación nominal, es decir: M_a/M_n.

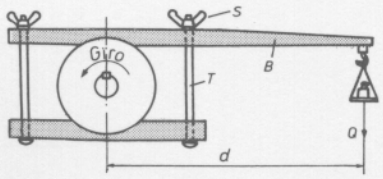


Fig. 8.14 Freno Prony.

8.8 Diversas magnitudes que tienen influencia en el funcionamiento del motor

8.8.1 *Influencia de la tensión de alimentación*

El momento de rotación de un motor asíncrono es directamente proporcional al cuadrado de la tensión en bornes. En efecto, se sabe que el momento de rotación es $M = K \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$, y que el flujo es proporcional al valor de la tensión de alimentación del motor, según se desprende de la fórmula de la f. e. m. inducida en el estator $E_1 = 2{,}22 \cdot K_1 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot N_1$.

La f. e. m. e intensidad rotóricas dependen del flujo giratorio, luego dos

de los parámetros que intervienen en el par de arranque, están en razón directa de la tensión de alimentación, luego queda justificado que (fig. 8.15):

$$\frac{M_n}{M'_n} = \frac{V^2}{V'^2}$$

y como la potencia nominal

$$P_n = \frac{M_n \cdot N}{716}$$

está en razón directa del par de arranque, también puede escribirse:

$$\frac{P_n}{P'_n} = \frac{\frac{M_n \cdot N}{716}}{\frac{M'_n \cdot N}{716}} = \frac{M_n}{M'_n} = \frac{V^2}{V'^2}$$

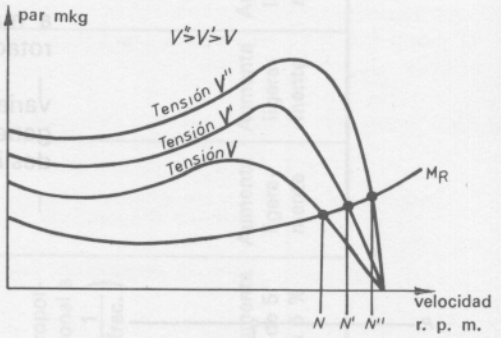


Fig. 8.15 Curvas del par en función de la velocidad, para distintos valores de tensión.

8.8.2 *Influencia de la frecuencia*

Se sabe que el valor del flujo magnético giratorio creado por el devanado del estator de un motor de inducción, es inversamente proporcional a la frecuencia; basta recordar la fórmula que apoya este principio:

$$E_1 = K_1 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot N_1$$

Igualmente, la f. e. m. rotórica depende del valor del flujo, por lo que las corrientes que recorren el bobinado del rotor varía en proporción inversa de la frecuencia de la red.

Como el par $M_n = K_2 \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$, dos de los factores que intervienen en esta expresión están en proporción inversa de la frecuencia, como son el flujo y la intensidad, luego puede escribirse que (fig. 8.16):

$$\frac{M_n}{M'_n} = \frac{f'^2}{f^2}$$

se enuncia diciendo que el par de un motor varía en proporción inversa del cuadrado de la frecuencia de la red.

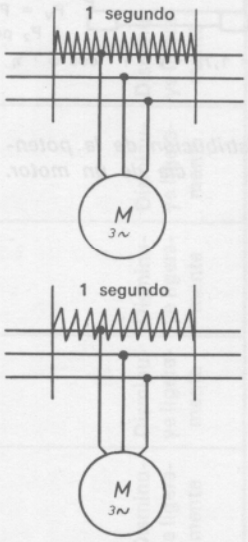


Fig. 8.16 Influencia de la frecuencia.

8.8.3 *Influencia del deslizamiento*

El valor del momento de rotación de un motor asíncrono depende del deslizamiento.

Uno de los factores que intervienen en el momento de rotación es la corriente rotórica y ésta depende de la f. e. m. que se origina en el inducido. El valor de esta f. e. m. está en función de la velocidad que tiene el rotor con respecto al campo giratorio, que es lo mismo que decir que depende del deslizamiento.

Si la corriente rotórica depende del *deslizamiento* y el momento de rotación de un motor depende de esta corriente, es fácil llegar a la conclusión de que el momento de rotación depende del deslizamiento.

La figura 8.17 representa diferentes estados de funcionamiento de un motor y que son: par de arranque, par máximo, par nominal, velocidades de sincronismo, vacío, carga nominal, carga crítica y carga de arranque. Estos puntos se obtienen en ejes de coordenadas rectangulares representando en abscisas las velocidades del rotor, y en ordenadas los momentos o pares de rotación.

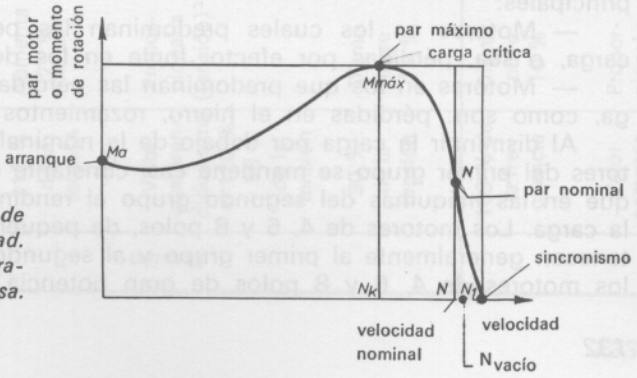


Fig. 8.17 Curvas del momento de rotación en función de la velocidad. Distintos estados por los que atraviesa.

8.8.4 *Influencia de la resistencia rotórica*

El valor del par viene influenciado por la resistencia del bobinado rotórico; a mayor resistencia mayor será el deslizamiento (siempre que el momento de rotación tenga un valor determinado).

Cualquier aumento o disminución de la resistencia del rotor origina una variación en la intensidad rotórica I_2 y, por tanto, obliga a la fuerza electromotriz generada en el devanado del inducido a incrementar la tensión y con ella el deslizamiento de la máquina (fig. 8.18).

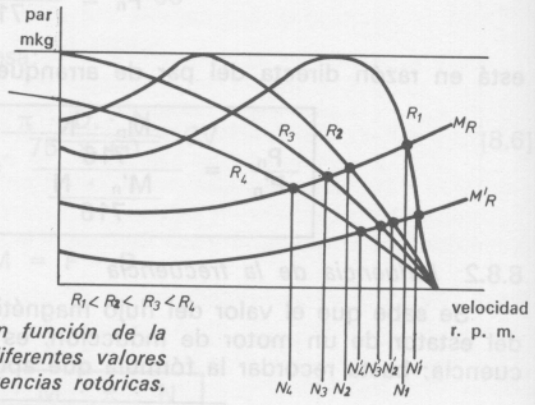


Fig. 8.18 Par en función de la velocidad para diferentes valores de resistencias rotóricas.

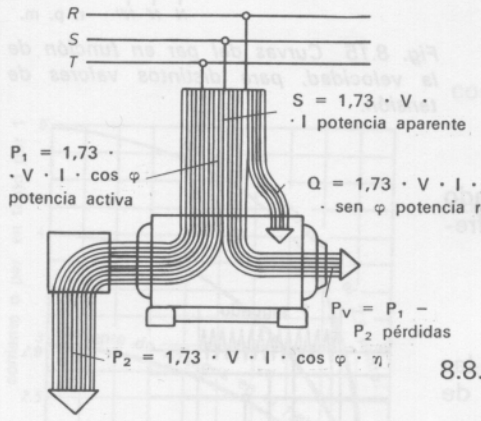


Fig. 8.21 Distribución de la potencia de un motor.

8.8.5 *Efectos de la variación de tensión y frecuencia*

La tabla 8.19 representa, con carácter general, los efectos que la variación de tensión y frecuencia originan en los parámetros de los pares, velocidad de sincronismo, deslizamiento, velocidad a plena carga, rendimiento, factor de potencia, intensidades, etc., en los motores asíncronos.

8.9 Averías más frecuentes en los motores asíncronos trifásicos

A la hora de detectar una avería, el electricista debe conocer muy bien la tecnología de la máquina y la causa perturbadora del mal funcionamiento y, en consecuencia, adoptar el remedio oportuno. La tabla 8.20 indica algunas de las averías más frecuentes.

8.10 Rendimiento

Rendimiento es la relación entre la potencia mecánica suministrada por el eje y la absorbida de la red. La potencia suministrada es igual a la absorbida menos la totalidad de pérdidas.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Potencia desarrollada en el eje}}{\text{Potencia activa absorbida}} \cdot 100\ \%$$

En la figura 8.21 se ve la curva de rendimiento de un motor trifásico de 4 kW, 1 500 r. p. m., para distintas potencias activas absorbidas. Transcurre el rendimiento prácticamente constante en una amplia zona, de forma que, incluso a media carga, se mantiene constante.

Con relación a la distribución de las pérdidas, se distinguen dos casos principales:

— Motores en los cuales predominan las pérdidas dependientes de la carga, o sea, pérdidas por efecto Joule en los devanados.

— Motores en los que predominan las pérdidas independientes de la carga, como son: pérdidas en el hierro, rozamientos y ventilación.

Al disminuir la carga por debajo de la nominal, el rendimiento de los motores del primer grupo se mantiene casi constante e incluso aumenta, mientras que en las máquinas del segundo grupo el rendimiento cae rápidamente con la carga. Los motores de 4, 6 y 8 polos, de pequeña y mediana potencia, pertenecen generalmente al primer grupo y al segundo corresponden, sobre todo, los motores de 4, 6 y 8 polos de gran potencia (fig. 8.22).

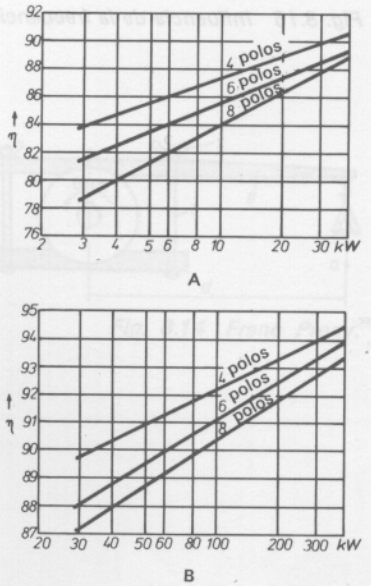


Fig. 8.22 Rendimientos aproximados con rotor jaula: A, *para motores de 30 a 40 kW;* B, *de 30 a 400 kW.*

Tabla 8.19 Efecto de las variaciones de la tensión o de la frecuencia en las características de los motores de inducción

	Variación sobre el valor nominal	Par de arranque y par normal	Velocidad de sincronismo	Deslizamiento %	Velocidad a plena carga	Rendimiento			Factor de potencia			Corriente a plena carga	Corriente de arranque	Elevación de temperatura a plena carga	Capacidad de sobrecarga máxima	Ruido magnético particularmente en vacío
						a plena carga	a 3/4 de carga	a 1/2 carga	a plena carga	a 3/4 de carga	a 1/2 carga					
Tensión	120 % de la tensión	Aumenta 44 %	No cambia	Disminuye 30 %	Aumenta 1,5 %	Pequeño aumento	Disminuye de 1/2 a 2 puntos	Disminuye de 7 a 20 puntos	Disminuye de 5 a 15 puntos	Disminuye de 10 a 30 puntos	Disminuye de 15 a 40 puntos	Disminuye 11 %	Aumenta 25 %	Disminuye 5° a 6 °C	Aumenta 44 %	Aumenta notablemente
	110 % de la tensión	Aumenta 21 %	No cambia	Disminuye 17 %	Aumenta 1 %	Aumenta de 1/2 a 1 punto	No cambia prácticamente	Disminuye de 1 a 2 puntos	Disminuye 3 puntos	Disminuye 4 puntos	Disminuye de 5 a 6 puntos	Disminuye 7 %	Aumenta de 10 a 12 %	Disminuye 3° a 4 °C	Aumenta 21 %	Aumenta ligeramente
	Valor comprendido entre el 120 % y 90 % de la tensión	Proporcional a (tensión)^2	No cambia	Proporcional a $\left(\frac{1}{\text{tens.}}\right)^2$	Proporcionada a la tensión	—	—	—	—	—	—	—	Proporcional a (tensión)	—	Proporcional a (tensión)^2	—
	90 % de la tensión	Disminuye 19 %	No cambia	Aumenta 23 %	Disminuye 1,5 %	Disminuye 2 puntos	No cambia prácticamente	Aumenta de 1 a 2 puntos	Aumenta 1 punto	Aumenta de 2 a 3 puntos	Aumenta de 4 a 5 puntos	Aumenta 11 %	Disminuye de 10 a 12 %	Aumenta 6° a 7 °C	Disminuye 19 %	Disminuye ligeramente
Frecuencia	105 % de la frecuencia	Disminuye 10 %	Aumenta 5 %	No cambia prácticamente	Aumenta 5 %	Aumenta ligeramente	Aumenta ligeramente	Aumenta ligeramente	Aumenta ligeramente	Aumenta ligeramente	Aumenta ligeramente	Disminuye ligeramente	Disminuye de 5 a 6 %	Disminuye ligeramente	Disminuye ligeramente	Disminuye ligeramente
	Valor comprendido entre el 105 % y 95 % de la frecuencia	Proporcional a $\left(\frac{1}{\text{frec.}}\right)^2$	Proporcional a la frecuencia	—	Proporcionada a la frecuencia	—	—	—	—	—	—	—	Proporcional a $\left(\frac{1}{\text{frec.}}\right)$	—	—	—
	95 % de la frecuencia	Aumenta 11 %	Disminuye 5 %	No cambia prácticamente	Disminuye 5 %	Disminuye ligeramente	Disminuye ligeramente	Disminuye ligeramente	Disminuye ligeramente	Disminuye ligeramente	Disminuye ligeramente	Aumenta ligeramente	Aumenta de 5 a 6 %	Aumenta ligeramente	Aumenta ligeramente	Aumenta ligeramente

Nota. Esta tabla indica los efectos con carácter general, que pueden variar algunas veces en casos especiales.

Tabla 8.20 Averías más frecuentes en los motores asíncronos trifásicos

Avería	*Causa*	*Remedio*
El motor no arranca	Dispositivo de sobrecarga (relé) disparado.	Esperar a que se enfríe el dispositivo de sobrecarga o relé y volver a probar a arrancar. Si el motor no arrancase, compruébense las causas indicadas más abajo.
	Línea desconectada.	Conectar la línea al aparato de control y éste al motor. Comprobar que los contactos no estén flojos.
	Fusibles defectuosos (abiertos).	Comprobar los fusibles.
	Tensión demasiado baja.	Comprobar si las características del motor corresponden a las de la línea de alimentación. Medir la tensión en los bornes del motor, con la carga conectada, para ver si el diámetro del conductor es el debido.
	Conexiones del aparato de control equivocadas.	Comprobar las conexiones con el esquema de conexiones del aparato.
	Conexión floja entre borne y conductor.	Apretar las conexiones.
	La máquina impulsada está atascada.	Desconectar el motor de la carga. Si el motor arranca bien, examínese la máquina impulsada.
	Circuito abierto en los devanados del rotor o del estator.	Localizar los circuitos abiertos.
	Cortocircuito en el devanado del estator.	Localizar la bobina en cortocircuito.
	Contacto a tierra en el devanado.	Localizar el devanado con el contacto a tierra.
	Cojinetes duros.	Arreglar la falta o cambiar el cojinete.
	Grasa demasiado dura.	Emplear lubricante apropiado para las condiciones especiales.
	Aparato de control defectuoso.	Proceder a su reparación o cambiar de aparato.
	Sobrecarga.	Reducir la carga.
Motor ruidoso	El motor funciona con una sola fase.	Parar el motor y probar a arrancar de nuevo. El arranque no podrá realizarse con una sola fase. Ver si existen conductores o circuitos rotos.
	Carga eléctrica desequilibrada.	Comprobar y corregir el desequilibrio.
	Bamboleo del eje (en los motores con cojinetes de deslizamiento).	Comprobar la alineación y estado de la correa. En los motores con cojinete de pedestal, comprobar el juego de la correa y la alineación axial del rotor.
	Trepidación.	La máquina impulsada está desequilibrada. Desconéctese el motor de la carga. Si el motor siguiera haciendo ruido, equilibrarlo.
	Entrehierro desigual.	Alinear el rotor o reemplazar los cojinetes.
	Cojinetes de bolas ruidosos.	Comprobar la lubricación. Reemplazar los cojinetes si el ruido es persistente y excesivo.
	Paquetes de láminas flojas o rotor flojo en el eje.	Apretar todos los pernos de sujeción.
	El rotor roza con el estator.	Centrar el rotor y reemplazar los cojinetes, si fuera necesario.
	Objetos aprisionados entre el ventilador y el escudo lateral.	Desmontar el motor y limpiarlo. Eliminar cualquier suciedad o basura alrededor del motor
	El motor se ha aflojado de la base.	Apretar los pernos de sujeción. Quizá sea necesario alinear el motor.
	Acoplamiento flojo.	Insertar láminas calibradoras en cuatro puntos de la junta de acoplamiento, para comprobar el alineamiento antes de apretar los pernos. Apretar bien los pernos.

Tabla 8.20 Averías más frecuentes en los motores asíncronos trifásicos (continuación)

Avería	*Causa*	*Remedio*
El motor se recalienta o humea	Sobrecarga.	Medir la carga con el amperímetro. Reducir la carga.
	Desequilibrio eléctrico de la carga.	Comprobar si existe desequilibrio de la tensión o si el motor trabaja en una sola fase.
	Fusible quemado, aparato de control defectuoso, etc.	Ver si existe algún circuito abierto en las líneas o circuitos.
	Ventilación defectuosa.	Limpiar los conductos de ventilación y los devanados.
	Tensión y frecuencia inadecuadas.	Comprobar los datos de la placa de características con los de la línea de alimentación. Comprobar también la tensión en los bornes del motor, durante la marcha a plena carga.
	Motor parado por la máquina impulsada o por cojinetes demasiado apretados.	Desconectar el motor de la línea de alimentación. Comprobar la causa de la parada de la máquina impulsada.
	Devanado del estator en cortocircuito.	Proceder a su reparación.
	Devanado del estator a tierra.	Proceder a su reparación.
	Conexiones flojas en los devanados del rotor.	Apretarlas, si fuera posible, o reemplazar el rotor.
	Correa demasiado estirada.	Eliminar la presión excesiva en los cojinetes.
	Empleo del motor para servicio de rápida inversión de la rotación.	Reemplazar el motor por otro apropiado para este servicio.
Recalentamiento de los cojinetes	Escudos laterales flojos o mal montados.	Ver si los escudos ajustan perpendicularmente y están bien apretados.
	Exceso de tensión de correa o empuje lateral de engranaje.	Reducir la tensión de la correa o la presión del engranaje y alinear los ejes. Evitar la transmisión del empuje al cojinete.
	Eje torcido.	Enderezar el eje o enviarlo al taller de reparaciones.
Cojinetes de deslizamiento	Insuficiente aceite.	Añadir aceite. Si el nivel estuviera muy bajo, vaciarlo, limpiar el depósito de aceite y volver a llenarlo.
	El aceite contiene materias extrañas o es de mala calidad.	Vaciar el aceite, limpiar el depósito y volver a llenarlo con lubricante industrial recomendado por una Casa de confianza.
	Los anillos de engrase no giran o giran lentamente.	Aceite demasiado espeso. Vaciar el depósito y volver a llenarlo. El anillo de engrase tiene algún punto desgastado. Instalar un anillo nuevo.
	Motor inclinado demasido.	Nivelar o reducir la inclinación, y realinear el motor, si fuera necesario.
	Anillos torcidos o deteriorados al montarlos.	Reemplazarlos.
	Anillo fuera de su ranura (sujetador del anillo fuera de su sitio).	Ajustarlo o colocar el sujetador.
	Empuje axial debido a inclinación del motor.	Nivelar el motor, reducir el empuje o emplear un motor apropiado para el caso.
	Cojinetes defectuosos o eje áspero.	Reemplazar los cojinetes. Alisar el eje.
Cojinetes de bolas	Grasa excesiva.	Quitar el tapón de descarga, con el motor en marcha. Si el exceso de grasa no saliese, enjuagar con aceite ligero y volver a lubricar.
	Clase de grasa inadecuada.	Añadir grasa apropiada.
	Grasa insuficiente.	Quitar el tapón de descarga y añadir grasa al cojinete.

Tabla 8.20 Averías más frecuentes en los motores asíncronos trifásicos (continuación)

Avería	*Causa*	*Remedio*
	La grasa contiene materias extrañas.	Lavar los cojinetes con aceite ligero y volver a engrasarlos; comprobar que la grasa esté limpia. (Mantener la lata tapada cuando no se vaya a usar).
	Cojinetes desalineados.	Alinear el motor y revisar el montaje de la caja del cojinete. Ver si los anillos de guía están exactamente en ángulo recto con el eje.
	Cojinetes deteriorados (oxidados, etc.).	Reemplazar los cojinetes.
Motores con rotor bobinado		
El motor marcha a baja velocidad con la resistencia externa desconectada.	Los cables de conexión al aparato de control son de diámetro insuficiente. Aparato de control situado demasiado lejos del motor.	Emplear conductores de sección mayor. Acercar el aparato de control (para reducir la longitud de los cables de conexión).
	Circuito abierto en el rotor (incluso en el cable de conexión al aparato de control).	Comprobar por el método del timbre y corregir.
	Las escobillas chispean.	Limpiarlas, y si es necesario, reemplazarlas.
	Suciedad entre la escobilla y el anillo.	Limpiar los anillos y el aislamiento.
	Escobillas trabadas en los portaescobillas.	Emplear escobillas de tamaño adecuado.
	Ajuste inadecuado de la presión de escobillas.	Comprobar el ajuste y corregirlo.
	Anillos colectores ásperos.	Limarlos, esmerilarlos y pulirlos.
	Anillos excéntricos.	Tornearlos o redondearlos por medio de herramienta portátil, sin desmontar el motor.
	Vibración excesiva.	Equilibrar el motor.
	Excesiva densidad de la corriente de las escobillas (sobrecarga).	Reducir la carga. Si las escobillas hubiesen sido reemplazadas, comprobar que son de la misma clase que las suministradas con el motor.

8.11 Motores asíncronos monofásicos

Así como en los motores trifásicos el flujo giratorio es originado por tres corrientes monofásicas defasadas entre sí 1/3 de período, es decir, 120° eléctricos, y la acción mutua de este flujo y las corrientes inducidas en el rotor obligan a girar al inducido, en los motores monofásicos, como su nombre indica, el flujo se crea por una sola corriente que recorre el bobinado del estator. Este flujo es de dirección constante pero variable, siendo proporcional en cada instante al valor de la intensidad que absorbe de la red.

Para hacer girar el rotor hay que dotar al motor de un dispositivo especial para el arranque (fig. 8.23).

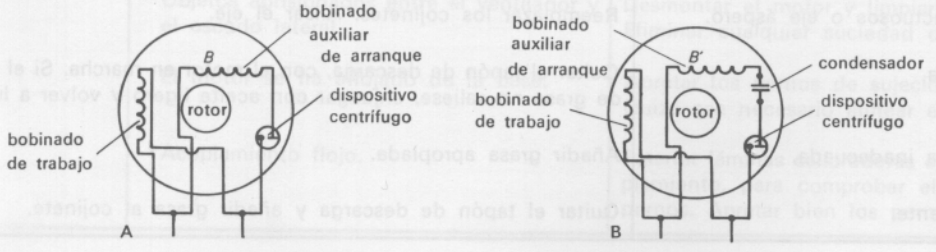


Fig. 8.23 Dispositivos de arranque: A, con bobinado de arranque; B, con bobinado de arranque y condensador.

Los motores monofásicos que más interés presentan son:

a) Motores provistos de bobinado auxiliar.

b) Motores con espira de cortocircuito.

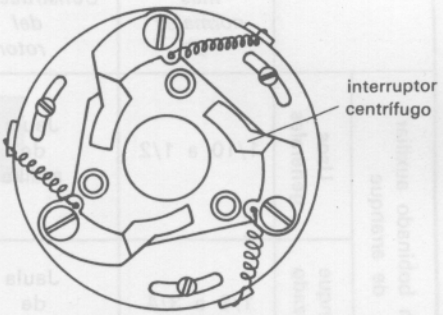


Fig. 8.25 Centrífugo.

8.11.1 *Motor monofásico con bobinado auxiliar de arranque o de fase partida*

Uno de los dispositivos especiales para el arranque de los motores monofásicos consiste en disponer un bobinado auxiliar *B* (fig. 8.24), en la armadura del estator. Se hace que el motor monofásico funcione como el bifásico durante el arranque, ya que las corrientes absorbidas por ambos bobinados crean dos flujos desfasados e impulsan al rotor a girar. Cuando la velocidad del rotor adquiere un valor próximo al de régimen nominal, un dispositivo centrífugo (figura 8.25), desconecta automáticamente el bobinado auxiliar y el motor funciona únicamente con el bobinado monofásico de trabajo.

Estos motores están proyectados para el accionamiento de máquinas que requieren un arranque en vacío o un par de arranque moderado, aproximadamente 1,75 veces el valor nominal.

Si se quiere que estos motores tengan un fuerte par de arranque (superior a 3,5 veces el nominal) se les dota de un condensador *C*, conectado en serie con el bobinado de arranque y junto a un mayor par de arranque, se consigue también mejorar su rendimiento y factor de potencia.

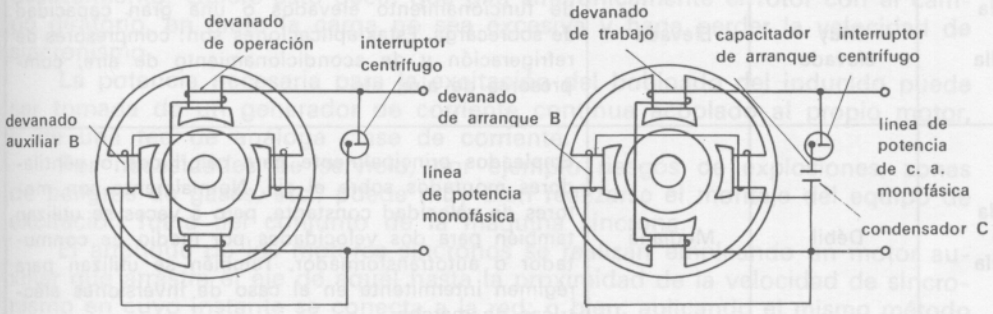


Fig. 8.24 Arranques con bobinado auxiliar.

8.11.2 *Motores monofásicos de espira en cortocircuito*

En los motores de rotor de jaula de ardilla y estator de polos salientes, el arranque se produce por la acción de las bobinas polares del estator y de las espiras en cortocircuito colocadas en las masas de los polos (fig. 8.26).

El flujo Φ_p creado por el bobinado estatórico, que atraviesa la espira en cortocircuito *C*, genera en ésta una f. e. m. inducida. En la espira aparece una elevada intensidad que crea un nuevo flujo Φ_c desfasado con respecto al flujo Φ_p, resultando así un sistema de dos flujos que impulsan a girar al rotor.

En la tabla 8.27 se comparan los principales tipos de los motores monofásicos, según el uso al que se le destina.

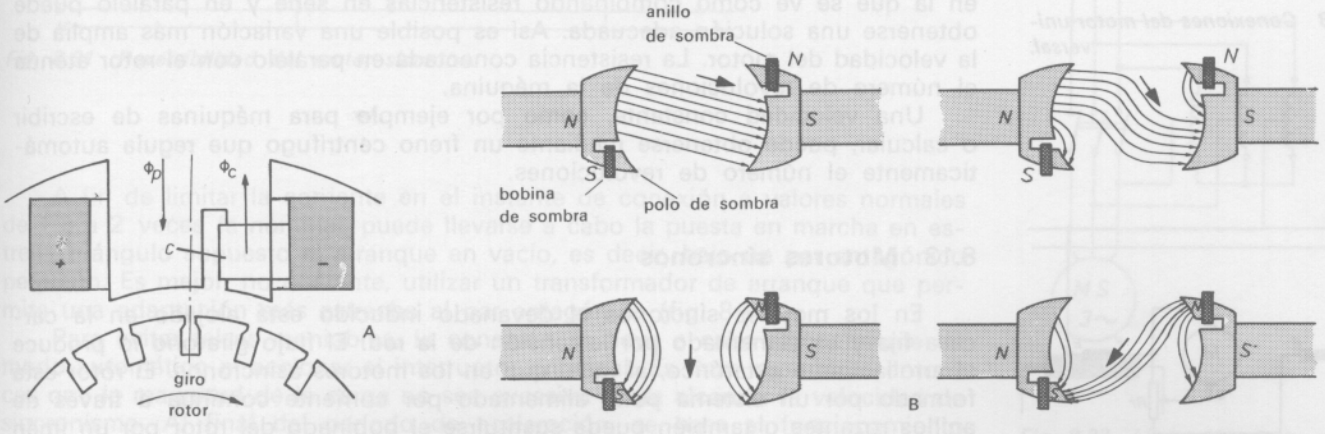


Fig. 8.26 Espira en cortocircuito. A, *posición en el polo;* B, *función que realiza.*

Tabla 8.27 Características generales de los principales tipos de motores asíncronos monofásicos

		Potencias más normales CV	Construcción del rotor	Par		Aplicaciones
				De arranque	Posibilidad de sobrecarga	
Con bobinado auxiliar de arranque	Usos generales	1/10 a 1/2	Jaula de ardilla	Discreto	Discreta	Este tipo de motor se utiliza en aplicaciones que requieran el arranque en vacío o un par de arranque moderado, como son: ventiladores, bombas centrífugas, frigoríficos, máquinas de coser o planchar, picadoras de carne, etc.
	Arranque reforzado	1/8 a 3/4	Jaula de ardilla	Fuerte	Bastante	Se utiliza en aquellas aplicaciones en las que se necesita un par de arranque elevado, pero sin que sea admisible el empleo de un condensador. Tales aplicaciones son: lavadoras, bombas aspirantes, etc.
Con espira en corto-circuito		1/12 a 1/4	Jaula de ardilla	Moderado	Moderada	Su par de arranque es moderado, por lo que son aplicables a usos domésticos en los que el arranque se efectúa en vacío o con carga muy reducida, como son: lavadoras, ventiladores, etc.
Con condensador	De arranque	1/8 a 3/4	Jaula de ardilla	Muy elevado	Elevada	Utilizables cuando se requieren pares de arranque y de funcionamiento elevados o una gran capacidad de sobrecarga. Estas aplicaciones son: compresores de refrigeración y de acondicionamiento de aire, compresores de aire, etc.
	Permanente	1/10 a 1	Jaula de ardilla	Débil	Mediana	Empleados principalmente para caloríficos o ventiladores montados sobre el eje. Normalmente son motores de velocidad constante, pero a veces se utilizan también para dos velocidades por medio de conmutador o autotransformador. También se utilizan para régimen intermitente en el caso de inversiones eléctricas de marcha.

8.12 Motores universales

Los motores universales (fig. 8.28), pueden ser conectados tanto a redes de corriente continua como alterna. En su construcción son análogos a los motores serie de corriente continua pero con la corona polar laminada a fin de reducir las pérdidas por corrientes parásitas.

Su velocidad depende de la carga, alcanzando en vacío velocidades elevadísimas que para ciertos trabajos son inadmisibles.

Intercalando resistencias con los bobinados puede gobernarse, entre amplios límites, la velocidad, si bien a costa de pérdidas relativamente elevadas.

Cuando haya que contar con períodos de marcha en vacío, ha de preverse una resistencia adecuada en paralelo con el inducido, para limitar la velocidad.

Se emplea como regulador de la velocidad la conexión de la figura 8.29, en la que se ve cómo combinando resistencias en serie y en paralelo puede obtenerse una solución adecuada. Así es posible una variación más amplia de la velocidad del motor. La resistencia conectada en paralelo con el rotor atenúa el número de revoluciones de la máquina.

Una velocidad constante, como por ejemplo para máquinas de escribir o calcular, puede obtenerse mediante un freno centrífugo que regula automáticamente el número de revoluciones.

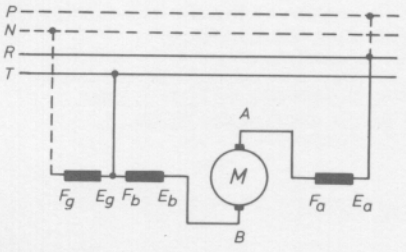


Fig. 8.28 Conexiones del motor universal.

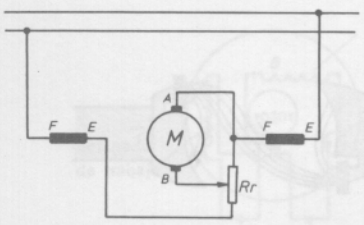


Fig. 8.29 Regulador de velocidad.

8.13 Motores síncronos

En los motores síncronos el devanado inducido está alojado en la carcasa fija y es alimentado por la tensión de la red. El flujo giratorio lo produce el arrollamiento estatórico, al igual que en los motores asíncronos. El rotor está formado por un sistema polar alimentado por corriente continua a través de anillos rozantes o también puede sustituirse el bobinado del rotor por un imán permanente (fig. 8.30).

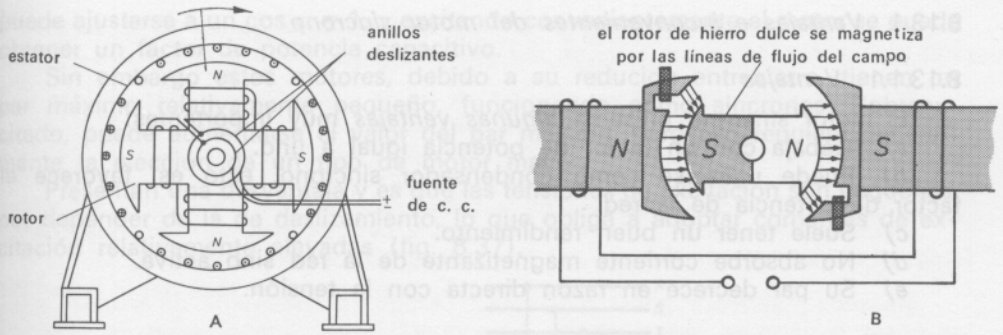


Fig. 8.30 A, *inductor polar alimentado por c. c.;* B, *inductor de imán permanente.*

Cuando los conductores del inducido sean recorridos por corriente y su sentido sea, por ejemplo, el que se indica en la figura 8.30, aplicando la regla de los tres dedos de la mano izquierda se llegará fácilmente a la conclusión de que el motor gira en el sentido indicado.

La característica del motor síncrono es que su velocidad no está sujeta al deslizamiento. Quiere esto decir, que gira sincrónicamente el rotor con el campo giratorio, en tanto la carga no sea excesiva y haga perder la velocidad de sincronismo.

La potencia necesaria para la excitación del bobinado del inducido puede ser tomada de un generador de corriente continua acoplado al propio motor, o de una red de análoga clase de corriente.

Por necesidades de servicio, por ejemplo riesgos de explosiones, zonas de peligros de gases, etc., puede muy bien realizarse el montaje del equipo de excitación fuera del conjunto de la máquina síncrona.

El arranque de los motores síncronos se realizan empleando un motor auxiliar que arrastra el eje de aquél hasta la proximidad de la velocidad de sincronismo en cuyo instante se conecta a la red; o bien, aplicando el mismo método que en los motores asíncronos con rotor de jaula, para lo cual se les equipan con un devanado amortiguador dispuesto en los polos laminados que se comporta como devanado de arranque en cortocircuito.

El motor síncrono es reversible con el alternador (fig. 8.31).

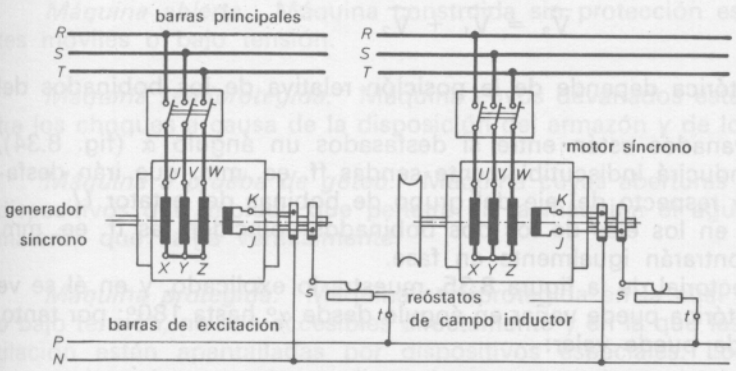


Fig. 8.31 Reversibilidad del motor síncrono.

A fin de limitar la corriente en el instante de conexión a valores normales de 1,8 a 2 veces la nominal, puede llevarse a cabo la puesta en marcha en estrella-triángulo supuesto el arranque en vacío, es decir, bajo un par antagónico pequeño. Es mejor, no obstante, utilizar un transformador de arranque que permite una adaptación más estrecha al par antagónico (fig. 8.32).

Para evitar falsas maniobras, la conexión se lleva a cabo normalmente de modo automático al accionar el interruptor principal. Es muy importante entonces que la magnitud de la carga no sea excesiva hasta alcanzar la velocidad de sincronismo. Al final del período de aceleración, se pasa al funcionamiento sincrónico excitando convenientemente el rotor del motor.

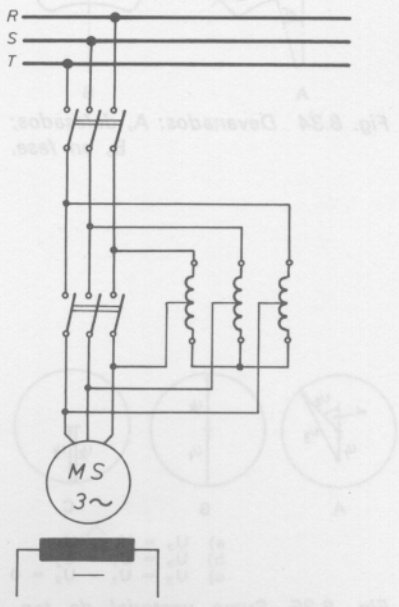


Fig. 8.32 Limitación de la corriente mediante autotransformador.

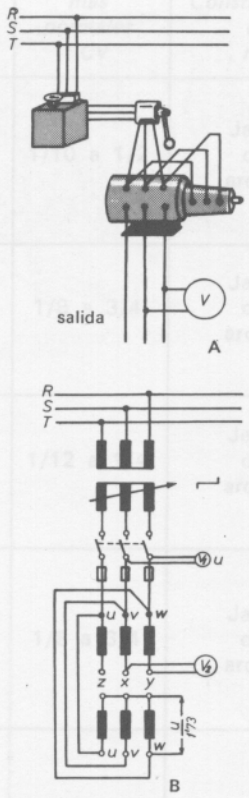


Fig. 8.33 Regulador de inducción: A, *esquema topográfico;* B, *esquema de circuitos.*

8.13.1 *Ventajas e inconvenientes del motor síncrono*

8.13.1.1 *Ventajas*

El motor síncrono presenta *algunas ventajas* muy importantes:

a) Trabaja con un factor de potencia igual a uno.

b) Puede utilizarse como condensador síncrono, esto es, favorece el factor de potencia de la red.

c) Suele tener un buen rendimiento.

d) No absorbe corriente magnetizante de la red sino activa.

e) Su par decrece en razón directa con la tensión.

8.13.1.2 *Inconvenientes*

a) No pueden arrancar en carga, ya que antes de ser conectados a la línea deben girar a la velocidad de sincronismo.

b) Exige una fuente de alimentación de corriente continua para excitar el bobinado inductor.

c) Sólo tienen una velocidad de giro.

d) No consiente que se varíe la carga ya que puede presentarse el peligro de perder la velocidad de sincronismo.

8.14 Aplicaciones especiales de la máquina asíncrona, como regulador de inducción, convertidor de frecuencia y motor asíncrono sincronizado

8.14.1 *Regulador de inducción*

La máquina asíncrona tiene el poder de regular la tensión de una red, constituyendo el llamado *regulador de inducción.*

El bobinado del estator del regulador es trifásico y conectado generalmente en estrella. El rotor está provisto de un devanado trifásico abierto y unido el principio del bobinado a los conductores de la red, mientras que el final se conecta a la salida de trabajo (fig. 8.33).

Si el rotor se bloquea el flujo creado en el estator corta a los conductores rotóricos a la velocidad síncrona y genera una f. e. m. de igual frecuencia que la de la red, y el valor de la tensión que se obtiene en la salida es suma vectorial de la tensión de alimentación y la propia generada en el rotor:

$$\vec{V}_3 = \vec{V}_1 + \vec{V}_2$$

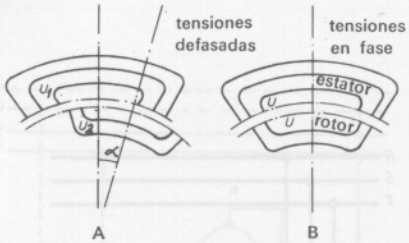


Fig. 8.34 Devanados: A, *defasados;* B, *en fase.*

La f. e. m. rotórica depende de la posición relativa de los bobinados del estator y rotor.

Si ambos devanados están entre sí desfasados un ángulo α (fig. 8.34), el flujo giratorio inducirá indiscutiblemente sendas ff. ee. mm. que irán desfasadas un ángulo α respecto del eje del grupo de bobinas del estator *U*.

En cambio, si en los ejes de los dos bobinados coinciden las ff. ee. mm. generadas se encontrarán igualmente en fase.

El esquema vectorial de la figura 8.35, muestra lo explicado, y en él se ve cómo la tensión rotórica puede variar en ángulo desde α^o hasta 180°; por tanto, la tensión de salida puede valer:

$$\boxed{V_3 = V_1 + V_2 \text{ si } \alpha = 0^o} \quad \text{y} \quad \boxed{V_3 = V_1 - V_2 \text{ si } \alpha = 180^o}$$

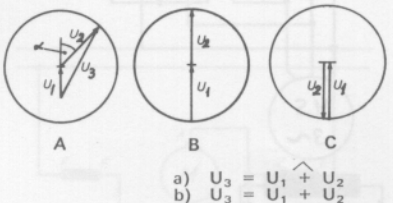


Fig. 8.35 Suma vectorial de tensiones.

8.14.2 *Convertidor de frecuencia*

Se explican los convertidores en el Tema 11; no obstante, puede decirse, como aplicación dentro de los motores asíncronos, que puede obtenerse de esta máquina una frecuencia de salida *f* y una fuerza electromotriz que depende de la velocidad del rotor de la máquina (fig. 8.36).

8.14.3 *Motores asíncronos sincronizados*

El motor asíncrono sincronizado con rotor de anillos rozantes, arranca como cualquier otro motor trifásico ordinario por medio de resistencias. Después de finalizado el período de aceleración se excita con corriente continua, funcionando entonces como motor sincrónico, con lo cual el factor de potencia

puede ajustarse a un cos $\varphi = 1$, y excitando convenientemente el motor se puede obtener un factor de potencia capacitivo.

Sin embargo estos motores, debido a su reducido entrehierro, tienen un par máximo relativamente pequeño, funcionando como síncronos. Sobreexcitado, puede aumentarse el valor del par máximo, pero ello requiere generalmente la elección de un tipo de motor mayor.

Presentan una desventaja y es que las tensiones de excitación son pequeñas, por depender de la de deslizamiento, lo que obliga a adoptar corrientes de excitación relativamente elevadas (fig. 8.37).

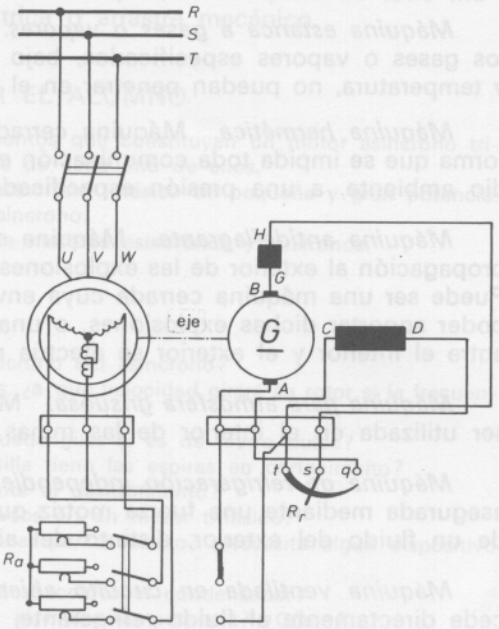


Fig. 8.37 Motor asíncrono sincronizado.

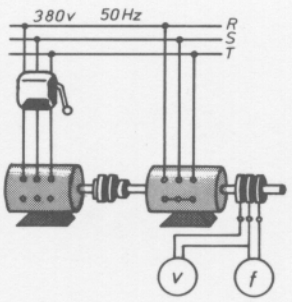


Fig. 8.36 Convertidor de frecuencia.

8.15 Protección de las máquinas y clases de servicios

La norma UNE 21 302 divide a las máquinas según el tipo de protección en:

Máquina abierta. Máquina construida sin protección especial de las partes móviles o bajo tensión.

Máquina semiprotegida. Máquina cuyos devanados están protegidos contra los choques a causa de la disposición del armazón y de los soportes axiales.

Máquina a prueba de goteo. Máquina cuyas aberturas están provistas de dispositivos que impiden que penetre en la máquina el agua o cualquier otro material que caiga verticalmente.

Máquina protegida. Máquina semiprotegida en la cual las partes móviles, o bajo tensión, no son accesibles directamente y en la que las aberturas de ventilación están apantalladas por dispositivos especiales. Los cuerpos sólidos por encima de unas ciertas dimensiones no pueden entrar, cualquiera que sea la dirección de llegada.

Máquina a prueba de goteo y protegida. Máquina protegida en la cual las aberturas están dispuestas de manera que se impida la entrada de agua o cualquier otro material que caiga verticalmente. Los cuerpos de unas ciertas dimensiones no pueden entrar, cualquiera que sea la dirección de llegada.

Máquina cerrada. Máquina protegida por una envolvente sin aberturas que necesariamente no tiene que ser estanca. La máquina está protegida contra contactos intencionados o accidentes y contra la penetración de cuerpos sólidos, polvo grueso y proyecciones de agua en cualquier dirección. Puede, sin embargo, tener tomas para entrada y salida del aire de refrigeración tomado de fuera del ambiente para el que se hace la protección. Una máquina de este tipo se suele llamar también máquina cerrada con canalización de aire.

Máquina a prueba de polvo. Máquina construida de tal forma que se impida la penetración, en el interior, del polvo de una finura y naturaleza dadas.

Máquina protegida contra chorros de agua. Máquina construida de tal forma que el agua proyectada en forma de chorro en condiciones especificadas no puede penetrar en cantidad suficiente para impedir o dificultar el funcionamiento.

Máquina sumergible. Máquina construida para poder funcionar permanentemente sumergida en el agua a una profundidad especificada.

Máquina estanca a gases o vapores. Máquina construida de manera que los gases o vapores especificados, bajo condiciones determinadas de presión y temperatura, no puedan penetrar en el interior de la envolvente de la misma.

Máquina hermética. Máquina cerrada, cuyas juntas están construidas de forma que se impida toda comunicación entre el interior de la máquina y el medio ambiente, a una presión especificada.

Máquina antideflagrante. Máquina construida de forma que se impida la propagación al exterior de las explosiones que puedan producirse en su interior. Puede ser una máquina cerrada cuya envolvente es lo bastante resistente para poder soportar dichas explosiones, o una máquina en la cual la comunicación entre el interior y el exterior se efectúa mediante un dispositivo de seguridad.

Máquina para atmósfera grisuosa. Máquina antideflagrante construida para ser utilizada en el interior de las minas con grisú.

Máquina de refrigeración independiente. Máquina cuya refrigeración está asegurada mediante una fuerza motriz que no se toma de su eje o por medio de un fluido del exterior, distinto del aire.

Máquina ventilada en circuito abierto. Máquina en la cual el calor se cede directamente al fluido refrigerante, que se renueva continuamente.

Máquina ventilada en circuito cerrado. Máquina en la cual el calor se cede al fluido refrigerante mediante un fluido intermediario de ventilación, que requiere un circuito cerrado entre el interior de la máquina y un órgano de refrigeración (radiador refrigerante).

Máquina de armazón liso. Máquina cerrada autorrefrigerada en la cual no se ha tomado ninguna disposición para aumentar la superficie de contacto con el aire exterior de refrigeración.

8.16 Servicio de los motores

Según el servicio puede dividirse en:

a) *Servicio continuo.* Servicio permanente con régimen constante.

b) *Servicio ininterrumpido.* Servicio permanente con regímenes variables.

c) *Servicio temporal.* Servicio con régimen constante durante un tiempo determinado, menor que el que se requiere para alcanzar el equilibrio térmico en servicio permanente con este régimen, seguido de reposo durante un tiempo suficiente para restablecer la igualdad de temperatura con la del medio refrigerante.

d) *Servicio unihorario.* Servicio temporal en el que la duración de funcionamiento con régimen constante es igual a 1 h.

e) *Servicio temporal variable.* Servicio con régimen variable durante un tiempo determinado, seguido de reposo durante un tiempo suficiente para restablecer la igualdad de temperatura con la del medio refrigerante.

f) *Servicio intermitente.* Sucesión de funcionamiento con régimen constante separados por intervalos de reposo, con tiempos de funcionamiento y de reposo insuficientes para alcanzar el equilibrio térmico, tanto en los períodos de calentamiento como en los de enfriamiento.

En reposo, en este servicio, significa la supresión completa de todo movimiento, y de toda alimentación eléctrica o arrastre mecánico.

g) *Servicio intermitente periódico.* Sucesión de ciclos idénticos que comprende cada uno un tiempo de funcionamiento con un régimen constante y un tiempo de reposo, siendo estos tiempos insuficientes para alcanzar el equilibrio térmico, tanto durante los períodos de calentamiento como durante los períodos de enfriamiento.

En reposo, en este servicio, significa la supresión completa de todo movimiento y de toda alimentación eléctrica o arrastre mecánico.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Confeccionar una lista con los elementos que constituyen un motor asíncrono trifásico, dividiendo el material y características de cada uno de ellos.
— Aplicaciones industriales del motor asíncrono trifásico de pequeña y gran potencia.
— Aplicaciones industriales del motor síncrono.
— Recopílense catálogos comerciales de motores asíncronos y síncronos.

CUESTIONARIO

8.1 ¿En qué se diferencia el motor síncrono del asíncrono?

8.2 Si un motor asíncrono tiene 6 polos, ¿a qué velocidad girará su rotor si la frecuencia es 50, 60 u 80 Hz?

8.3 El rotor de un motor síncrono, ¿puede girar si es de hierro dulce?

8.4 ¿Por qué un rotor de jaula de ardilla tiene las espiras en cortocircuito?

8.5 ¿Cuál es la ecuación correspondiente al deslizamiento?

8.6 ¿Cómo están colocados los devanados en un motor trifásico?

8.7 ¿Un motor monofásico puede arrancar por sí mismo? ¿Necesita algún dispositivo especial?

8.8 En el motor monofásico, ¿para qué se coloca el condensador?

8.9 ¿Puede un motor síncrono mejorar el factor de potencia? ¿Cómo?

8.10 Si el deslizamiento de un motor monofásico de inducción de cuatro polos es del 4 %, ¿a qué velocidad girará?

8.11 El motor síncrono, ¿puede utilizarse para máquinas herramientas? ¿Por qué?

8.12 Si en un motor asíncrono la velocidad del rotor fuera igual a la de sincronismo, ¿qué pasaría?

8.13 ¿Influye en el par de arranque la frecuencia?

8.14 En el par en un motor asíncrono, ¿cuántos parámetros intervienen?

8.15 El rotor de un motor asíncrono tetrapolar está provisto de un bobinado trifásico que dispone de 56 espiras en serie por fase. Sabiendo que el flujo giratorio vale 1,90 megamaxvelios, se desea calcular la f. e. m. generada a rotor parado y a la velocidad de 1 400 r. p. m.

8.16 Si el rotor de un motor trifásico hexapolar gira a la velocidad de 940 r. p. m. y la frecuencia es de 50 Hz, ¿cuánto vale el deslizamiento?

8.17 Un motor asíncrono de 6 CV y 1 500 r. p. m. de 220/380 V, está conectado a una red de 200 V. ¿Cuánto vale el momento de rotación a la tensión nominal, así como la potencia útil a las dos tensiones?

8.18 Si un motor asíncrono es alimentado a una frecuencia de 50 Hz y se eleva a 65 Hz, ¿qué valores toman el momento de rotación y la potencia útil, si la tensión se mantiene constante?

8.19 Un motor trifásico de 3 CV gira a 1 500 r. p. m; hállese el par y el número de polos que tiene el motor.

8.20 Dos motores trifásicos tienen respectivamente 3 y 5 CV y un par de 1,49 mkg y 3,3 mkg. ¿Cuál sería la relación de velocidades de ambos motores?

8.21 Si un motor de 3 CV gira a 1 440 r. p. m., con una tensión de 260 V, compárense los valores de los pares nominales y de arranque, así como la potencia útil a dicha tensión y a 220 V.

8.22 Si el rotor de un motor está bloqueado y la f. e. m. primaria es de 325 V y la relación del número de espiras del estator y rotor es 6, ¿cuál es la f. e. m. del rotor? Y si el rotor gira a 1 480 r. p. m. y la velocidad de sincronismo es de 1 480 r. p. m., ¿cuál es la tensión rotórica?

BIBLIOGRAFIA

Manuales Técnicos de General Eléctrica Española.

HARRY MILEAF, *Serie uno al siete,* Editorial Simusa, México 1975.

Máquinas de corriente alterna, Enciclopedia de Electricidad, Editorial CEAC, S. A., Barcelona 1973.

CORTES M., *Curso Moderno de máquinas eléctricas rotativas,* Editores Técnicos Asociados, S. A., Barcelona 1974.

Tema 9. Procedimientos de arranque e inversión de giro de los motores

OBJETIVOS

— *Comprobar la necesidad de los arrancadores.*
— *Saber elegir el procedimiento de arranque adecuado para cada ocasión.*
— *Obtención de la inversión de giro.*

GUION

— Corriente de arranque.
— Procedimientos de arranque.
— Conexión estrella-triángulo.
— Arranque mediante autotransformador.
— Arranque mediante resistencias estatóricas.
— Arranque mediante resistencias rotóricas.
— Puesta en marcha de los motores síncronos.
— Inversión del sentido de giro.

PUNTOS CLAVE

— Sistemas de arranque estatóricos y rotóricos.
— Propiedades de las diversas jaulas de ardilla.
— Inversión del sentido de giro.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Repaso del Tema 8, motores de corriente alterna.

EXPOSICION DEL TEMA

9.1 Introducción

Las diversas necesidades de la industria obligan a la fabricación de las más variadas clases de motores; y aunque las más utilizadas en corriente alterna son los asíncronos, síncronos y monofásicos, dentro de cada clase existen gamas de tensión, potencia y variedades de construcción que se adaptan a todos los casos.

La puesta en servicio y la utilización de estos motores, por tener características propias, variará según los casos, precisando en cada ocasión un método distinto.

9.1.1 *Arranque de un motor*

La puesta en servicio de un motor lleva consigo los problemas debidos a sus características: mientras el rotor asíncrono puede arrancar sin más, conectándolo directamente a la red, el síncrono precisa de un embalamiento; y el monofásico, de un bobinado o espira de arranque.

Ya se vio, en el Tema 8, el modo de poner en marcha el motor monofásico; por ello, en este tema, sólo se hará referencia a los motores asíncronos y síncronos.

9.2 Corriente de arranque

La energía que absorbe un motor en el período de arranque comprende lo que precisa (por sí mismo) para mantener la velocidad adquirida en cada instante más la necesaria para acelerar las masas.

El motor en el arranque debe producir un par de valor suficiente como para vencer la resistencia que ofrecen los mecanismos propios y las cargas que vayan aplicadas al eje del motor.

Además, este par debe ser mayor en cada instante al par resistente para obtener un par acelerador.

El hecho de que el par esté en razón del cuadrado de la corriente absorbida trae malas consecuencias para el arranque. Generalmente, se precisan fuertes pares de arranque y, en consecuencia, la corriente absorbida supera los valores límite de las compañías suministradoras de energía y del Reglamento Eléctrico para Baja Tensión, el cual fija los valores de la relación entre la corriente máxima y la nominal del motor (tabla 9.1).

Tabla 9.1 Límites de la relación corriente máxima/corriente nominal

Motores de 0,75 a 1,5 kW	$\frac{I_{máx.}}{I_{nom.}} < 4{,}5$
Motores de 1,5 a 5 kW	$\frac{I_{máx.}}{I_{nom.}} < 3$
Motores de 5 a 15 kW	$\frac{I_{máx.}}{I_{nom.}} < 2$
Motores de potencia superior a 15 kW	$\frac{I_{máx.}}{I_{nom.}} < 1{,}5$

Disminuir los valores de la intensidad equivale a un descenso muy acusado en el par.

Para evitar este problema se recurre a diversos procedimientos que tienen por objeto arrancar el motor con un par máximo sin superar una corriente determinada.

El aspecto de las curvas de corriente, en el intervalo de arranque, es muy distinto según la potencia. En los motores de poca potencia disminuye rápidamente la corriente al aumentar la velocidad. En cambio, en motores de gran potencia, disminuye lentamente al principio cayendo bruscamente al final del proceso de arranque. En la figura 9.2 se representan las curvas de corriente de dos motores trifásicos de 4 y 200 kW respectivamente.

9.3 Procedimientos de arranque para motores asíncronos trifásicos

El procedimiento más sencillo para el arranque de estos motores es la conexión directa a la red. Este sistema, en cambio, no es siempre el más adecuado, por las limitaciones ya señaladas y, por ello, deberán estudiarse las características de cada motor.

9.3.1 *Acción sobre el circuito del estator*

Se actúa sobre el estator cuando el rotor es de jaula de ardilla y, por tanto, no puede actuarse sobre él.

Consiste generalmente en reducir el valor de la tensión aplicada al estator, con lo cual queda reducida la corriente absorbida y, desde luego, el par también sufre la reducción y baja de valor.

9.3.1.1 *Conexión estrella-triángulo*

Es éste uno de los métodos más sencillos.

Consiste en arrancar el motor, que en servicio normal está conectado en triángulo, conectándolo en estrella y, transcurrido el período de aceleración, conmutarlo a triángulo (fig. 9.3).

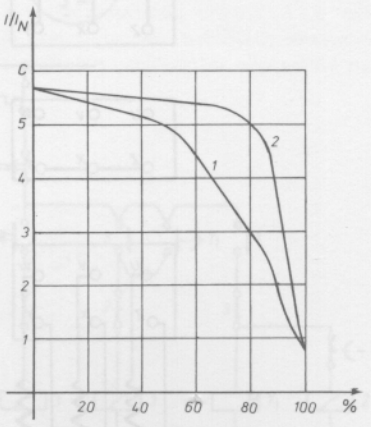


Fig. 9.2 Decrecimiento de la corriente en el arranque para motores de pequeña potencia (curva 1) y de gran potencia (curva 2).

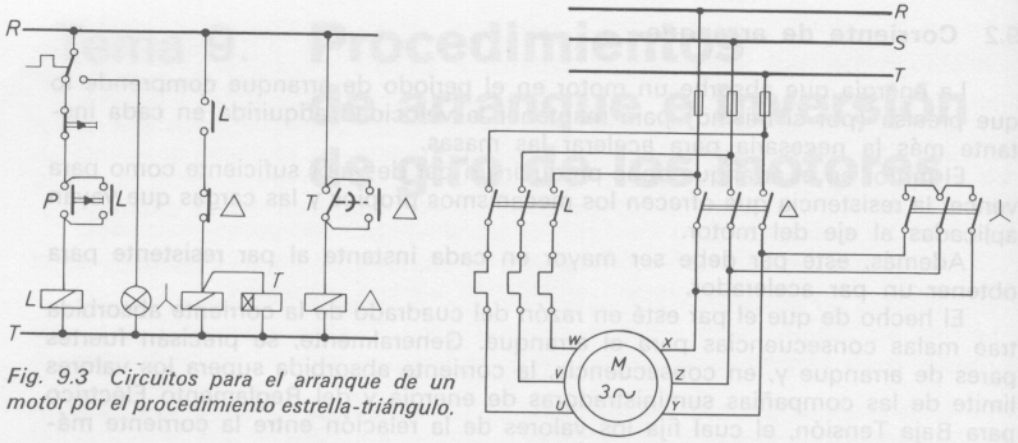


Fig. 9.3 Circuitos para el arranque de un motor por el procedimiento estrella-triángulo.

De esta forma el bobinado recibe en el arranque una tensión $\sqrt{3}$ veces menor y, consecuentemente, la intensidad que absorberá el motor también será $\sqrt{3}$ menor.

Si se tiene en cuenta que en un sistema trifásico conectado en triángulo la corriente de línea es $\sqrt{3}$ veces mayor que la de fase y en el sistema en estrella las intensidades de línea y fase son iguales, se llegará a la conclusión de que la corriente absorbida es también $\sqrt{3}$ veces menor arrancando en estrella.

Se comprueba que la reducción de $\sqrt{3}$ por la tensión y de $\sqrt{3}$ por la corriente, da como resultado una reducción de $\sqrt{3} \cdot \sqrt{3} = 3$ veces el valor de la corriente absorbida.

La corriente de arranque se reduce de esta forma a un 30% del valor que tendrá en conexión directa, si bien, al mismo tiempo, el par de arranque referido a la conexión directa disminuye en la misma proporción, es decir, será de 0,6 a 0,7 veces el par de rotación nominal.

Para que el arranque estrella-triángulo cumpla su cometido, es necesario que el motor conectado en estrella se acelere hasta su velocidad nominal. En caso contrario, si se queda el motor *atrancado* a una velocidad baja, puede presentarse, al conmutar, un golpe de corriente que no será sensiblemente inferior al causado por conexión directa; es decir, el efecto de la conexión estrella-triángulo habrá sido nulo.

Prácticamente la conmutación se debería producir cuando el par antagónico es igual al par motor. En estas condiciones se produce en este instante una punta de corriente de valor reducido (fig. 9.4).

De no producirse en este instante, la punta de corriente es elevadísima. Y no se ha conseguido la reducción que se pretendía (fig. 9.5).

En las figuras 9.4 y 9.5 se ven dos casos de arranque para dos motores, cuyas aplicaciones prácticas son distintas como se observará en sus pares antagónicos (M_g).

En el arranque estrella-triángulo bajo carga, hay que contar con un calentamiento mayor que por conexión directa. La conexión estrella-triángulo ofrece la posibilidad de mejorar el rendimiento y factor de potencia de motores que trabajen a cargas reducidas. La figura 9.6 muestra las curvas características de rendimiento y factor de potencia para un motor trifásico de 7,5 kW en conexión estrella-triángulo en función de la carga.

Adoptando estas medidas puede aumentarse la rentabilidad, en muchos casos, de servicios con cargas muy reducidas.

La caja de bornes de estos motores debe ser accesible para poder conectar en los principios y finales de las fases del estator (fig. 9.7).

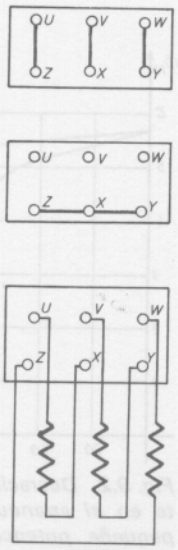


Fig. 9.7 Caja de bornas.

9.3.1.2 *Arranque mediante autotransformador*

Rebajando la tensión aplicada al motor, por medio de un autotransformador, se reduce la intensidad de arranque de aquél proporcionalmente a la tensión en sus bornes. Referida al lado primario del transformador, disminuye la intensidad en la línea, durante la puesta en marcha, cuadráticamente con la relación de transformación. Con una tensión de arranque del 50 % de la red, se reduce la intensidad en la línea al 25 % de la necesaria para conexión directa. El par de arranque disminuye igualmente con el cuadrado de la tensión en el motor.

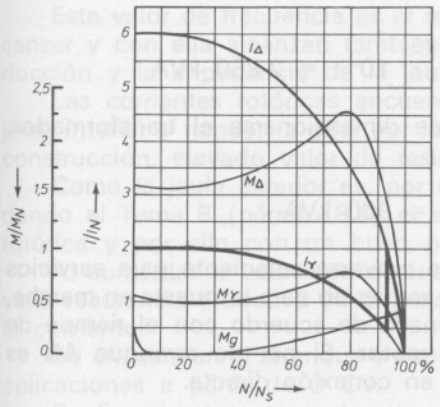


Fig. 9.4 Conmutación en las proximidades de la velocidad nominal, después del período de aceleración, corriente de conmutación, 1,6 veces; arranque con compresor centrífugo descargado.

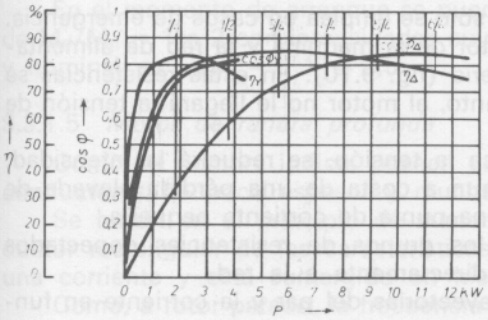


Fig. 9.6 Curso de rendimiento y factor de potencia de un motor trifásico de 7,5 kW, 490 r. p. m. en conexión estrella-triángulo.

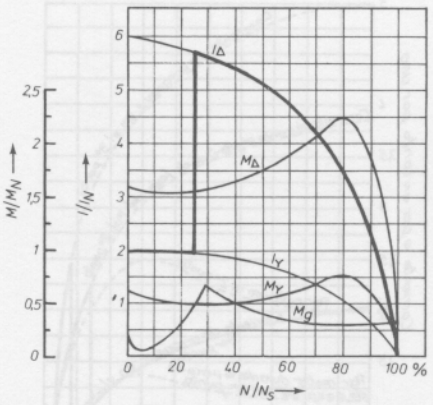


Fig. 9.5 Conmutación prematura, pues el motor en conexión estrella se ha acelerado solamente hasta el 25 % de la velocidad nominal. Corriente de conmutación igual a 5,7 veces la nominal; arranque de un molino de bolas especiales.

La potencia necesaria del autotransformador es igual a la potencia aparente absorbida por el motor durante el arranque, multiplicada por el cuadrado de la relación de transformación (fig. 9.8).

Este procedimiento se usa para motores de potencias superiores a 50 kW. En la figura 9.9 se ven las curvas par-corriente de este arranque.

Ejemplo de aplicación

¿Qué potencia debe tener un autotransformador de arranque y qué tensión debe elegirse para la puesta en marcha de un motor trifásico de 400 kW, 6 000 V, cuya intensidad y par de arranque son, respectivamente, de 6 y 1,5 veces los valores nominales correspondientes, si la intensidad en el instante de conexión debe reducirse a unas 2 veces el valor nominal? ¿Cuánto valdrá el par de arranque?

La intensidad nominal del motor es de 46 A.

Siendo la intensidad de arranque del motor a plena tensión I_a, la intensidad de arranque en el lado primario del autotransformador I_a y a la relación de transformación m, se verifica:

$$m = \sqrt{\frac{I'_a}{I_a}}$$

En el caso presente es

$$m = \sqrt{\frac{2}{6}} = 0{,}58$$

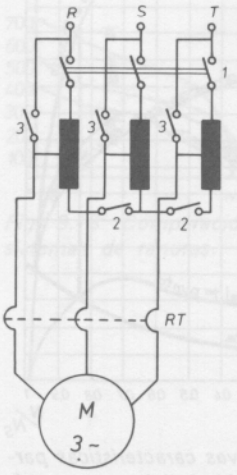
La tensión de arranque es, por tanto, de 3 500 V aproximadamente.

La potencia del autotransformador de arranque P_t resulta según lo expuesto anteriormente,

$$P_t = m^2 \cdot P_1$$

siendo:

P_t = potencia del autotransformador de arranque, en kVA;
P_1 = potencia aparente absorbida por el motor durante el arranque, en kVA.



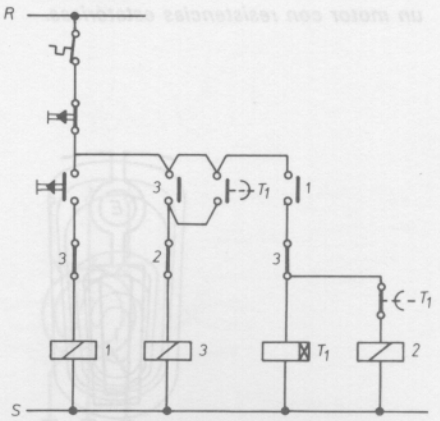


Fig. 9.8 Arranque mediante autotransformador.

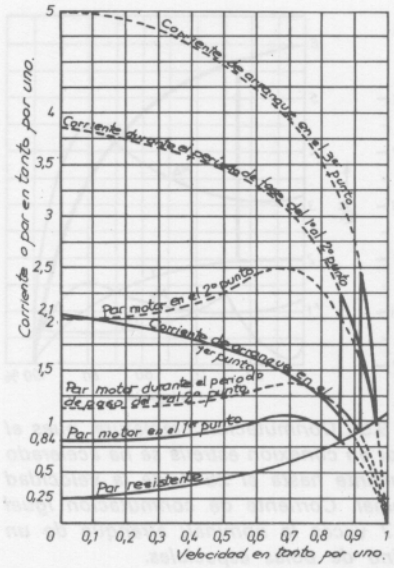


Fig. 9.9 Curvas características del arranque de un motor mediante autotransformador.

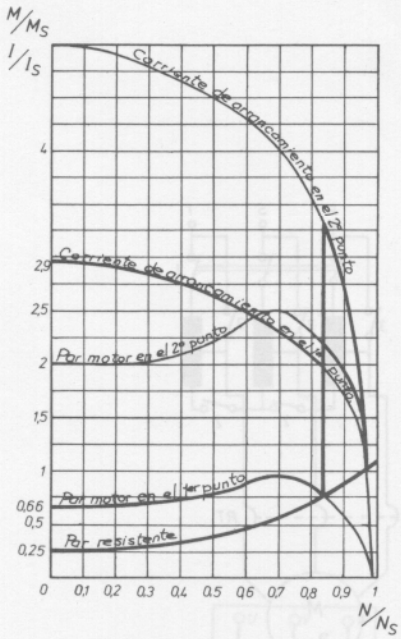


Fig. 9.11 Curvas características par-corriente-velocidad del arranque de un motor con resistencias estatóricas.

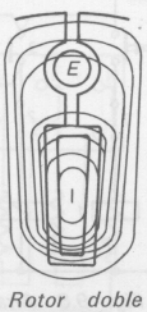


Fig. 9.12 Rotor doble jaula de ardilla.

En el ejemplo considerado, es

$$P_1 = \sqrt{3} \times 6\,000 \times 46 \times 6 \times 10^{-3} = 2\,860 \text{ kVA}$$

la potencia de arranque para la cual ha de dimensionarse el transformador; resulta ser:

$$P_t = 0{,}58^2 \times 2\,860 = 960 \text{ kVA}$$

El autotransformador de arranque ha de preverse solamente para servicios de corta duración de acuerdo con el tiempo requerido para la puesta en marcha.

La duración de la carga queda determinada de acuerdo con el tiempo de arranque y la frecuencia de conexión del motor. El par de arranque M_a es $1{,}5 \cdot M_n \cdot 0{,}58^2 \approx 50$ % del par nominal en conexión directa.

9.3.1.3 *Arranque mediante resistencias estatóricas*

Es un sistema muy poco utilizado y sólo se emplea en casos de emergencia.

Consiste en intercalar, entre el estator de la máquina y la red de alimentación, unos grupos de resistencias en serie (fig. 9.10). En estas resistencias se producirá una caída de tensión y, por tanto, al motor no le llegará la tensión de línea.

En la proporción en que se reduzca la tensión, se reducirá la intensidad; de esta manera se habrá conseguido, aun a costa de una pérdida elevada de potencia y par, arrancar el motor con una punta de corriente pequeña.

Progresivamente se van quitando los grupos de resistencias conectados hasta que el motor queda conectado directamente a la red.

En la figura 9.11 se aprecian las trayectorias del par y la corriente en función de la velocidad, para este tipo de arranques.

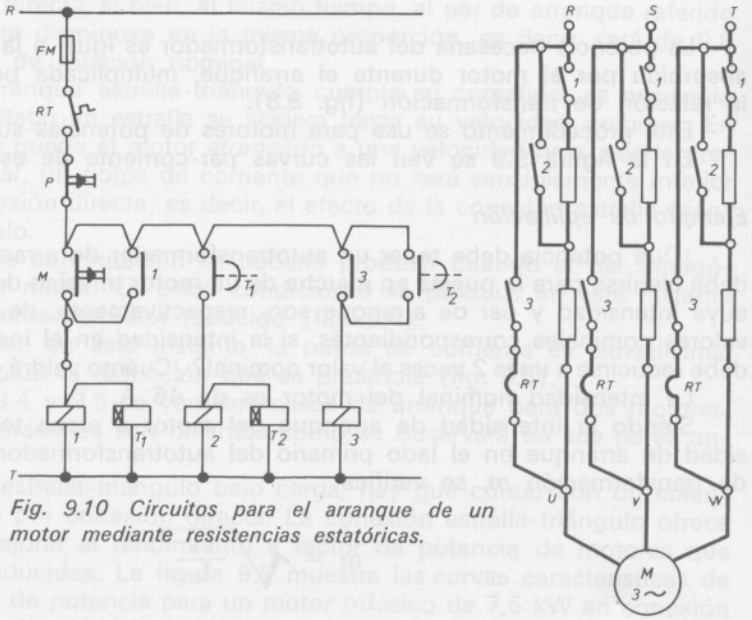


Fig. 9.10 Circuitos para el arranque de un motor mediante resistencias estatóricas.

9.3.1.4 *Motor de doble jaula de ardilla*

Este motor consiste en un estator normal y un rotor con dos jaulas de ardilla concéntricas (fig. 9.12). La jaula exterior, por construcción, tiene mayor valor de resistencia óhmica que la interior.

La hendidura que une las dos jaulas se calcula pensando en que limite la reactancia debida a las fugas de la jaula interior, y obliga a que la mayor parte del flujo principal pase por dentro de la jaula interior y no entre las dos jaulas.

De este modo, mientras que la jaula exterior se ve rodeada por el flujo de autoinducción creado por ella, la interior se ve rodeada del suyo propio y del de la exterior. Esto hace que su inductancia sea mucho mayor.

En la puesta en marcha la frecuencia del rotor es la de la red, ya que el deslizamiento en este momento es 1 y, recordando el tema 8 (párrafo 8.4) en el que se dedujo que $f_2 = s \cdot f_1$, fácilmente se llega a esta conclusión.

Este valor de frecuencia es el máximo que la frecuencia rotórica puede alcanzar y con ella alcanzan también su valor máximo la reactancia de autoinducción y la impedancia de la jaula interior.

Las corrientes rotóricas encuentran muchas dificultades al circular por la jaula interior y tienden a girar por la exterior que, como se recordará, tenía, por construcción, elevado valor de resistencia.

Como la jaula exterior es, por construcción, de elevada resistencia, recordando el Tema 8 (párrafo 8.6), el arranque se produce con elevada resistencia rotórica y por ello con un buen par.

Al aumentar la velocidad decrece la frecuencia del rotor y, con ella, la elevada reactancia inductiva de la jaula interior por la cual tiende a circular ahora la corriente.

Su eficacia en el arranque y marcha nominal hacen que se utilice en muchas aplicaciones a partir de 3 CV.

Realizando el arranque de este motor con el procedimiento estrella-triángulo, se hace extensible su utilidad a motores de elevada potencia.

En el momento de arranque se puede conseguir una relación de momentos de M_d/M_n = 1 a 2 con intensidades cuya relación entre la de puesta en marcha y nominal es I_d/I_n = 1,1 a 2,5.

9.3.1.5 *Motor de ranura profunda*

Como su nombre indica, poseen una ranura profunda en la que se alojan conductores de poco espesor y mucha anchura.

Se basan en el principio de aumento de resistencia aparente de un conductor rectangular de las características mencionadas cuando es recorrido por una corriente y está sumergido en hierro.

Como, a rotor parado, la frecuencia de éste es la misma que la red, la reactancia aumenta desde la parte próxima al entrehierro hacia el fondo de la ranura, efecto similar al del rotor de doble jaula, circulando la corriente por la parte más exterior de la ranura.

Conforme adquiere velocidad, la frecuencia disminuye, la reactancia va desapareciendo y la corriente circula por toda la ranura.

En la figura 9.13 se aprecia el proceso de arranque con los tres tipos de ranuras estudiados.

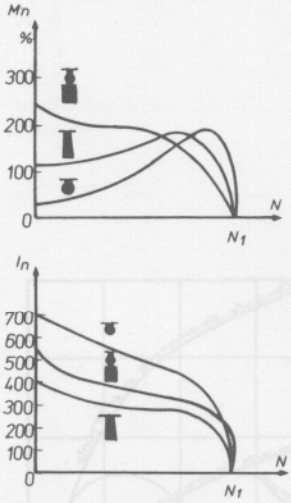


Fig. 9.13 Comparación de los tres sistemas de ranuras.

9.3.2 *Acción sobre el circuito del rotor*

Para actuar sobre el rotor se precisa que éste no sea de jaula, sino bobinado, y pueda accederse a él por algún procedimiento.

Este procedimiento suele ser el de unos anillos rozantes (uno por fase) al que se conectan unas escobillas cuyas conexiones se recogen en la caja de bornes (fig. 9.14).

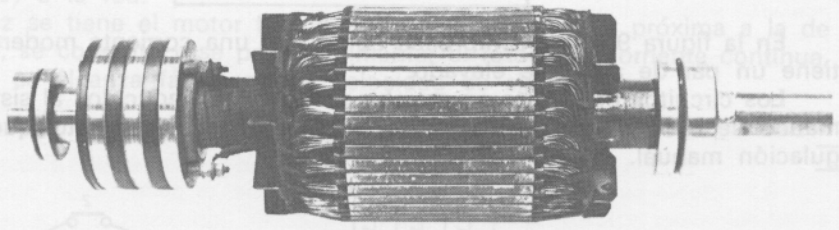


Fig. 9.14 Rotor con anillos rozantes.

9.3.2.1 *Arranque mediante resistencias rotóricas*

Colocando en serie con el bobinado rotórico una resistencia por fase (figura 9.15), se podrá reducir la corriente y obtener un buen par.

Recordando el apartado 8.8.4 del Tema 8, es fácil llegar a la conclusión ya expuesta.

Piénsese que, intercalando una elevada resistencia, el valor de la I_2 disminuirá proporcionalmente, obligando a la f. e. m. rotórica a aumentar; y ésta no puede hacerlo sino es a través del deslizamiento.

Se recordará que $E_{2s} = s \cdot E_2$. Valor que es aproximadamente igual a $R_2 \cdot I_2$, cuando el motor está en marcha.



Fig. 9.15 Conexión de resistencias al rotor.

Teniendo esto en cuenta, se podrán hallar los valores de las resistencias a conectar con el rotor y las curvas características del par y corriente durante el proceso de arranque.

El par en vatios síncronos es:

$$P_t = \frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2}{s}$$

y la potencia media interna

$$P_{med.i} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \cdot \frac{1 - s}{s}$$

siendo:

P_t = potencia total;
m_2 = número de fases;
I_2 = intensidad que circula por el rotor;
R_2 = resistencia rotórica;
s = deslizamiento;
$P_{med.i}$ = potencia media interna.

Intercalando R_R, la resistencia total interna será:

$$R_t = R_R + R_2 \quad y \quad s \cdot E_2 = I_2 \, (R_2 + R_R)$$

de donde:

$$s = \frac{I_2}{E_2} \cdot (R_2 + R_R) = \frac{I_2}{E_2} \cdot R_t$$

lo que expresa que el deslizamiento que corresponde a cada momento de giro es proporcional a la suma de resistencias del rotor y la que se va a conectar.

Observando las curvas de la figura 8.18, y establecido el valor del par necesario, se sabrá el valor de la resistencia total necesaria para el arranque.

El valor máximo del par se obtiene para una resistencia rotórica reducida al estator de valor

$$R_t' = \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}$$

De manera que la resistencia a conectar con el arranque, en serie con la red del rotor, valdrá

$$R_r' = \sqrt{R_1^2 + X_{cc}} - R_2'$$

En la figura 9.16 se comprueba cómo con una corriente moderada se obtiene un par de arranque elevado.

Los circuitos de puesta en marcha se han visto reducidos al sistema automático de relés y temporizadores (fig. 9.17) mucho más exactos que el de regulación manual.

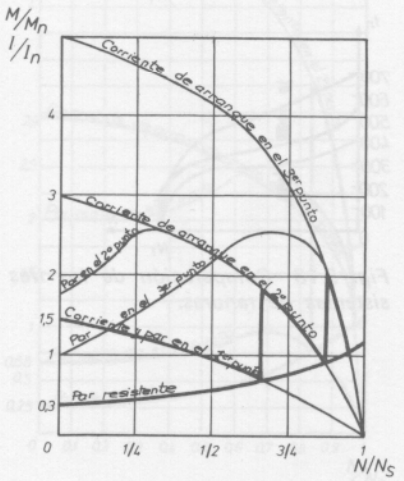


Fig. 9.16 Curvas características del arranque de un motor de resistencias rotóricas.

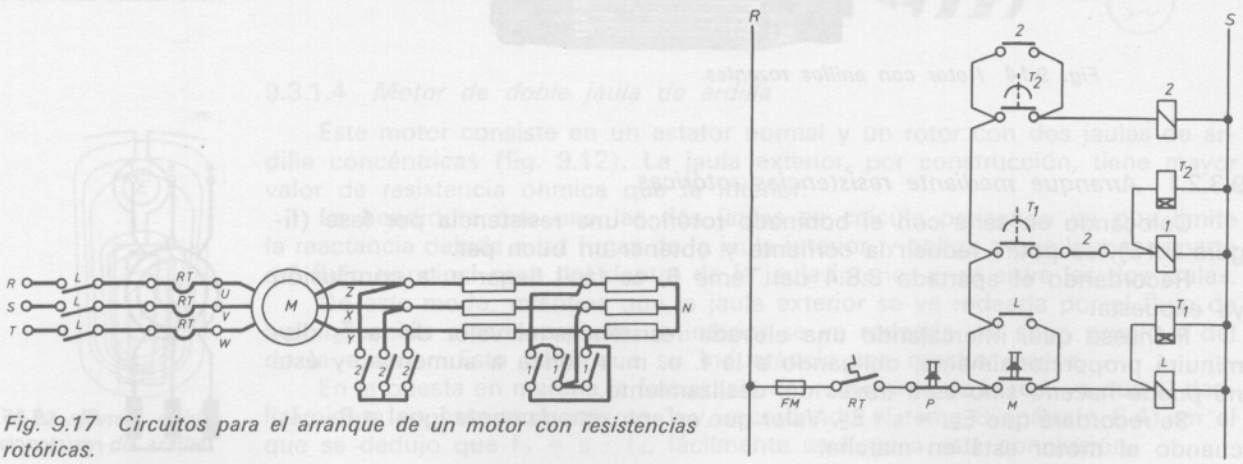


Fig. 9.17 Circuitos para el arranque de un motor con resistencias rotóricas.

9.4 Puesta en marcha de los motores síncronos

El motor síncrono, por su característica de construcción, no puede arrancar por sí mismo, ya que sólo puede girar cuando lleva la velocidad de sincronismo.

De esto se desprende que el par de arranque es nulo.

Este inconveniente obliga a recurrir a los procedimientos para el arranque.

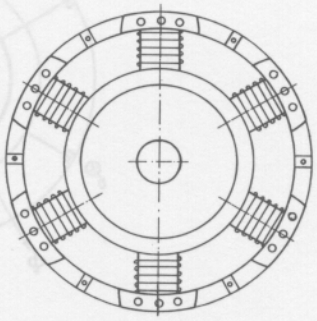


Fig. 9.18 Bobinado amortiguador.

9.4.1 *Arranque como motor asíncrono*

Cuando el par de arranque que se precisa es pequeño o con carga limitada, se recurre al motor síncrono de rotor polar y que dispone, además, de un bobinado amortiguador en cortocircuito que une las cabezas polares (fig. 9.18).

En estas condiciones se conecta a la red el bobinado inducido que, al ser recorrido por la corriente alterna, creará un campo magnético giratorio con velocidad igual a la de sincronismo.

El campo magnético cortará los conductores de la jaula amortiguadora induciendo en ellos una fuerza electromotriz que la pondrá en movimiento.

La velocidad que lleve será muy próxima a la de sincronismo. Conectando el bobinado de la rueda polar a la excitación de corriente continua, tras unas oscilaciones de velocidad, el órgano móvil alcanzará la velocidad síncrona.

Este procedimiento de arranque admite también todos los métodos de arranque expuestos anteriormente para los motores asíncronos, a fin de bajar el valor de la intensidad absorbida en el momento de la conexión a la red.

En serie con el bobinado inductor, suele conectarse una resistencia que, al tiempo que limita la corriente absorbida en el momento de la conexión a la red, ayuda al arranque, puesto que, al ser un arranque como motor asíncrono, el aumento de resistencias en el rotor favorece la puesta en marcha, como ya se explica en el apartado 8.7.2.

En la figura 9.19 se ve el circuito necesario para la puesta en servicio del motor por este procedimiento.

9.4.2 *Motor asíncrono sincronizado*

Si se desea arrancar con fuertes cargas, se recurrirá al empleo del motor denominado asíncrono sincronizado. El rotor de este motor es del tipo cilíndrico y en él se dispone un devanado trifásico de tres anillos colectores, como si fuera un motor de inducción de rotor bobinado (fig. 9.20).

Como se recordará, el campo creado por un devanado trifásico alimentado con corriente continua, en la forma indicada en la figura 9.21, tiene una dirección fija que, al girar a la velocidad de sincronismo, produce un campo giratorio.

Por ello, con el motor asíncrono sincronizado se puede arrancar en carga como con motor asíncrono, teniendo conectados los bobinados del rotor al reóstato de carga, a través de los anillos colectores y conectado el estator (no representado) a la red.

Una vez se tiene el motor funcionando a una velocidad próxima a la de sincronismo, se conmuta y se pasa a alimentar el rotor con corriente continua, con lo que se alcanza fácilmente la velocidad de sincronismo.

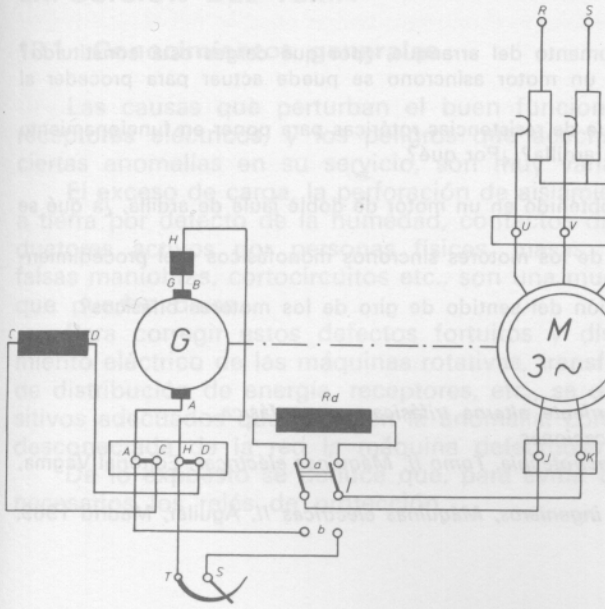


Fig. 9.19 Circuito para la puesta en marcha de un motor síncrono, arrancando como asíncrono.

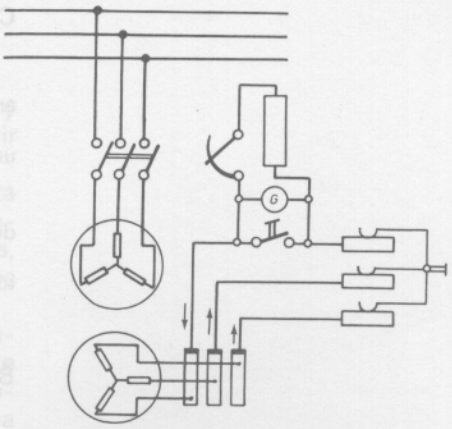


Fig. 9.20 Circuito para la puesta en marcha de un motor asíncrono sincronizado.

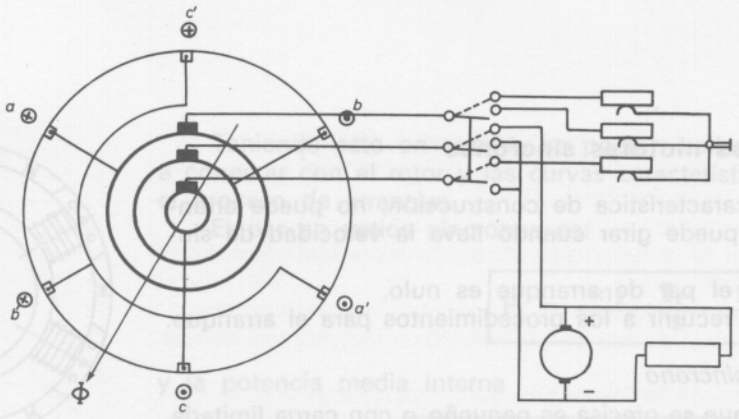


Fig. 9.21 Posición del flujo creado por el bobinado trifásico del rotor.

9.4.3 *Arranque mediante motor de arrastre*

Consiste en acoplar, al eje del motor síncrono, el eje de otro motor cuya velocidad de funcionamiento sea superior a la del motor síncrono que se quiere arrancar.

Regulando el motor de arrastre de forma que su velocidad coincida con la de sincronismo del motor que deseamos arrastrar, sólo restará que, una vez alcanzada ésta, se suprima el motor de arrastre dejando al síncrono funcionando normalmente.

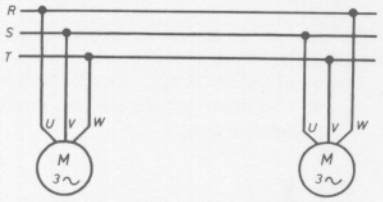


Fig. 9.22 Cambio de fases de alimentación.

9.5 Inversión del sentido de giro de los motores asíncronos

El sentido de giro del rotor de un motor es el mismo que el del flujo principal creado por el inductor, como se expuso en el Tema 8.

Cuando se precisa que el rotor gire en sentido contrario, bastará hacer que el flujo principal lo haga.

Para conseguirlo, teniendo en cuenta que este flujo es el resultante de tres campos magnéticos creados por cada una de las fases del inductor (como se justificó en el Tema 7), se permuta la conexión de dos fases cualesquiera y se obtendrá el cambio de sentido (fig. 9.22).

Para los motores asíncronos bifásicos, basta con cambiar las dos salidas de una misma fase del estator.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Realícese una tabla con los procedimientos de arranque de los motores asíncronos trifásicos y cuatro aplicaciones prácticas de cada uno de ellos.

— Dibújense los esquemas de potencia y mando para la puesta en marcha y correcto funcionamiento de un motor asíncrono trifásico arrancado por el procedimiento estrella-triángulo y resistencias estatóricas, así como los diagramas de tiempos de los dispositivos del automatismo utilizado.

— Utilizando el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión o el reglamento de alguna compañía suministradora de energía, recopílense por escrito en una memoria aquellos artículos que limitan los valores de la corriente absorbida en el arranque de los motores y las prescripciones referentes a los procedimientos de arranque en general.

CUESTIONARIO

9.1 El par resistente en el momento del arranque, ¿por qué cargas está constituido?

9.2 ¿Sobre cuántas partes de un motor asíncrono se puede actuar para proceder al arranque?

9.3 ¿Puede utilizarse el arranque de resistencias rotóricas para poner en funcionamiento un motor de rotor de doble jaula de ardilla? ¿Por qué?

9.4 Problema.

9.5 El fuerte par de arranque obtenido en un motor de doble jaula de ardilla, ¿a qué se debe?

9.6 Enumera tres aplicaciones de los motores síncronos monofásicos y el procedimiento de arranque de los tres.

9.7 ¿En qué se basa la inversión del sentido de giro de los motores bifásicos?

BIBLIOGRAFIA

AEG, *Motores eléctricos de corriente alterna trifásica y monofásica.*

AGUT, *El contactor y sus aplicaciones.*

RAPP J., *Tratado práctico de Electrotecnia, Tomo II, Máquinas eléctricas,* Editorial Vagma, Bilbao 1968.

FOUILLE A., *Electrotecnia para ingenieros, Máquinas eléctricas II,* Aguilar, Madrid 1969.

Tema 10. **Relés de protección**

OBJETIVOS

— *Analizar los diferentes tipos de relés de protección.*
— *Diferenciar entre los relés de intensidad y tensión.*
— *Conocer las características constructivas y el funcionamiento de los relés.*
— *Exponer las normas de protección que al respecto determina el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión.*

GUION

— Diagrama de bloques de los relés de protección.
— Enumerar los criterios que se deben seguir para detectar una anomalía en una instalación.
— Características eléctricas de construcción de los relés de protección.
— Relés de protección según la magnitud eléctrica que vigilan.
— Relé diferencial.
— Puestas a tierra de las máquinas.
— Normas del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión para la puesta a tierra.
— Protección de las instalaciones.

PUNTOS CLAVE

— Conocimientos del relé e interruptor diferencial
— Normas del Reglamento sobre la puesta a tierra.
— Localización de averías.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— No se precisa de conocimientos previos.

EXPOSICION DEL TEMA

10.1 Conocimientos generales

Las causas que perturban el buen funcionamiento de los generadores y receptores eléctricos, y los peligros que acechan a estas máquinas de sufrir ciertas anomalías en su servicio, son muy variados.

El exceso de carga, la perforación de aislamiento de los conductores, puesta a tierra por defecto de la humedad, contactos directos e indirectos de los conductores activos por personas físicas, masas, sobretensiones, hipotensiones, falsas maniobras, cortocircuitos etc., son una muestra de los muchos accidentes que pueden darse.

Para corregir estos defectos fortuitos y disponer de un buen funcionamiento eléctrico de las máquinas rotativas, transformadores, líneas de transporte de distribución de energía, receptores, etc., se deben proteger mediante dispositivos adecuados que detecten la anomalía, corrijan ésta y, en su defecto, sea desconectada de la red la máquina defectuosa.

De lo expuesto se deduce que, para evitar estos accidentes eléctricos, son necesarios los relés de protección.

10.1.1 *Diagrama bloque de los relés de protección*

Estos aparatos pueden representarse en forma de esquema de bloques (fig. 10.1).

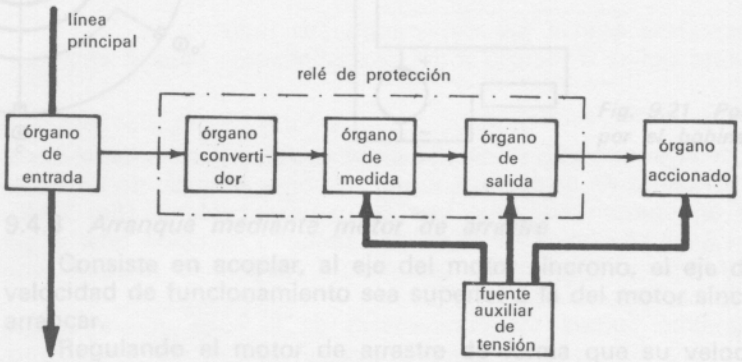


Fig. 10.1 Diagrama de bloques de los relés de protección.

En ellos, de una manera intuitiva, se estudian los diferentes circuitos de que consta un relé de protección; éstos pueden ser:

1.º *Bloque de entrada.* Dispositivo por el cual se detectan las señales perturbadoras.

2.º *Bloque de transformación,* en el que las señales defectuosas se convierten en medibles.

3.º *Bloque de medida.* Es el órgano encargado de medir los errores y poner en funcionamiento el dispositivo de protección.

4.º *Bloque de salida.* Tiene por misión amplificar la señal de medida y atacar el órgano de accionamiento a la desconexión.

5.º *Fuente de alimentación.* En muchos de los relés de protección, su fuente de alimentación va incorporada al mismo relé y sirve para suministrarle la tensión de trabajo.

10.1.2 *Características de los relés*

a) Los relés, por razones de protección, tienen que cumplir con muchas exigencias propias de su misión.

b) Por ello, es necesario que sean rápidos en su respuesta, separando la parte afectada del resto de la línea.

c) La seguridad de funcionamiento ha de ser mucho mayor que la de cualquier línea o aparato que proteja.

d) El relé debe ser insensible a cualquier sobrecarga y sobretensión, y muy sensible a que su funcionamiento sea correcto para el valor mínimo de perturbación.

e) El funcionamiento será tal que su respuesta se producirá cualquiera que sea la intensidad de cortocircuito y la naturaleza del accidente.

Finalmente, tiene que desconectar de la red a la máquina afectada por el defecto.

10.2 Enumeración de los criterios que se deben seguir para detectar una anomalía en una instalación

Los criterios que al técnico o al usuario pueden llevarles a detectar un defecto pueden ser:

— Aumento de la corriente de consumo.
— Aumento brusco de la intensidad de corriente.
— Disminución de tensión.
— Aumento de tensión.

— Disminución de la impedancia aparente.
— Comparación de la intensidad de entrada y salida en un circuito.
— Inversión inadecuada del sentido de rotación de una máquina.
— Masas inadecuadas en las carcasas de las máquinas.
— Descargas atmosféricas, etc.

10.3 Características eléctricas de construcción de los relés de protección

Atendiendo a las características eléctricas de funcionamiento de protección, se dividen en:

— Relés de inducción.
— Relés electromagnéticos.
— Relés electrónicos.
— Relés electrodinámicos.
— Relés térmicos.

10.3.1 *Relés de inducción*

El estudio de los relés de protección de inducción se basa en el efecto Ferraris. Consta de un disco *N* que gira alrededor de un eje *P*, sobre el cual va enrollado un contrapeso *M* (fig. 10.2).

El par desarrollado sobre el disco depende de los flujos Φ_1 y Φ_2 producidos en los dos arrollamientos de sus respectivos bobinados.

El relé de protección será más o menos fiable, si al disco se le opone un par resistente de valor prefijado mediante el contrapeso *M* y regulando la distancia entre los circuitos magnéticos.

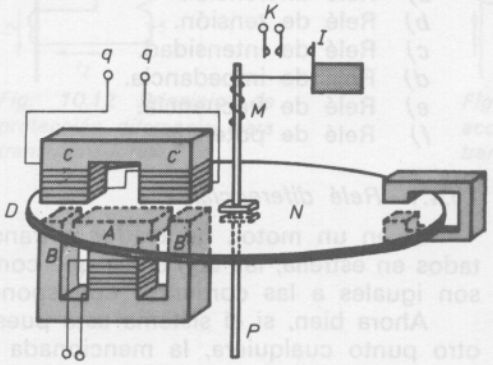


Fig. 10.2 Relé de inducción.

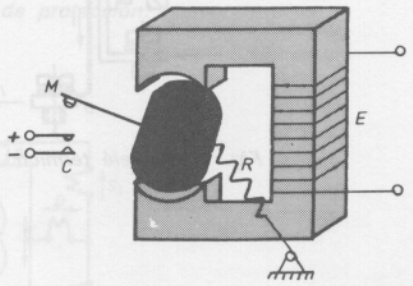


Fig. 10.3 Relé electromagnético.

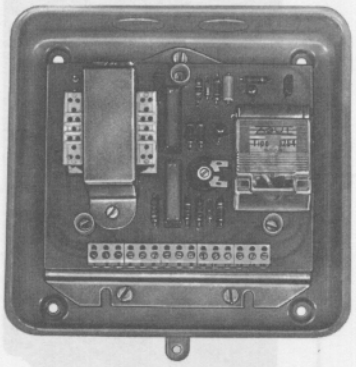


Fig. 10.4 Relé electrónico.

10.3.2 *Relés electromagnéticos*

Su tecnología se analiza según la fuerza magnética que dos piezas imantadas ejercen entre sí.

La figura 10.3 aclara que una de las piezas es móvil y la otra fija. La corriente o tensión que se mide es aplicada a la bobina *E*.

El elemento móvil *M*, que lleva un resorte antagónico *R*, accionará los contactos *C* del circuito de protección de alarma, según la corriente o tensión a que esté sometido el bobinado *E*.

Los relés de protección electromagnéticos suelen ser normalmente de armadura móvil.

10.3.3 *Relés electrónicos*

Los dispositivos de protección electrónicos están cada día más en auge, por la aportación que la ciencia de los semiconductores y válvulas ha desarrollado.

La precisión y fiabilidad conseguidas con estos componentes han hecho que se fabriquen relés de protección de todas clases, para múltiples aplicaciones.

En la figura 10.4, se contempla un circuito electrónico de un relé de protección.

10.3.4 *Relés electrodinámicos*

Su funcionamiento se basa en la acción que ejerce una bobina móvil sobre otra fija (fig. 10.5).

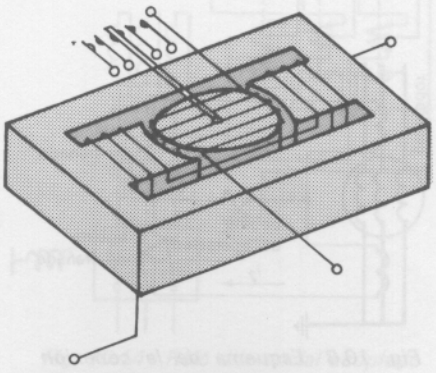


Fig. 10.5 Relé electrodinámico.

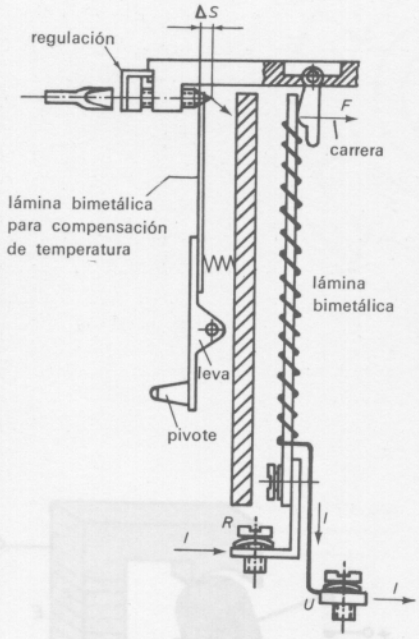


Fig. 10.6 Relé térmico.

La tensión del circuito suele aplicarse a la bobina móvil mediante la colocación de una resistencia en serie que limita el valor de la diferencia de potencial aplicada.

El entrehierro se elige adecuadamente de forma que se eviten cualquier riesgo de saturación del circuito magnético y problemas en la precisión del relé.

10.3.5 *Relés térmicos*

Probablemente son éstos los que tienen un funcionamiento más elemental.

Actúan al calentarse un bimetal y sufrir éste una deformación proporcional al valor de la intensidad de corriente que circula por la chapita bimetálica (figura 10.6).

En estos relés, la chapita hace contacto sobre la borna de apertura de la bobina del contactor de maniobra de la máquina.

10.4 Relés de protección, según la magnitud eléctrica que vigilan

Es notoria la múltiple diversidad de relés que existen en el campo de la protección y vigilancia de las máquinas y aparatos eléctricos. Fácil es deducir que este tema sería largo y laborioso de abordar detalladamente, con lo que rebasaríamos el programa marcado para este curso.

No obstante, para tener un concepto claro del funcionamiento de los relés, se puede afirmar sin error que su estudio se basa en el control de las magnitudes eléctricas ya conocidas, como son: la tensión, la intensidad, la frecuencia, etc.; por tanto, a la hora de proyectar un relé, podrá estar encuadrado en la siguiente división:

a) Relé diferencial.
b) Relé de tensión.
c) Relé de intensidad.
d) Relé de impedancia.
e) Relé de frecuencia.
f) Relé de potencia.



Fig. 10.7 Relé diferencial.

10.4.1 *Relé diferencial*

Si en un motor, generador o transformador, sus bobinados están conectados en estrella, las corrientes que convergen en el punto neutro de la estrella son iguales a las corrientes correspondientes de línea.

Ahora bien, si el sistema está puesto a tierra tanto en la estrella como en otro punto cualquiera, la mencionada igualdad de corrientes dejará de mantenerse en cuanto se produzca una falta a tierra en cualquiera de los arrollamientos de la máquina.

La protección contra faltas de esta naturaleza puede hacerse por medio de relés (fig. 10.7) que actúen por la acción de la diferencia entre las dos corrientes de cada fase y cierren sus contactos cuando la relación entre ambos exceda un valor determinado (fig. 10.8).

Es evidente que, cuando las corrientes I_1 e I_2 de los transformadores de intensidad sean iguales y del mismo sentido, no circulará ninguna corriente por la bobina operadora.

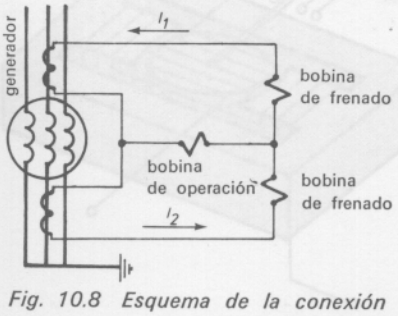


Fig. 10.8 Esquema de la conexión de un relé diferencial.

10.4.1.1 *Relé diferencial para la protección de máquinas rotativas*

Tratándose de generadores trifásicos, como es lo normal, se emplearán tres relés, uno por cada fase, según se muestra en las figuras 10.9 y 10.10.

La característica de funcionamiento es una recta con pendiente de 45°, en un sistema de ejes cartesianos rectangulares en el cual las abscisas y ordenadas representan I_1 e I_2 respectivamente y a la misma escala, tal como se aprecia en la figura 10.11.

Hay dos rectas divergentes que, partiendo del origen, delimitan, con la recta a 45°, dos zonas, por encima y por debajo de la misma y representan el margen de tolerancia que cubre los errores propios de los transformadores de intensidad.

Según la figura 10.10, las bobinas de excitación del interruptor de la máquina en bornas *B* y el de excitación del bobinado inductor *F* del generador actuarían si cualquiera de las fases sufriera un desequilibrio y circulara una intensidad diferencial de $I_d = I_1 - I_2$ por una de las bobinas de protección.

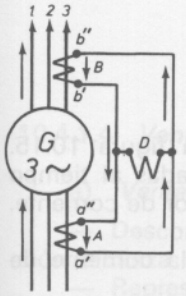


Fig. 10.9 Principio de conexión en una fase de un relé diferencial.

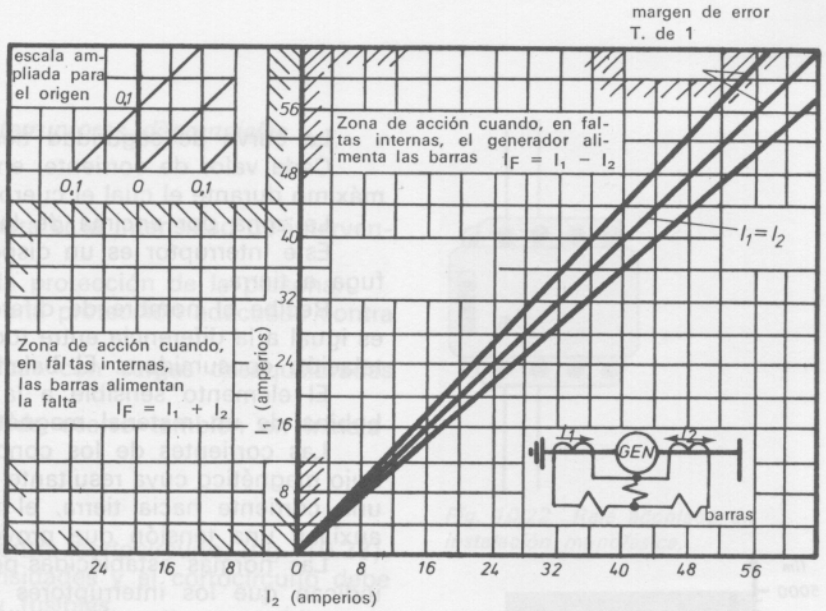


Fig. 10.11 Características de un relé de protección.

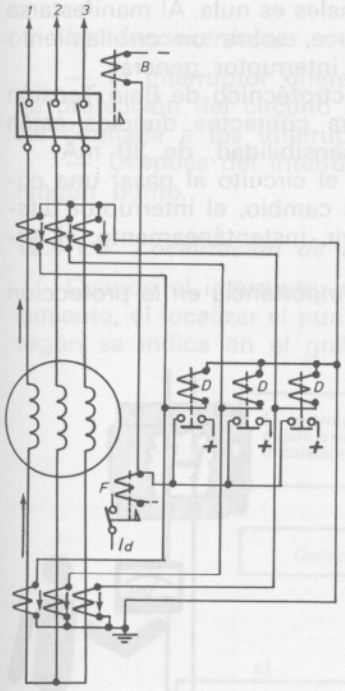


Fig. 10.10 Relé diferencial acoplado a un generador trifásico.

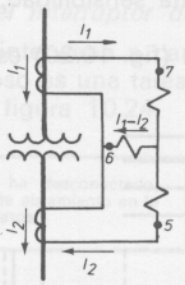


Fig. 10.12 Principio de protección diferencial para transformadores.

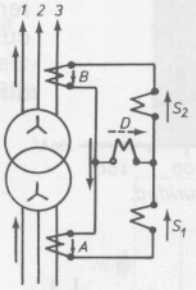


Fig. 10.13 Relé diferencial acoplado a una fase de un transformador.

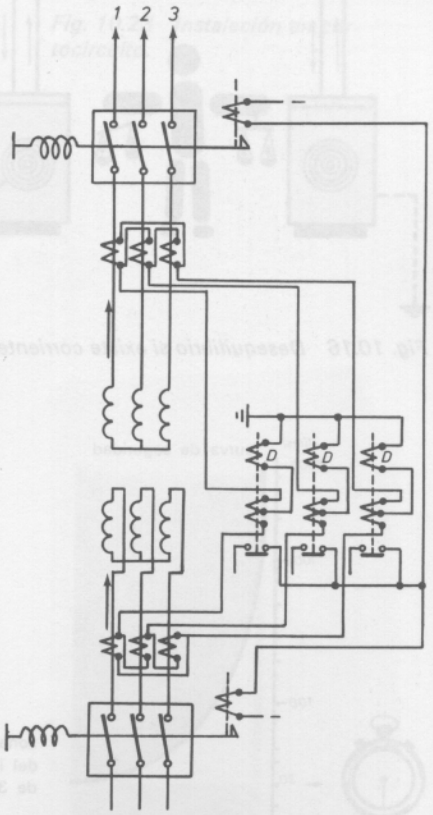


Fig. 10.14 Relé diferencial acoplado a un transformador.

10.4.1.2 *Relé diferencial para la protección de transformadores*

Los relés diferenciales (fig. 10.12) para transformadores de dos arrollamientos se distinguen de los generadores en que la bobina operadora va provista de varias derivaciones a las que pueden conectarse, a través de grupos adicionales de espiras, las dos mitades de la bobina de frenado.

Las características de funcionamiento de estos relés son tales que, cuando las corrientes I_1 e I_2 están en la misma relación que los números de las tomas seleccionadas en ambos bloques, no se produce par de operación y el relé no actúa.

En las figuras 10.13 y 10.14 están dibujados dos transformadores trifásicos con la protección diferencial compensada.

10.4.1.3 *Interruptores diferenciales*

Además de los dispositivos normales empleados para la protección de una instalación eléctrica de interruptores automáticos, fusibles, etc., hay disponible para la protección de la persona, según las normas dadas por el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, un dispositivo de protección, llamado interruptor diferencial, cuyo estudio insertamos por su enorme importancia.

La corriente eléctrica puede producir efectos perjudiciales a su paso a través del cuerpo humano.

Se sabe que una corriente eléctrica es tanto más peligrosa cuanto mayor es el tiempo durante el cual recorre el cuerpo humano.

La curva de seguridad tiempo-corriente viene dada por la figura 10.15.

Cada valor de corriente, en abscisas, corresponde en ordenadas al tiempo máximo durante el cual el cuerpo humano puede soportar ese valor de corriente.

La zona por encima de la curva es peligrosa.

Este interruptor es un dispositivo de protección sensible a la corriente de fuga a tierra.

Recibe el nombre de diferencial porque la corriente de fuga (fig. 10.16) es igual a la diferencia entre todas las corrientes entrantes y salientes en la instalación consumidora. El balance de tales corrientes es, generalmente, nulo.

El elemento sensible a la corriente diferencial está constituido por una bobina de un material magnético de alta calidad (fig. 10.17).

Las corrientes de los conductores que atraviesan la bobina producen un flujo magnético cuya resultante en condiciones normales es nula. Al manifestarse una corriente hacia tierra, el flujo resultante induce, sobre un arrollamiento auxiliar, una tensión que provoca la apertura del interruptor general.

Las normas establecidas por el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión indican que los interruptores de protección contra contactos directos estén protegidos por dispositivos diferenciales de alta sensibilidad, de 30 mA.

El interruptor automático o el fusible no abren el circuito al pasar una corriente a través del cuerpo humano (fig. 10.18). En cambio, el interruptor diferencial (fig. 10.19), de alta sensibilidad, puede abrir, instantáneamente, el circuito.

El tiempo de apertura (fig. 10.20) es de suma importancia en la protección diferencial.

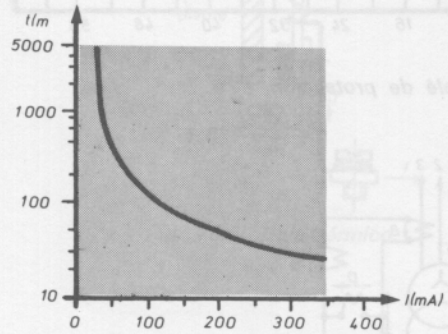


Fig. 10.15 Curva de seguridad.

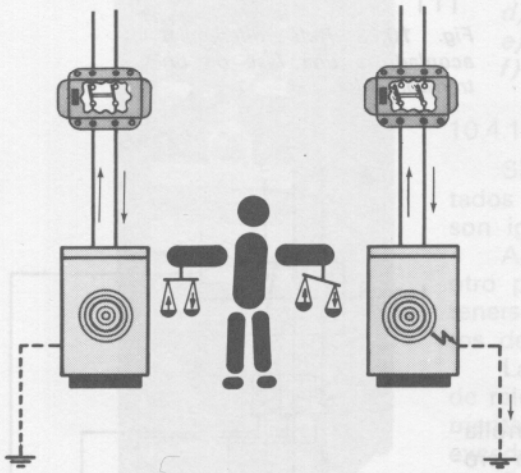


Fig. 10.16 Desequilibrio si existe corriente de fuga.

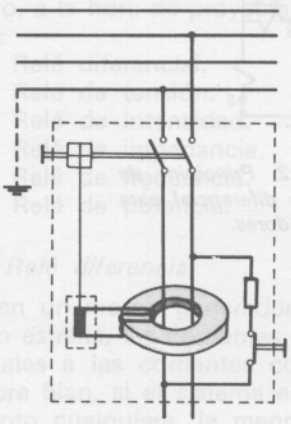


Fig. 10.17 Relé diferencial, circuito magnético.



Fig. 10.18 Relé de muy poca sensibilidad.

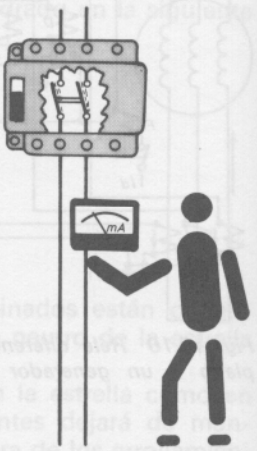


Fig. 10.19 Relé de mucha sensibilidad.

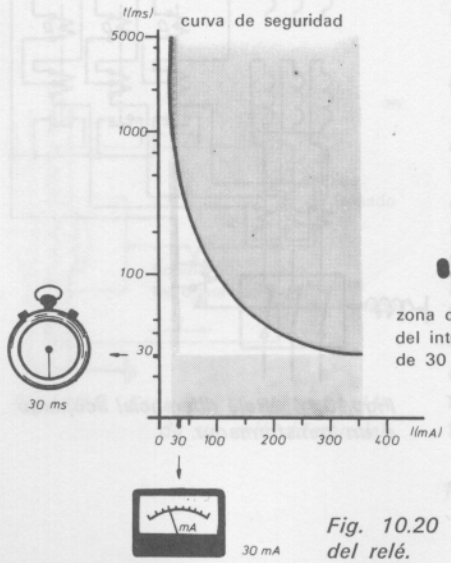


Fig. 10.20 Tiempo de apertura del relé.

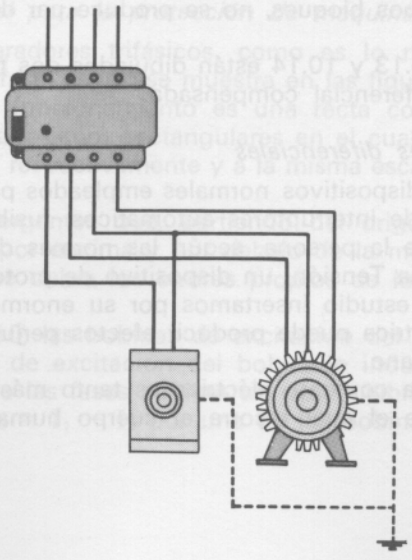


Fig. 10.21 Carga desequilibrada.

10.4.1.4 *Ventajas e inconvenientes de los interruptores diferenciales*

a) *Ventajas*

— Desconecta la corriente de defecto a tierra si la intensidad de intervención alcanza su sensibilidad.

— Representa el dispositivo óptimo para la protección de la persona.

— El interruptor de alta sensibilidad tiene una protección adecuada contra incendios.

— Puede usarse para instalaciones eléctricas con cargas desequilibradas (fig. 10.21).

— Un interruptor diferencial tetrapolar puede usarse también en instalaciones monofásicas (fig. 10.22).

b) *Inconvenientes*

— El interruptor diferencial no protege contra cortocircuito (fig. 10.23). La protección del circuito contra las sobreintensidades y el cortocircuito debe ser confiada a los interruptores automáticos y fusibles.

— Después del interruptor, el neutro no debe estar conectado a tierra en ningún punto.

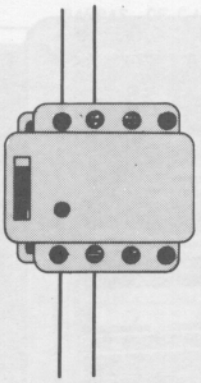


Fig. 10.22 Relé acoplado en instalación monofásica.

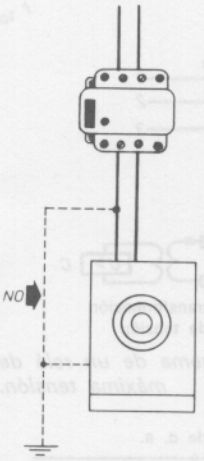


Fig. 10.23 Instalación en cortocircuito.

10.4.1.5 *Localización de averías si el interruptor diferencial se desconecta*

Cuando el interruptor diferencial interviene a causa de un defecto de aislamiento, el localizar el punto defectuoso es una tarea ardua; para ello, se opera según se indica en el gráfico de la figura 10.24.

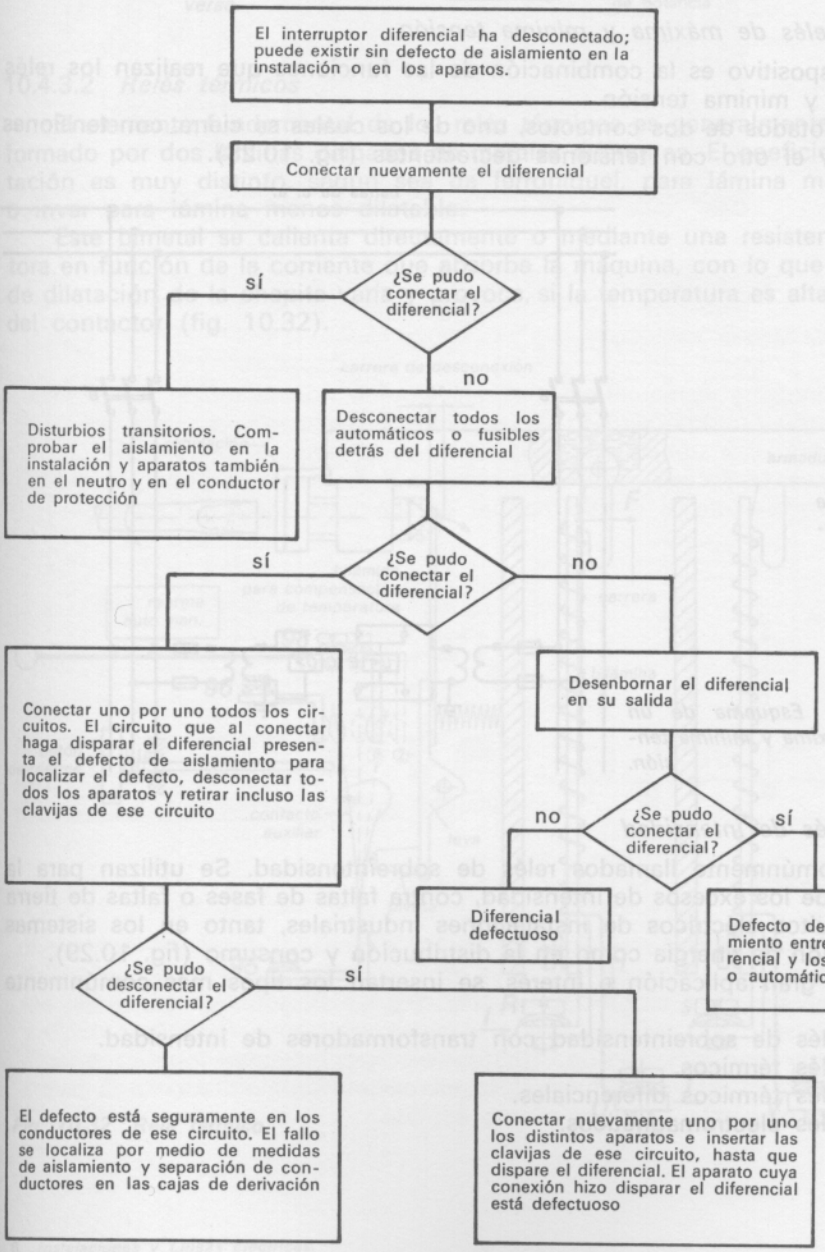


Fig. 10.24 Gráfica de averías en un relé diferencial.

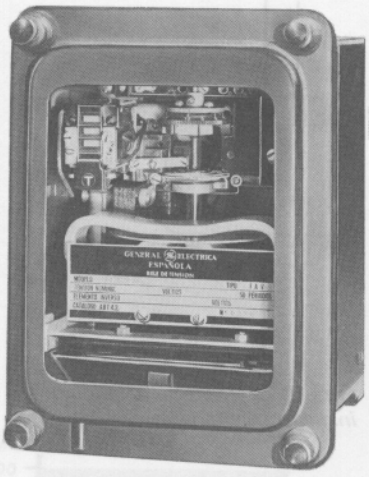


Fig. 10.25 Relé de tensión.

10.4.2 *Relé de tensión*

Los relés de protección de tensión suelen ser monofásicos y del tipo de disco de inducción y de acción temporizada regulable.

Se utilizan para la protección y control de generadores, motores, transformadores y circuitos monofásicos y trifásicos de corriente alterna, en los que la tensión constituye el factor más importante (fig. 10.25).

Se dividen en:

a) Relés de máxima tensión.
b) Relés de mínima tensión.
c) Relés de mínima y máxima tensión.

10.4.2.1 *Relés de máxima tensión*

Los relés de máxima tensión trabajan con valores de 11 a 18 veces el valor de la tensión nominal, y tienen la facultad de evitar que la tensión de trabajo de la máquina sea excesiva (fig. 10.26). Estos relés no sólo protegen las sobretensiones, sino que también son de uso frecuente en otras aplicaciones, como detección de faltas a tierra en barras o en generadores de corriente alterna.

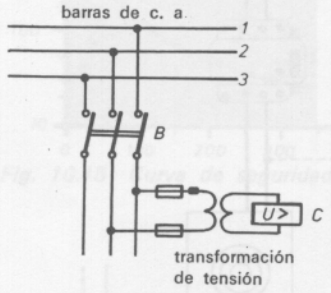


Fig. 10.26 Esquema de un relé de máxima tensión.

10.4.2.2 *Relés de mínima tensión*

Los relés de protección contra las hipotensiones desconectan el interruptor de barras (fig. 10.27) siempre que la tensión disminuye de un valor prefijado de antemano o la tensión se corta.

Se vuelven a conectar únicamente cuando la tensión adquiere el valor adecuado para que el relé trabaje en condiciones normales.

10.4.2.3 *Relés de máxima y mínima tensión*

Este dispositivo es la combinación de las funciones que realizan los relés de máxima y mínima tensión.

Están dotados de dos contactos, uno de los cuales se cierra con tensiones crecientes y el otro con tensiones decrecientes (fig. 10.28).

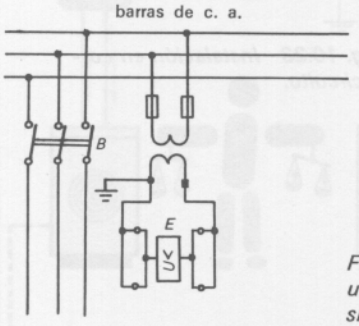


Fig. 10.27 Esquema de un relé de mínima tensión.

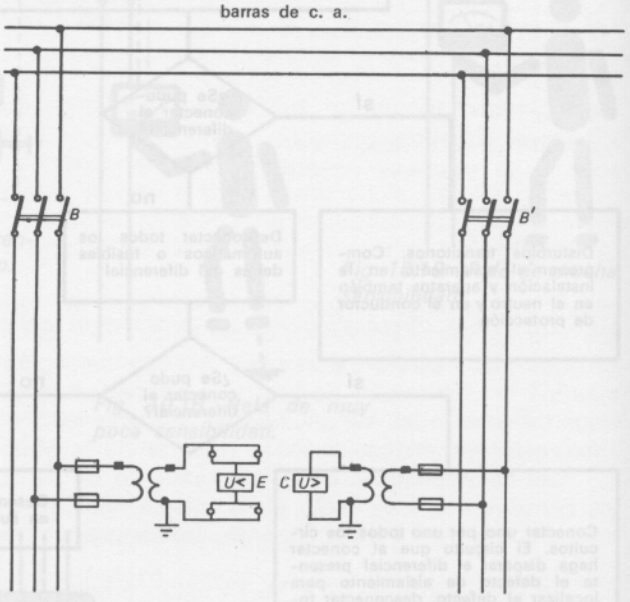


Fig. 10.28 Esquema de un relé de máxima y mínima tensión.

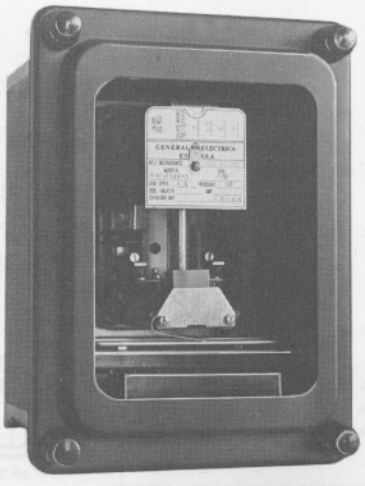


Fig. 10.29 Relé de intensidad.

10.4.3 *Relés de intensidad*

Más comúnmente llamados relés de sobreintensidad. Se utilizan para la protección de los excesos de intensidad, contra faltas de fases o faltas de tierra en los circuitos eléctricos de instalaciones industriales, tanto en los sistemas de producción de energía como en la distribución y consumo (fig. 10.29).

Por su gran aplicación e interés, se insertan los tipos más comúnmente empleados:

a) Relés de sobreintensidad con transformadores de intensidad.
b) Relés térmicos.
c) Relés térmicos diferenciales.
d) Relés electromagnéticos.

10.4.3.1 *Relés de sobreintensidad con transformadores de intensidad*

La constitución es muy variada, según las características eléctricas de funcionamiento.

Una bobina amperimétrica es la encargada de vigilar el exceso de intensidad de su propia fase. La corriente está controlada por el relé de protección y es equivalente a la que circula por la línea (fig. 10.30).

Los relés de sobreintensidad se calibran, normalmente, para que actúen con intensidades superiores a la de plena carga de la instalación que protegen y para que, en las condiciones de máximo cortocircuito, proporcionen una coordinación de tiempos en el disparo de los interruptores que controlan (figura 10.31).

Los intervalos de tiempo mínimos *S* deben ser igual al tiempo que tarda el interruptor en despejar la falta desde que recibe la señal de actuación del relé.

Los tiempos están comprendidos, generalmente, entre 0,25 y 0,45 s, según las características del relé.

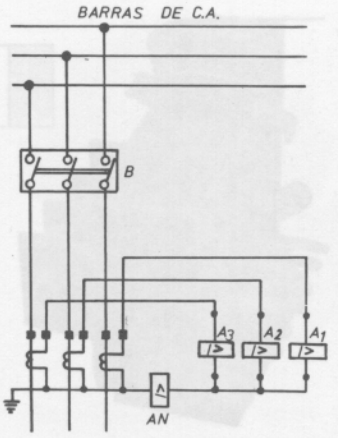


Fig. 10.30 Esquema de un telé de intensidad.

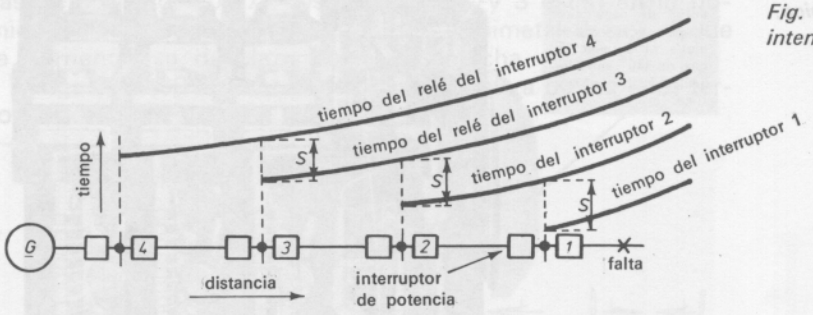


Fig. 10.31 Coordinación de tiempos con relé de característica inversa.

10.4.3.2 *Relés térmicos*

El elemento fundamental de los relés térmicos es generalmente un bimeta formado por dos láminas delgadas de metales diferentes. El coeficiente de dilatación es muy distinto, según sea de ferroníquel, para lámina muy dilatable, o invar para lámina menos dilatable.

Este bimetal se calienta directamente o mediante una resistencia calefactora en función de la corriente que absorbe la máquina, con lo que la curvatura de dilatación de la chapita varía y provoca, si la temperatura es alta, la apertura del contactor (fig. 10.32).

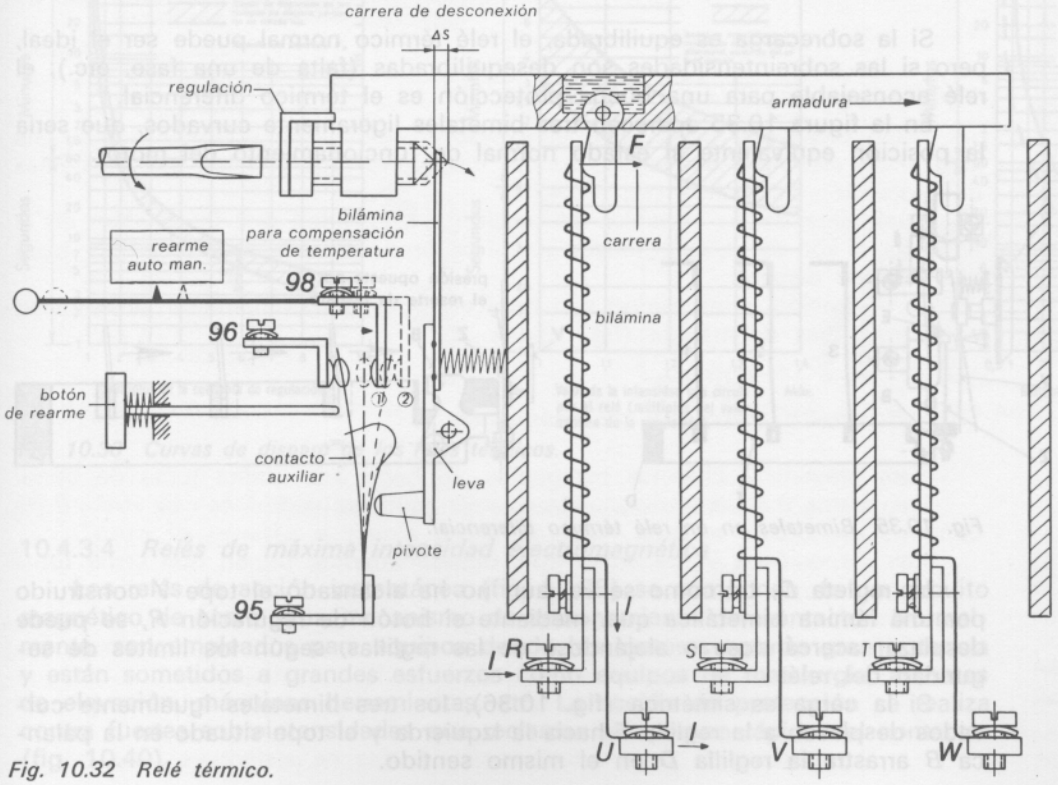


Fig. 10.32 Relé térmico.

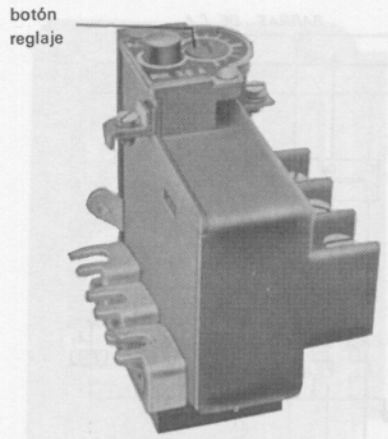


Fig. 10.33 Reglaje de un relé térmico,

Al tratarse de motores trifásicos, los tres bimetales actúan sobre el árbol móvil, en el que va montada una uñeta metálica, que se apoya en un tope, cuya posición puede variarse por medio del botón de reglaje (fig. 10.33).

Los relés térmicos pueden ser disparados cuando la sobreintensidad es del orden de un 5 al 15 % de la de reglaje.

10.4.3.3 *Relés térmicos diferenciales*

Controlan el desequilibrio de intensidad que por sobrecarga puede circular por una fase diferente a la que pasa por las otras (fig. 10.34).

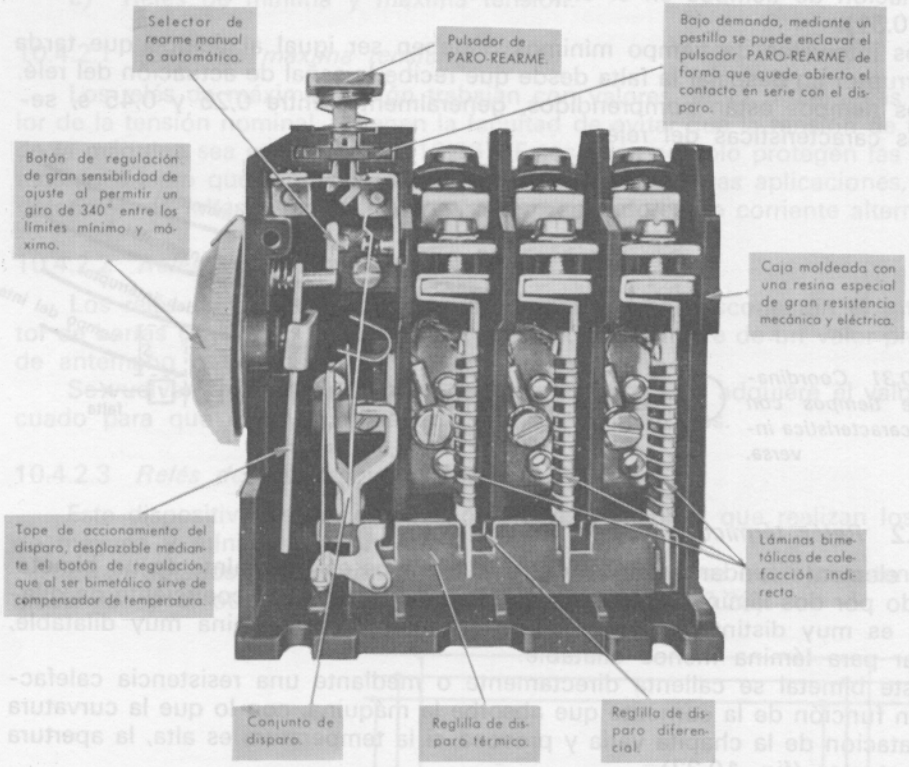


Fig. 10.34 Relé térmico diferencial.

Si la sobrecarga es equilibrada, el relé térmico normal puede ser el ideal, pero si las sobreintensidades son desequilibradas (falta de una fase, etc.), el relé aconsejable para una buena protección es el térmico diferencial.

En la figura 10.35 aparecen tres bimetales ligeramente curvados, que sería la posición equivalente al estado normal de funcionamiento del motor.

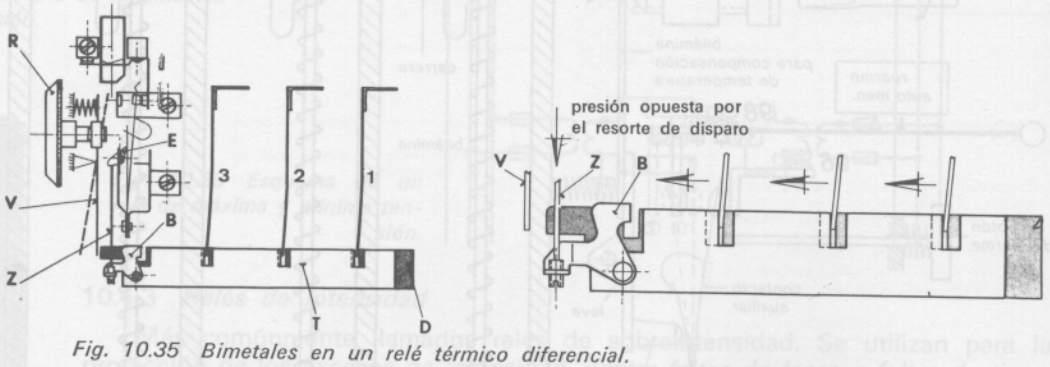


Fig. 10.35 Bimetales en un relé térmico diferencial.

La regleta *D*, tal como se ve, aún no ha alcanzado el tope *V* construido por una lámina bimetálica que, mediante el botón de regulación *R*, se puede desplazar acercándose o alejándose de las reglillas, según los límites de seguridad del relé.

Si la carga es simétrica (fig. 10.36), los tres bimetales igualmente curvados desplazan a la reglilla *T* hacia la izquierda y el tope situado en la palanca *B* arrastra la reglilla *D* en el mismo sentido.

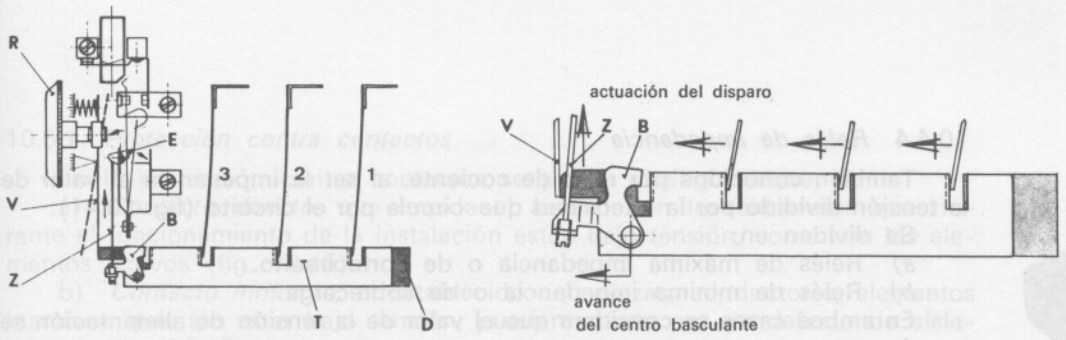


Fig. 10.36 Carga simétrica.

Cuando la reglilla *D* alcanza la lámina *V*, queda parada pero, como los bimetales siguen actuando sobre la reglilla térmica *T*, el centro basculante de la palanca *B* avanza hacia su izquierda, venciendo la presión de la varilla *Z* que, al actuar sobre la excéntrica *E*, la hace girar hacia la derecha, provocando el disparo del relé.

Si la carga es asimétrica (fig. 10.37), los bimetales 1 y 3 están en la posición de funcionamiento normal del relé, mientras que el bimetal 2, por el que se supone no pasa corriente, se desplaza hacia la derecha.

Las gráficas de la figura 10.38 dan una idea bastante clara de los relés térmicos y los térmicos diferenciales.

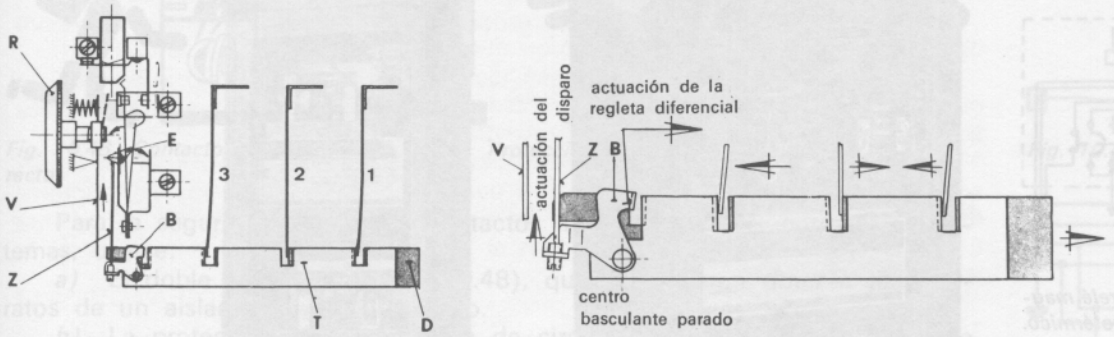


Fig. 10.37 Carga asimétrica.

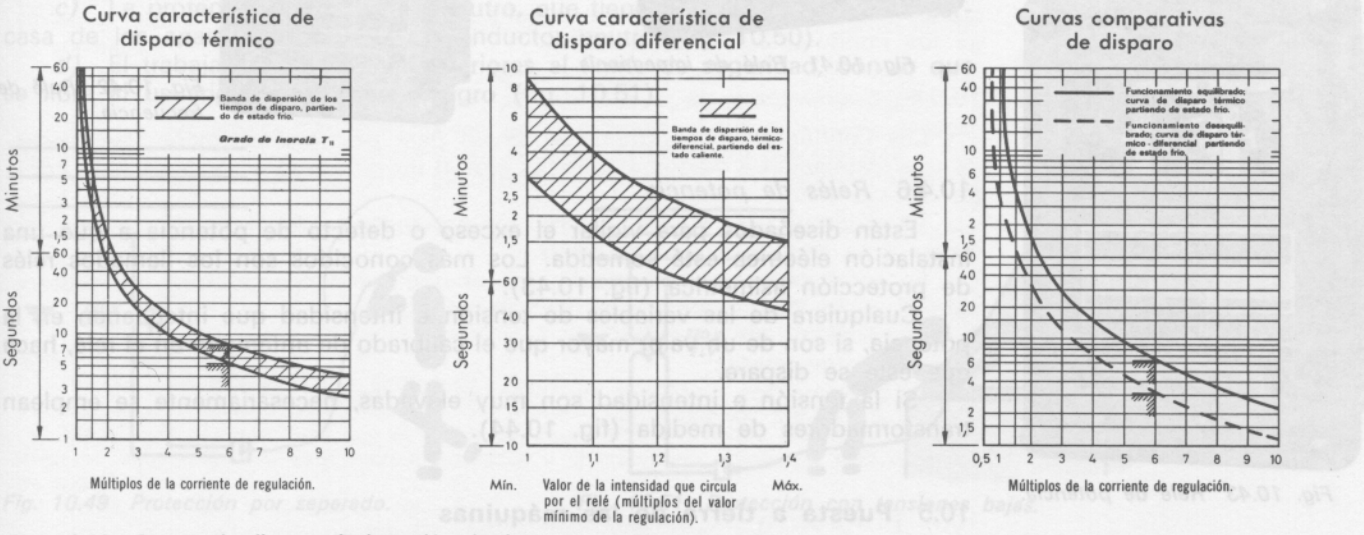


Fig. 10.38 Curvas de disparo de los relés térmicos.

10.4.3.4 *Relés de máxima intensidad electromagnética*

Los relés de acción instantánea (fig. 10.39) se componen de un circuito magnético de acero y un mecanismo de accionamiento del contactor. Normalmente, son empleados para equipos donde los motores son de gran potencia y están sometidos a grandes esfuerzos como equipos de metalurgia, aparatos de elevación, máquinas herramientas, etc. La acción de protección se realiza contra fuertes sobreintensidades que reclaman la apertura rápida del contactor (fig. 10.40).

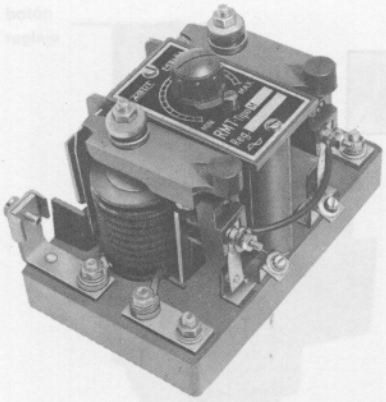


Fig. 10.39 Relé magnetotérmico.

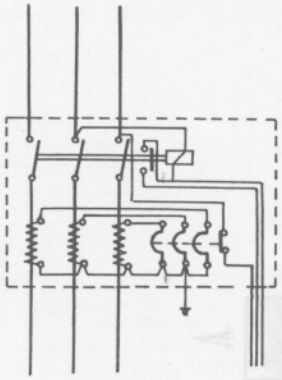


Fig. 10.40 Esquema de un relé magnetotérmico.

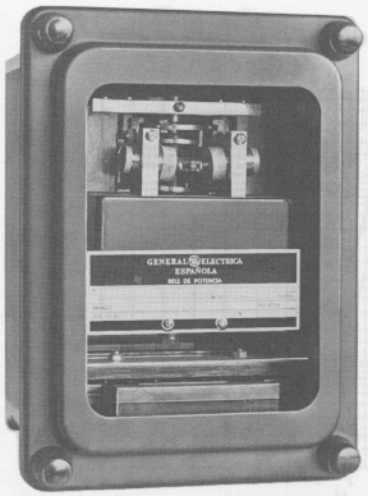


Fig. 10.43 Relé de potencia.

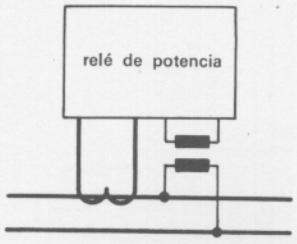


Fig. 10.44 Relé de potencia con transformador de tensión e intensidad.

10.4.4 *Relés de impedancia*

También conocidos por relés de cociente, al ser la impedancia el valor de la tensión dividido por la intensidad que circula por el circuito (fig. 10.41).

Se dividen en:

a) Relés de máxima impedancia o de cortocircuito.

b) Relés de mínima impedancia o de sobrecarga.

En ambos casos se considera que el valor de la tensión de alimentación se mantiene constante.

10.4.5 *Relés de frecuencia*

La frecuencia en una red trifásica tiene que mantenerse rigurosamente constante.

Como ésta depende de la velocidad del generador, es por ello por lo que estos relés de protección contra alteraciones de frecuencia vigilan la velocidad de las máquinas y accionan dispositivos especiales para que la velocidad sea controlada de manera que, ante cualquier alteración de velocidad, reaccionen en sentido contrario los reguladores de velocidad de la máquina (fig. 10.42).

La construcción de estos dispositivos es de inducción y electrónicos.



Fig. 10.41 Relé de impedancia.

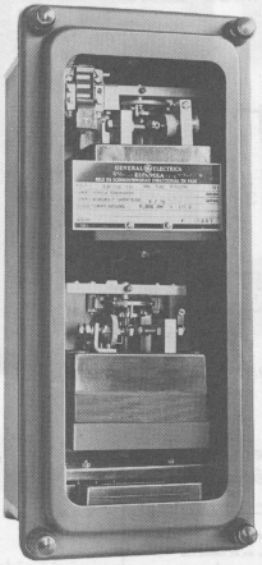


Fig. 10.42 Relé de frecuencia.

10.4.6 *Relés de potencia*

Están diseñados para vigilar el exceso o defecto de potencia a que una instalación eléctrica está sometida. Los más conocidos son los llamados relés de protección asimétrica (fig. 10.43).

Cualquiera de las variables de tensión e intensidad que intervienen en la potencia, si son de un valor mayor que el calibrado de antemano en el relé, hace que éste se dispare.

Si la tensión e intensidad son muy elevadas, necesariamente se emplean transformadores de medida (fig. 10.44).

10.5 **Puesta a tierra de las máquinas**

Para prevenir accidentes personales, se hace una buena toma de tierra.

Las partes metálicas de una instalación que no pertenecen al circuito de corriente de trabajo tendrán toma de tierra.

Los dispositivos y máquinas que, necesariamente, tienen que tener toma de tierra, son:

a) Los transformadores de intensidad y tensión.

b) Las carcasas de todas las máquinas herramientas, transformadores, generadores, aparatos y dispositivos eléctricos.

c) Los transformadores de baja tensión conectan a tierra el centro de estrella.

d) Los pasamuros, armazones, postes, bridas de aisladores, etc.

10.5.1 *Protección contra contactos*

En la protección contra contactos se puede distinguir entre:

a) *Contacto directo,* que impide el acceso con los elementos que durante el funcionamiento de la instalación están bajo tensión, como son los elementos activos (fig. 10.45).

b) *Contacto indirecto,* el establecido con piezas, conductores, elementos inactivos que, sin estar bajo tensión, pueden estarlo por un defecto de aislamiento (fig. 10.46).

La protección contra los contactos directos consiste en aislar las partes normalmente en tensión, haciéndolas inaccesibles por alejamientos: líneas aéreas, barreras, cajas de aislamiento de plástico, etc. (fig. 10.47).



Fig. 10.45 Contacto directo.



Fig. 10.46 Contacto indirecto.

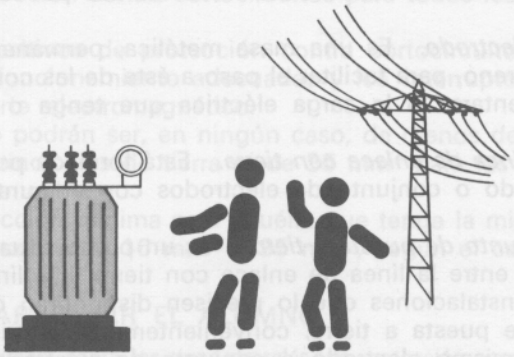


Fig. 10.47 Protección contra contactos directos.



Fig. 10.48 Doble aislamiento.

Para la seguridad contra los contactos indirectos puede, entre otros sistemas, usarse:

a) El doble aislamiento (fig. 10.48), que consiste en dotar a los aparatos de un aislamiento suplementario.

b) La protección por separación de circuitos. Basta con alimentar uno o varios aparatos a través de un transformador con especiales características de seguridad (fig. 10.49).

c) La protección de puesta a neutro, que tiene por objeto colocar la carcasa de los aparatos eléctricos al conductor neutro (fig. 10.50).

d) El trabajar con tensiones inferiores al límite de seguridad, con lo que se libra al usuario de cualquier peligro (fig. 10.51).

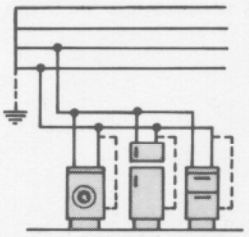


Fig. 10.50 Protección de puesta a neutro.

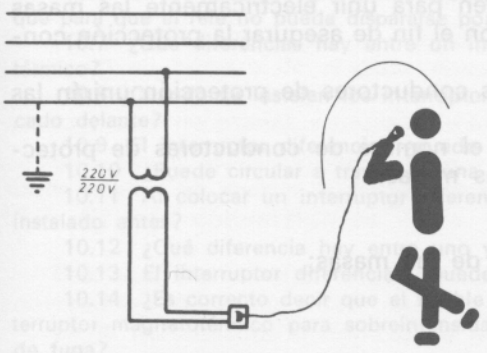


Fig. 10.49 Protección por separado.



Fig. 10.51 Protección con tensiones bajas.

10.6 Normas del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión para la puesta a tierra

La denominación *puesta a tierra* comprende toda la ligazón metálica directa sin fusible ni protección alguna, de sección suficiente, entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo o grupo de electrodos enterrados en el suelo, con el objeto de conseguir que, en el conjunto de instalaciones próximas del terreno, no exista diferencias de potencial peligrosas y que, al mismo tiempo, permita el paso a tierra de las corrientes de falta o la de descarga de origen atmosférico.

10.6.1 *Partes que comprenden las puestas a tierra*

Todo sistema de puesta a tierra constará de las siguientes partes:
— Tomas de tierra.
— Líneas principales de tierra.
— Derivaciones de las líneas principales de tierra.
— Conductores de protección.

El conjunto de conductores, así como sus derivaciones y empalmes, que forman las diferentes partes de las puestas a tierra, constituyen el circuito de puesta a tierra.

10.6.2 *Tomas de tierra*

Las tomas de tierra estarán constituidas por los elementos siguientes:

— *Electrodo.* Es una masa metálica, permanentemente en buen contacto con el terreno, para facilitar el paso a éste de las corrientes de defecto que puedan presentarse o la carga eléctrica que tenga o pueda tener.

— *Línea de enlace con tierra.* Está formada por los conductores que unen el electrodo o conjunto de electrodos con el punto de puesta a tierra.

— *Punto de puesta a tierra.* Es un punto situado fuera del suelo que sirve de unión entre la línea de enlace con tierra y la línea principal de tierra.

Las instalaciones que lo precisen dispondrán de un número suficiente de puntos de puesta a tierra, convenientemente distribuidos, que estarán conectados al mismo electrodo o conjunto de electrodos.

El punto de puesta a tierra estará constituido por un dispositivo de conexión (regleta, placa, borne, etc.) que permita la unión entre los conductores de las líneas de enlace y principal de tierra, de forma que puedan, mediante útiles apropiados, separarse éstas con el fin de poder realizar la medida de la resistencia de tierra.

10.6.3 *Líneas principales de tierra*

Las líneas principales de tierra estarán formadas por conductores que partirán del punto de puesta a tierra y a las cuales estarán conectadas las derivaciones necesarias para la puesta a tierra de las masas, generalmente, a través de los conductores de protección.

10.6.4 *Conductores de protección*

Los conductores de protección sirven para unir eléctricamente las masas de una instalación a ciertos elementos con el fin de asegurar la protección contra los contactos indirectos.

En el circuito de puesta a tierra, los conductores de protección unirán las masas a la línea principal de tierra.

En otros casos reciben igualmente el nombre de conductores de protección aquellos conductores que unen las masas:
— al neutro de la red;
— a otras masas;
— a elementos metálicos distintos de las masas;
— a un relé de protección.

10.7 **Protección de las instalaciones**

Todo circuito estará protegido contra los efectos de las sobreintensidades que puedan presentarse en el mismo, para lo cual la interrupción de este circuito se realizará en un tiempo conveniente o estará dimensionado para las sobreintensidades previsibles.

Las sobreintensidades pueden estar motivadas por:
— Sobrecargas debidas a los aparatos de utilización o defectos de aislamiento de gran impedancia.
— Cortocircuitos.

Excepto los conductores de protección, todos los conductores que forman parte de un circuito, incluyendo el conductor neutro o compensador, estarán protegidos contra los efectos de las sobreintensidades.

a) Protección contra sobrecargas. El límite de intensidad de corriente admisible en un conductor ha de quedar, en todo caso, garantizado por el dispositivo de protección utilizado.

Como dispositivos de protección contra sobrecargas serán utilizados los fusibles calibrados de características de funcionamiento adecuadas o los interruptores automáticos con curva térmica de corte.

b) Protección contra cortocircuitos. En el origen de todo circuito se establecerá un dispositivo de protección contra cortocircuitos, cuya capacidad de corte estará de acuerdo con la intensidad de cortocircuito que pueda presentarse en el punto de su instalación. Se admite, no obstante, que, cuando se trate de circuitos derivados de uno principal, cada uno de estos circuitos derivados disponga de protección contra sobrecargas, mientras que un solo dispositivo general pueda asegurar la protección contra cortocircuitos para todos los circuitos derivados.

Se admiten como dispositivos de protección contra cortocircuitos los fusibles de características de funcionamiento adecuadas y los interruptores automáticos con sistema de corte electromagnético.

c) Los conductores no podrán ser, en ningún caso, de menos de 16 mm^2 de sección para las líneas principales de tierra ni de 35 mm^2 para las líneas de enlace con tierra, si son de cobre.

Para otros metales la sección mínima será aquélla que tenga la misma conductancia que un cable de cobre de 16 mm^2 ó 35 mm^2, según el caso.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Realícese un cuadro resumen, sobre los tipos de relés, de protección en el que aparezcan: el resumen de funcionamiento, tres aplicaciones prácticas de cada uno y sus características técnicas.

— Utilizando el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, recopílense todos aquellos artículos que tratan sobre protecciones.

CUESTIONARIO

10.1 Los relés de protección, al detectar una anomalía, ¿sobre que dispositivos de acción suelen actuar?

10.2 Al referirse, en los relés de protección, a las palabras sensibilidad y fiabilidad, ¿qué significado eléctrico se les puede dar?

10.3 En los relés de protección de inducción, ¿qué fórmula definiría el par en función de los flujos?

10.4 ¿Qué otro nombre reciben los relés de potencia?

10.5 ¿Qué diferencia hay entre un relé diferencial y un relé térmico diferencial?

10.6 En los relés de máxima intensidad, ¿cómo se puede neutralizar la acción de arranque para que el relé no pueda dispararse por el exceso de intensidad que absorbe?

10.7 ¿Qué diferencias hay entre un interruptor diferencial y un interruptor magnetotérmico?

10.8 Cuando se instalan los interruptores antes mencionados, ¿cuál de ellos va colocado delante?

10.9 El interruptor diferencial, ¿puede sustituir a la instalación de tierra?

10.10 ¿Puede circular a través de una persona una corriente de 200 mA en 200 ms?

10.11 Al colocar un interruptor diferencial y un interruptor magnetotérmico, ¿cuál irá instalado antes?

10.12 ¿Qué diferencia hay entre uno y otro?

10.13 El interruptor diferencial, ¿puede sustituir a la instalación de tierra?

10.14 ¿Es correcto decir que el fusible sirve para proteger contra cortocircuitos, el interruptor magnetotérmico para sobreintensidades y el interruptor diferencial para corrientes de fuga?

10.15 Describe la protección diferencial en un transformador monofásico.

10.16 Aproximadamente, ¿cuál es la resistencia eléctrica del hombre?

10.17 ¿Cuál sería el relé de protección adecuado si la tensión puede tener los valores entre 185 y 250 V?

BIBLIOGRAFIA

Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e Instrucciones complementarias, Ministerio de Industria, Madrid 1973.

Catálogos de casas comerciales (Siemens, General Eléctrica Española, Agut, Telemecánica).

Protección de los sistemas eléctricos, Enciclopedia CEAC de Electricidad, Ediciones CEAC Barcelona 1973.

Siemens AE, *Instalaciones eléctricas,* Editorial Dossat, Madrid.

Tema 11. Convertidores rotativos

OBJETIVOS

— *Conocer los diversos tipos de convertidores rotativos.*
— *Adquirir idea clara de cómo funcionan los convertidores y para qué se usan.*
— *Conocer el funcionamiento y utilización de las conmutatrices.*

GUION

— Introducción.
— Grupos convertidores.
— Motor c. a. Dinamo.
— Motor c. c. Alternador.
— Convertidor de frecuencia.
— El dinamotor.
— Conmutatrices.
— Principio de funcionamiento.
— Utilización de las conmutatrices.
— Tensiones en una conmutatriz.
— Corrientes en una conmutatriz.
— Arranque de conmutatrices.

PUNTOS CLAVE

— Conceptos sobre la aplicación de los grupos convertidores.
— Funcionamiento y utilización de las conmutatrices.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Repaso de los Temas: 4, máquinas de corriente continua rotativas; 5, motores de corriente continua; 6, máquinas de corriente alterna rotativas; 8, motores de corriente alterna.

EXPOSICION DEL TEMA

11.1 Introducción

Por regla general la producción de energía eléctrica se realiza en forma de corriente alterna por ser más económica su producción y, sobre todo, menores las pérdidas en su transporte.

La producción se realiza a una determinada frecuencia (en Europa 50 Hz y en USA 60 Hz), y a una tensión que se eleva para transportar la energía y hacer, de esta forma, menores las pérdidas, aunque sea grande la potencia. La expresión de ésta es:

$$P = V \cdot I$$

en consecuencia, P será tan grande como lo sea V (varios miles de voltios), ya que las pérdidas son producidas por efecto Joule, y éste depende de I (en general, de valor absoluto menor que V).

Así, sabiendo que se dispone de energía eléctrica alterna, se podrá distribuir y transportar hasta los puntos de utilización (ciudades, centros de transformación, fábricas, altos hornos, etc.); estos puntos de utilización no son todos iguales y, además, no en todos se necesitará corriente alterna, sino que en cada punto particular se realizará una conversión de esta energía a la que para cada máquina o uso se precise (alterna de otra frecuencia o continua).

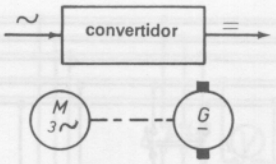


Fig. 11.1 Convertidor de c. a. en c. c.

11.1.1 *Definición*

Se llama *convertidor rotativo* a toda máquina o conjunto de máquinas rotativas que transforman una forma de energía eléctrica en otra también eléctrica.

11.1.2 *Clases de convertidores*

Las clases de convertidores serán tantas como posibilidades de modificación hay:

— Corriente alterna a corriente continua (fig. 11.1).
— Corriente continua a corriente alterna (fig. 11.2).
— Modificación de la frecuencia (fig. 11.3).

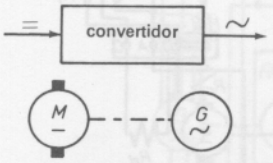


Fig. 11.2 Convertidor de c. c. en c. a.

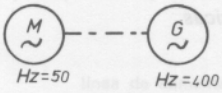


Fig. 11.3 Convertidor de frecuencia.

11.1.3 *Ventajas e inconvenientes*

La ventaja de los convertidores rotativos, frente a los estáticos, estriba en que, con un dimensionado adecuado del convertidor, se pueden utilizar para potencias elevadas.

No obstante, con el progreso de los materiales de estado sólido (semiconductores), en la actualidad con estos materiales se pueden convertir potencias del mismo orden de magnitud.

Entre los inconvenientes más acentuados, se encuentran los siguientes:

— Bajo rendimiento total de la conversión.
— Falta de estabilidad de las tensiones y frecuencias por efectos mecánicos.

Recuérdese que el rendimiento total de una máquina es el producto de los rendimientos:

$$\eta_T = \eta_M \cdot \eta_G$$

siendo:

η_T = el rendimiento de la transformación (entre 0,5 y 0,8);
η_M = el rendimiento del motor (entre 0,7 y 0,9);
η_G = el rendimiento del generador (entre 0,7 y 0,9).

Aunque en estas clases de conversiones se suele utilizar motores muy estables en su número de revoluciones, cualquier variación de la carga afecta a las características de la energía producida por el convertidor y, en consecuencia, son necesarias complejas maniobras de regulación y control.

11.2 **Grupos convertidores**

Este apartado intentará dar una idea clara del funcionamiento de los *grupos convertidores* o *grupos motor-generador.*

En la descripción, el nombre de grupo motor-generador es más explícito que grupo convertidor, puesto que dicho grupo consta de un motor que va aplicado, mecánica o directamente, a un generador.

Como se vio en el apartado 11.1.2, según sea la energía de partida (c. a. o c. c.), así será el motor, de corriente alterna o continua.

De forma análoga, según se quiera la corriente de salida, el generador será un alternador o una dinamo.

11.2.1 *Funcionamiento*

El motor absorbe energía eléctrica para su funcionamiento, transformándola en energía mecánica de rotación, en su eje; tal energía es transmitida al generador por medio del acoplamiento entre motor y generador; este acoplamiento puede ser mecánico (correas, cadenas, engranajes, etc.) o directo (eje acoplado directamente o el mismo eje). La energía mecánica en el eje se transforma así en la eléctrica deseada.

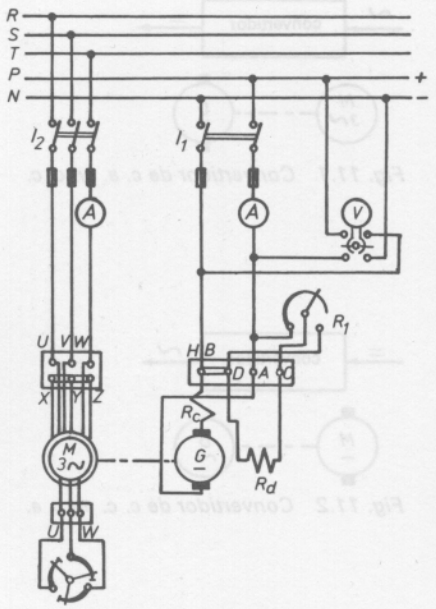


Fig. 11.5 Convertidor de c. a. en c. c., con motor asíncrono y arranque por resistencias rotóricas.

11.2.2 *Motor c. a.-dinamo (c. a./c. c.)*

Para esta clase de convertidores pueden emplearse tanto motores asíncronos como síncronos para arrastrar la dinamo.

No obstante, mientras el motor asíncrono se arranca por medio de alguno de sus métodos (estrella-triángulo, etc.), el motor síncrono necesita un motor de arranque o un transfomador para arranque como motor asíncrono.

Por lo general, cuando se usa un motor síncrono, se utiliza como motor de arranque la propia dinamo, excitándola adecuadamente, alimentándola con una batería de acumuladores, hasta que el motor alcanza su velocidad de sincronismo. En este momento, la dinamo deja de actuar como motor de c. c. y se convierte en generador (fig. 11.4).

11.2.2.1 *Funcionamiento y regulación*

En la figura 11.4 se puede ver que, al cerrar el interruptor I_1, si en las barras de continua existe tensión, G empezará a girar como un motor de continua y, variando el reóstato de campo R_1, se obtendrá mayor o menor par en el eje que une la dinamo G y el motor síncrono M. A su vez, M es alimentado a través de R_2, y en las bornas (U, V, W) se generará tensión alterna, cuya frecuencia dependerá del par producido por G.

La tensión será modificada según la excitación de M (modificando R_2).

Cuando la tensión de red y la frecuencia de ésta coincidan con las producidas por M, se podrá accionar I_2 y, en ese momento, M se convertirá en un motor síncrono y G en una dinamo. A partir de este instante, el grupo convertido funciona para la conversión de c. a./c. c.

Si se quisiera modificar la tensión de salida de la dinamo, bastaría con cambiar la posición de R_1, con lo que se conseguiría regular la corriente de excitación.

En la figura 11.5, se muestra el esquema de un convertidor c. a./c. c., con motor asíncrono y arranque por resistencias rotóricas. El funcionamiento de éste es inverso en su arranque, ya que primero lo hace M, regulando su velocidad mediante las resistencias, y posteriormente se conecta I_1.

Se regula la tensión de salida de la misma forma que en el caso anterior, variando R_1.

11.2.3 *Motor de c. c.-alternador (c. c./c. a.)*

Esta clase de convertidor rara vez se usa en aplicaciones industriales, ya que por lo general es reducida la potencia de que se puede disponer en una batería de acumuladores.

Un esquema básico de esta clase de convertidores es el de la figura 11.6. En el mismo se aprecia que tanto puede convertir c. a. en c. c. como viceversa.

Cuando se conecta para obtener c. a. a partir de c. c., se llama *inversor* (fig. 11.7).

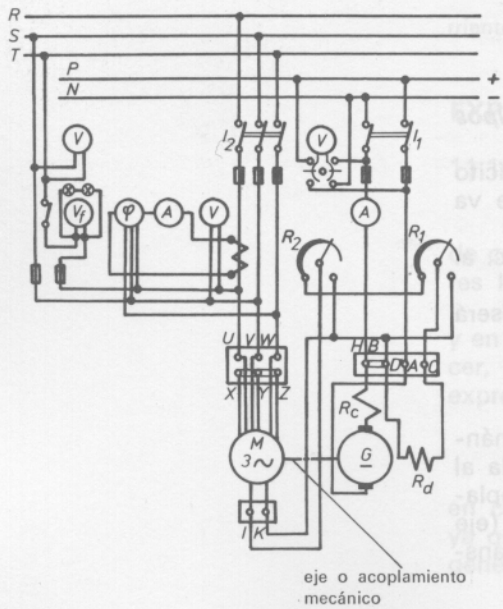


Fig. 11.4 Esquema de un convertidor de c. a. en c. c., con motor síncrono.

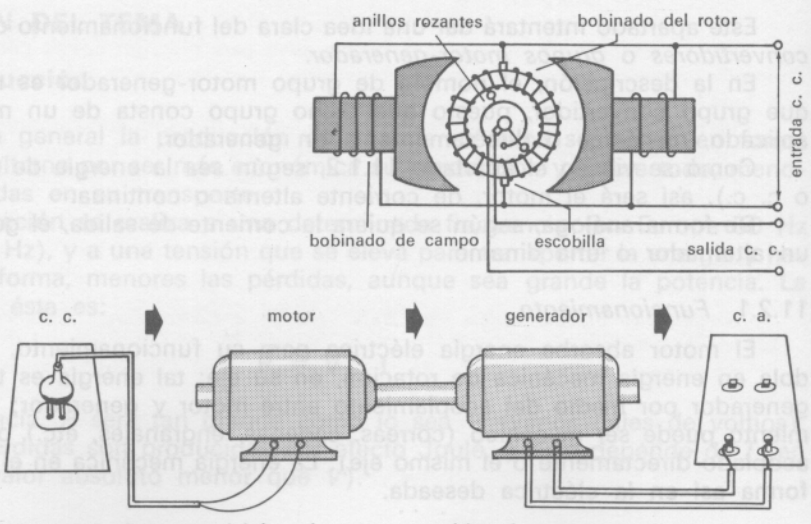


Fig. 11.6 Esquema básico de un convertidor de c. c. en c. a.

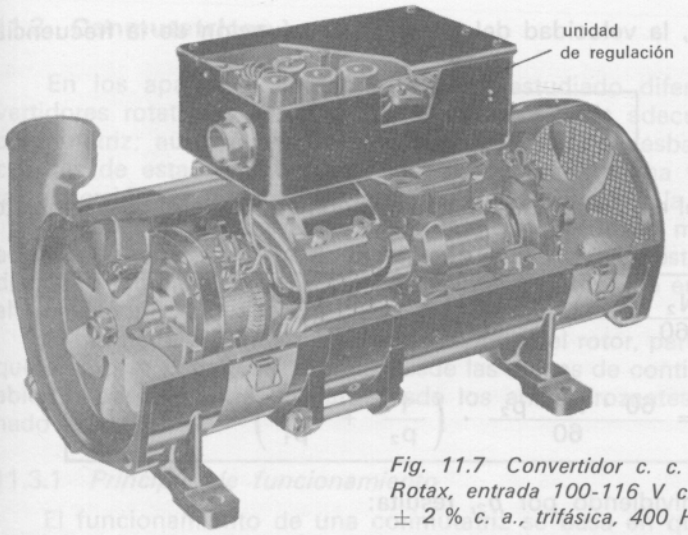


Fig. 11.7 Convertidor c. c. en c. a. Inversor Rotax, entrada 100-116 V c. c., salida 115 V ± 2 % c. a., trifásica, 400 Hz.

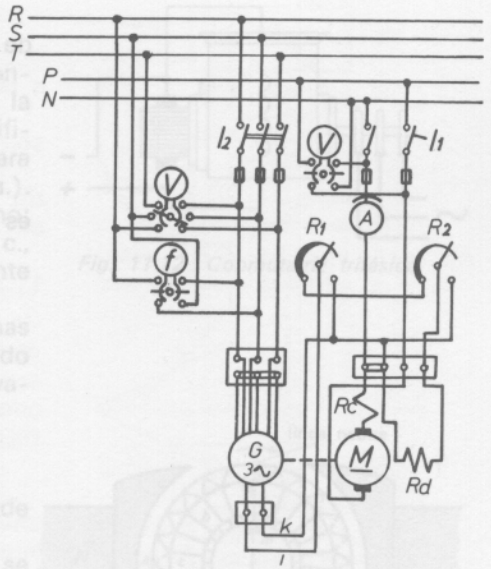


Fig. 11.8 Convertidor de c. c. en c. a.

En la figura 11.8, se puede apreciar un esquema similar al de la figura 11.4, ya que un motor síncrono en el arranque se puede considerar como un alternador.

El arranque viene producido por el motor *M* de c. c., que arrastra al alternador; cuando éste consigue la tensión de frecuencia adecuada, se conecta a I_2; a partir de dicho momento, se dispone de corriente trifásica en las barras de alterna.

11.2.4 *Convertidor de frecuencias*

Los grupos convertidores se suelen utilizar también para la conversión de una corriente trifásica en monofásica o trifásica de otra frecuencia.

Es usual encontrar convertidores rotativos para transformar c. a. de 50 Hz a 60 Hz, 100 Hz, o a 400 Hz (fig. 11.9).

Para esta clase de convertidores se suelen utilizar motores asíncronos sincronizados, ya que ni los síncronos ni los asíncronos son óptimos para su uso; los primeros, por no poder arrancar con carga y, además, por perder su velocidad de sincronismo si se le conecta aquélla de una forma brusca; los segundos, porque no mantienen de una forma uniforme la velocidad de giro, siendo ésta dependiente del deslizamiento.

Según sea la frecuencia de entrada y de salida, así será la transmisión mecánica que une ambas máquinas, puesto que esta unión puede ser al mismo eje (eje común) o con una reducción adecuada.

Recuérdese que la frecuencia generada será:

$$f_2 = \frac{p_2 \cdot (N_2 + N_1)}{60}$$

siendo:

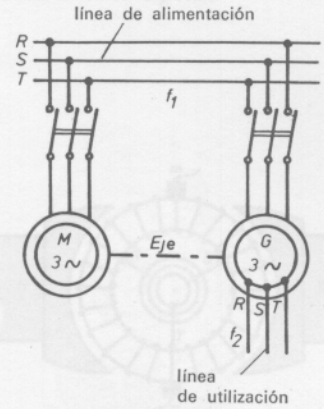
f_2 = la frecuencia de c. a. deseada;
p_2 = el número de pares de polos del generador;
$(N_2 + N_1)$ = el número de revoluciones por minuto con que el campo inductor corta al inducido.

Además, las revoluciones de un motor asíncrono sincronizado cuando ha alcanzado la velocidad de sincronismo, es:

$$N_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p_1}$$

donde:

f_1 = la frecuencia que se quiere modificar;
p_1 = el número de pares de polos del motor;
N_1 = número de revoluciones.



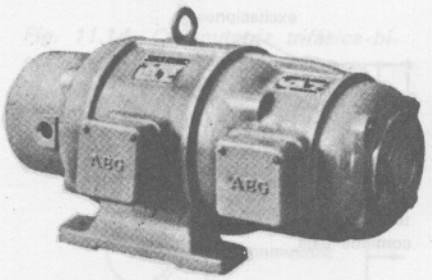


Fig. 11.9 Convertidor de frecuencia: A, esquema de conexión; B, convertidor de 100 a 400 Hz.

De análoga forma, la velocidad del generador en función de la frecuencia de red será:

$$N_2 = \frac{60 \cdot f_1}{p_2}$$

Suponiendo que el eje es común a ambas máquinas, y que el deslizamiento es nulo, se obtiene:

$$f_2 = \frac{p_2 \cdot (N_2 + N_1)}{60} = \frac{p_2}{60} \cdot \left(\frac{60 \cdot f_1}{p_2} + \frac{60 \cdot f_1}{p_1} \right)$$

$$= \frac{60 \cdot f_1 \cdot p_2}{60} \cdot \left(\frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_1} \right)$$

Multiplicando y dividiendo por p_2, resulta:

$$f_2 = f_1 \cdot \left(1 + \frac{p_2}{p_1} \right)$$

La potencia entregada por este grupo convertidor es aportada por el motor y el generador en proporción inversa al número de pares de polos de cada uno:

$$\frac{P_M}{P_G} = \frac{p_2}{p_1}$$

siendo:

P_M = la potencia motor;
P_G = la del generador.

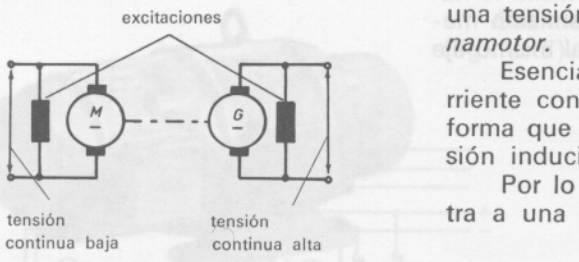
Si se utiliza un motor asíncrono, es necesario que tenga colector de velocidad regulable, con el fin de que se puedan compensar las oscilaciones de la red que se quiere modificar.

11.2.5 *El dinamotor*

También se emplean grupos convertidores para la elevación de c. c. de una tensión a otra mayor; a esta máquina se le conoce con el nombre de *dinamotor.*

Esencialmente, esta clase de convertidores suelen ser un motor de corriente continua y una dinamo que se montan sobre la misma armadura, de forma que el generador de c. c. disponga de más devanados para que la tensión inducida en ellos sea mayor (fig. 11.10).

Por lo general, el motor de c. c. suele ser un motor derivación que arrastra a una dinamo shunt acoplada sobre el primero (fig. 11.11).



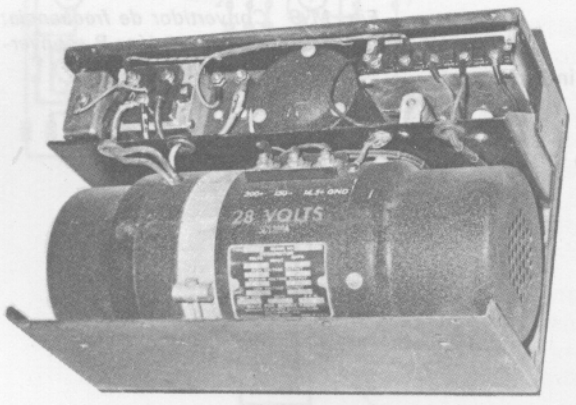


Fig. 11.11 Dinamotor (convertidor rotativo de c. c. a c. c.).

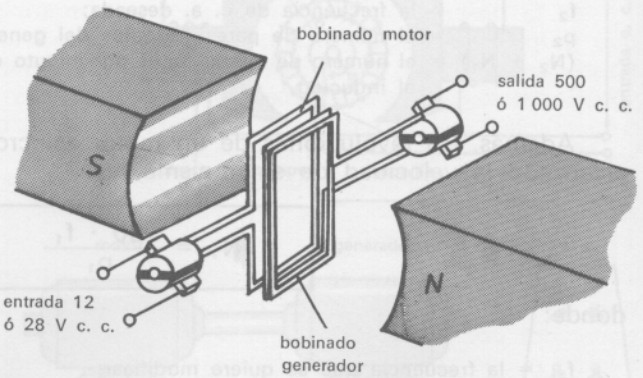


Fig. 11.10 Principio básico del funcionamiento de un dinamotor.

11.3 Conmutatrices

En los apartados anteriores se han estudiado diferentes clases de convertidores rotativos; pero sin duda alguna el más adecuado y utilizado es la conmutatriz; aunque en la actualidad está siendo desbancada por los rectificadores de estado sólido, esta máquina rotativa se ha venido utilizando para la conversión de una clase de corriente (c. a. o c. c.) en la contraria (c. c. o c. a.).

El aspecto externo de tener su inducido no difiere mucho de una dinamo; además de tener su inducido conectado a las delgas y éstas a los polos de c. c., disponen también de unos anillos rozantes por los que entra o sale la corriente alterna, según su utilización (fig. 11.12).

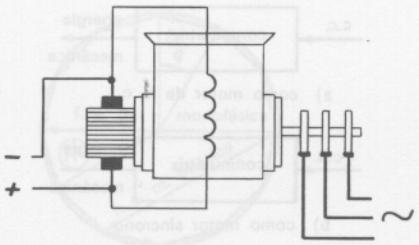


Fig. 11.12 Conmutatriz trifásica.

El inducido de estas máquinas constituye el rotor, parte móvil de las mismas que, como se podrá ver mirando desde las delgas de continua, será un devanado abierto; por el contrario, visto desde los anillos rozantes, constituye un devanado cerrado.

11.3.1 *Principio de funcionamiento*

El funcionamiento de una conmutatriz se basa en que, en el bobinado de una máquina de c. c., se inducen corrientes alternas.

Haciendo tomas adecuadas y conectándolas a unos anillos rozantes, se podrán obtener fuerzas electromotrices alternas.

A fin de justificar esta aseveración, piénsese en un devanado en anillo situado en el interior de un campo magnético (fig. 11.13). Si se toman dos puntos cualesquiera, *R* y *S*, éstos se encontrarán a una diferencia de potencial igual a la suma algebraica de las tensiones inducidas en cada espira.

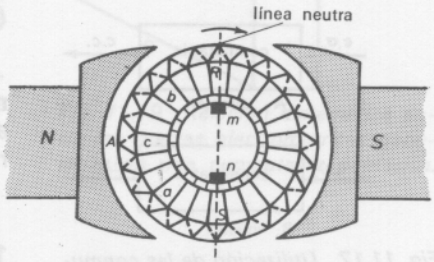


Fig. 11.13 Esquema de una conmutatriz bifásica-bipolar.

Si el movimiento de dicho devanado es circular, de una pulsación ω, la tensión o fuerza electromotriz inducida en cada espira, será senoidal y de expresión:

$$e = E_0 \cdot \text{sen } (\omega t + \Phi)$$

Por tanto, entre *R* y *S* aparecerá también una fuerza electromotriz senoidal. El máximo de ésta será cuando el punto medio del devanado entre *R* y *S*, *A*, pase por el centro del polo *N* (posición de la figura), siendo nula la tensión cuando *A* pasa por la línea neutra, y máximo en sentido contrario cuando se enfrenta al centro de *S*.

Como puede verse, para una máquina bipolar, cada revolución completa es un ciclo de la señal alterna.

Si se desea disponer de un sistema trifásico de fuerzas electromotrices, bastará que se divida el devanado en tres partes iguales, por ejemplo los puntos *R*, *S*, *T* (fig. 11.14), correspondiendo cada parte a 120° de devanado. Los máximos de tensión se producirán cuando el punto medio de cada una de estas partes *RS*, *ST*, *TS*, coincida con los ejes de los polos; y se tendrán nulos cuando estos puntos medios pasen por la línea neutra.

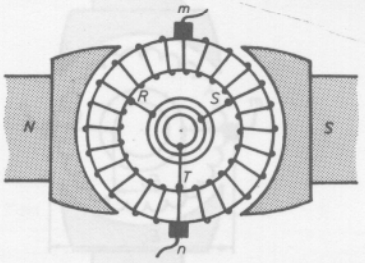


Fig. 11.14 Conmutatriz trifásica-bipolar, esquema básico.

11.3.2 *Utilización de las conmutatrices*

Las conmutatrices son los convertidores más adaptables, puesto que pueden usarse para múltiples aplicaciones, reunidas generalmente en tres grupos:

— Generadores.
— Motores.
— Convertidores.

Y cada una de estas formas de aplicación se puede, a su vez, subdividir según alimentación o accionamiento.

11.3.2.1 *Conmutatrices como generadores*

Cuando la conmutatriz es arrastrada por un motor auxiliar, puede proporcionar corriente continua en el colector de delgas, en consecuencia, es como si actuase de dinamo (fig. 11.15A).

Análogamente, podrá obtenerse corriente alterna, en los anillos rozantes, cuando sea accionada por un motor cualquiera; en este caso, funcionará como alternador (fig. 11.15B).

Estas dos clases de corrientes se pueden obtener simultáneamente, cuando sea accionada por un motor auxiliar; recibe entonces el nombre de generador poliformo (fig. 11.15C).

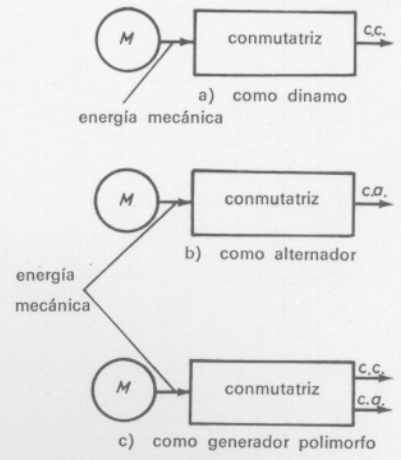


Fig. 11.15 Utilización de las conmutatrices como generadores.

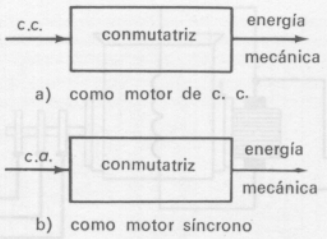


Fig. 11.16 Utilización de las conmutatrices como motores.

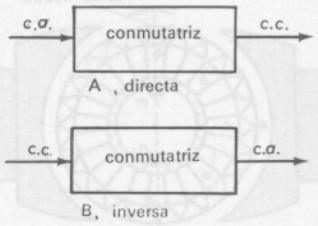


Fig. 11.17 Utilización de las conmutatrices como convertidores.

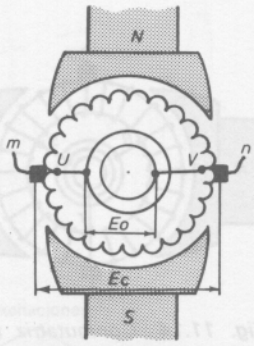


Fig. 11.18 Relación de tensiones en una conmutatriz monofásica-bipolar.

11.3.2.2 *Conmutatrices como motores*

Si se invierte el proceso, se podrá ver que, al aplicar corrientes adecuadas a las delgas o a los anillos, el eje de la conmutatriz comenzará a girar.

Cuando se aplica corriente continua a las delgas, actúa como motor de corriente continua (fig. 11.16A), transformando esta energía en mecánica.

Cuando, por el contrario, se aplica c. a. a los anillos rozantes, la conmutatfiz actúa como un motor síncrono, convirtiendo la energía eléctrica aplicada en mecánica (fig. 11.16B).

11.3.2.3 *Conmutatrices como convertidores*

La forma fundamental de utilización de una conmutatriz es en *conexión directa,* es decir, actuando como convertidor de corriente alterna en continua.

Si se aplica corriente alterna a los anillos rozantes, por acción de ésta la conmutatriz girará, obteniéndose corriente continua en el colector de delgas (fig. 11.17A).

En la práctica, es ésta la forma de utilización más usual, casi la única.

Por último, si se aplica corriente continua al colector de delgas, la conmutatriz empezará a girar y en los anillos rozantes se podrá obtener corriente alterna; a esta forma de utilización se le denomina *conmutatriz inversa* (figura 11.17B).

11.4 Tensiones de una conmutatriz

Como se ha dicho, la utilización más común de una conmutatriz es la conversión de corriente alterna en continua; por tanto, es importante conocer cuál es la relación que liga las tensiones de ambas.

Se observará que esta relación de tensiones depende del número de fases que se tomen en el inducido.

— Monofásicas (2 tomas).
— Trifásicas (3 tomas)
— Tetrafásicas (4 tomas).
— Hexafásicas (6 tomas).

A continuación, se expondrá el estudio de las tensiones de una conmutatriz monofásica y se generalizará para una polifásica.

11.4.1 *Relación de tensiones en una conmutatriz monofásica*

Considérese una conmutatriz bipolar monofásica (fig. 11.18).

Al alimentar la conmutatriz con una tensión alterna, de valor máximo E_o, se obtendrá una tensión E_c en las delgas.

Si se efectúa el razonamiento de forma inversa, se verá que cuando las escobillas del colector de delgas *A* y *B* coincidan con los puntos de toma de corriente alterna, ambos valores serán iguales, ya que la máxima tensión alterna se consigue cuando la espira media pasa por la línea media de los polos (posición de la figura).

En consecuencia:

$$E_c = E_o$$

como las tensiones alternas se suelen expresar por su valor eficaz, y éste está relacionado con el máximo, según la expresión

$$E = \frac{E_c}{\sqrt{2}}$$

por consiguiente, sustituyendo,

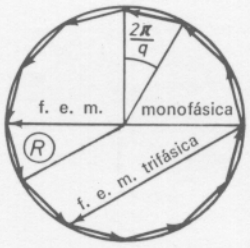
$$\boxed{E_c = \sqrt{2} \cdot E = 1{,}41\ E}$$

Ejemplo de aplicación

¿Cuál será el valor de la tensión alterna monofásica con que se alimentará una conmutatriz, para obtener una tensión de 100 V?

$$E_c = 100 \text{ V}$$

$$E = \frac{E_c}{1{,}41} = \frac{100}{1{,}41} = 70{,}7 \text{ V}$$



11.4.2 *Relación de tensiones en una conmutatriz polifásica*

En el apartado anterior se ha visto que el valor máximo de la tensión alterna coincide con el valor de la tensión continua.

Además, es sabido que la suma vectorial de las tensiones inducidas sobre medio devanado tienen que ser igual a la tensión continua; en consecuencia, se podrá aplicar un método matemático para conocer la relación que liga las tensiones alterna y continua.

En una conmutatriz con tomas de tensión (en la figura, tomamos 12), equidistantes cada dos consecutivas, habrá una diferencia de potencial que puede llamarse E_o (fig. 11.19).

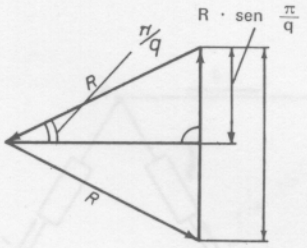


Fig. 11.19 Relación matemática entre las fuerzas electromotrices generadas en una conmutatriz polifásica.

Llamando E_c a la tensión continua, se tendrá:

$$E_c = 2 \cdot R$$

Por tanto, como E_o vale

$$E_o = 2 \cdot R \cdot \text{sen } \frac{\pi}{q} = E_c \cdot \text{sen } \frac{\pi}{q} \quad (\pi \text{ rad} \gtrless 180^o)$$

su valor en función de la tensión eficaz será:

$$\boxed{E = \frac{E_o}{\sqrt{2}} = \frac{E_c}{\sqrt{2}} \cdot \text{sen } \frac{\pi}{q}}$$

Por ello, sea cual sea el número de fases de una conmutatriz, se verifica la expresión anterior.

Se define como *relación de transformación* el cociente entre la tensión eficaz y la tensión continua.

$$\boxed{m_t = \frac{E}{E_c} = \frac{\text{sen } \frac{\pi}{q}}{\sqrt{2}}}$$

En la tabla de la figura 11.20 se pueden apreciar algunos de los valores más usuales.

Tipo	q	$\frac{\pi}{q}$ (°)	sen $\frac{\pi}{q}$	m_t
monofásica	1	180	1	0,70710
trifásica	3	60	0,8660	0,61237
tetrafásica	4	45	0,7071	0,5000
hexafásica	6	30	0,5	0,35355

Fig. 11.20 Relación de las tensiones en una conmutatriz.

11.5 Intensidad de una conmutatriz

El inducido de una conmutatriz es recorrido por una corriente eléctrica, cuya forma dependerá de la utilización que se le dé a la máquina.

Cuando funciona como motor de c. c. o dinamo, la corriente que recorre el devanado es en impulsos, debido a la conmutación de las delgas, ya que la corriente mantiene su valor durante el tiempo de contacto de una delga con la escobilla (fig. 11.21A).

De forma análoga, cuando funciona como máquina de c. a., será ésta la forma de corriente que atraviese el devanado (fig. 11.21B), tanto si la misma funciona de alternador como si lo hace tipo motor síncrono.

Cuando la conmutatriz funciona como generador poliformo (apartado 11.3.2.1), se puede suponer que en la espira media (entre dos tomas), se dan simultáneamente los efectos de máquina de continua y de alterna. Por tanto, la corriente total que recorrerá la espira media será la suma de ambas corrientes, o sea, igual que si funcionara como alternador y como dinamo (fig. 11.21C).

En el resto de las espiras la corriente continua será igual pero la alterna estará desplazada un ángulo inicial y, por tanto, la curva resultante será como se muestra en la figura 11.21D.

Por último, en el funcionamiento de la conmutatriz, tanto directa como inversa, la corriente alterna es de sentido contrario, por ser absorbida de la línea y, en consecuencia, se restan ambas corrientes (fig. 11.21E).

Esta figura es válida para la espira media (punto A, fig. 11.13), siendo para el resto de las espiras dependientes del ángulo de fase inicial (fig. 11.21F).

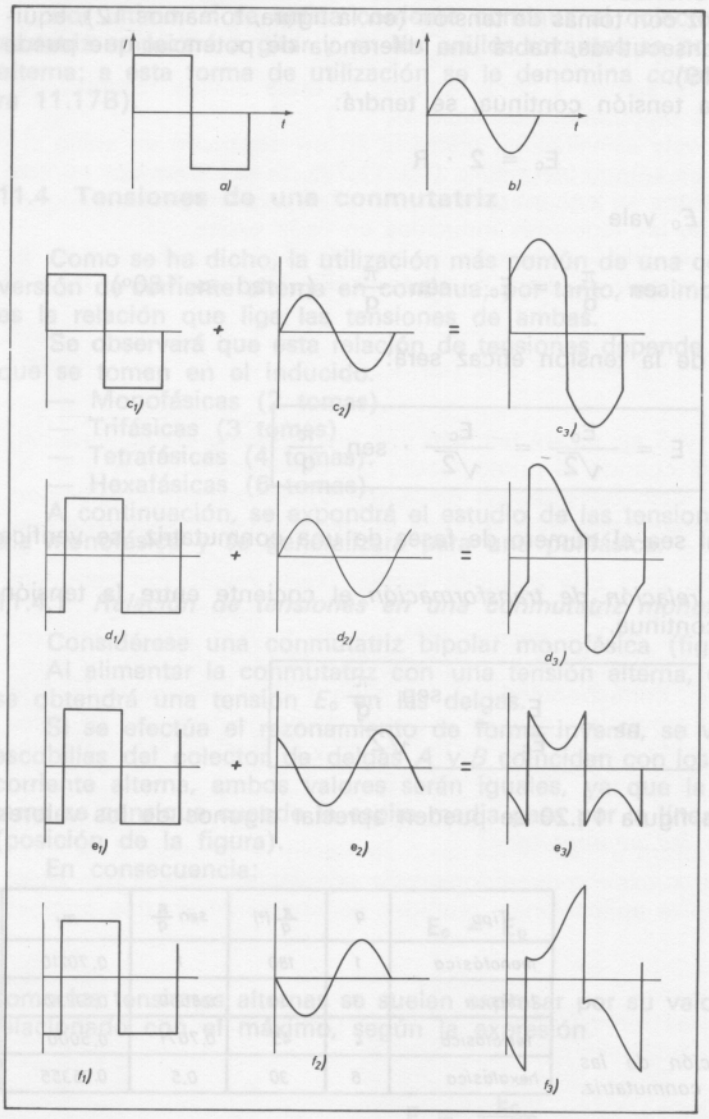


Fig. 11.21 Representación de las corrientes de una conmutatriz.

11.5.1 *Relación de las corrientes de una conmutatriz*

Una vez conocida la forma de las corrientes en una conmutatriz, para conocer la relación entre ambas, bastará igualar las potencias de entrada y salida.

La potencia eléctrica en continua será:

$$P_c = E_c \cdot I_c$$

afectada por el rendimiento η de la máquina, pues es ésta la que se desea utilizar.

$$\eta = \frac{P_c}{P} \qquad P = \frac{E_c \cdot I_c}{\eta}$$

P es la potencia entregada a la conmutatriz y la potencia suministrada en alterna por un sistema polifásico es

$$P = q \cdot E \cdot I \cdot \cos \varphi$$

donde:

q = al número de fase;
E = la tensión eficaz;
I = la corriente eficaz;
cos φ = el factor de potencia.

Igualando, se obtendrá:

$$\frac{E_c \cdot I_c}{\eta} = q \cdot E \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Pero, teniendo en cuenta el valor deducido para *E* en el apartado 11.4.2, se tiene:

$$\frac{E_c \cdot I_c}{\eta} = q \cdot \frac{E_c}{\sqrt{2}} \cdot \operatorname{sen} \frac{\pi}{q} \cdot I \cdot \cos E$$

donde, dividiendo por E_c y agrupando, resulta:

$$I = \frac{I_c \cdot \sqrt{2}}{q \cdot \operatorname{sen} \frac{\pi}{q} \cdot \cos \varphi \cdot \eta}$$

Y teniendo presente que la corriente de línea en un sistema polifásico vale (fig. 11.22):

$$I_1 = 2 \cdot I \cdot \operatorname{sen} \frac{\pi}{q}$$

Sustituyendo, se obtendrá:

$$I_1 = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_c}{q \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = 2{,}8284 \cdot \frac{I_c}{q \cdot \cos \varphi \cdot \eta}$$

Se define como relación de corrientes la expresión:

$$m_i = \frac{I_1}{I_c} = \frac{2{,}8284}{q} \cdot \frac{1}{\cos \varphi \cdot \eta} = K_i \cdot \frac{1}{\cos \varphi \cdot \eta}$$

En la tabla de la figura 11.23 se pueden ver los valores que toma esta relación para los diferentes sistemas polifásicos.

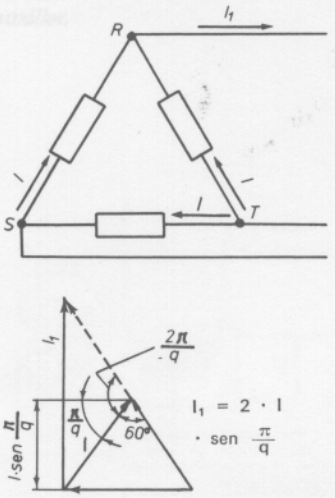


Fig. 11.22 Relación entre las corrientes de un sistema trifásico y su corriente de línea correspondiente.

Tipo	q	$k_i = \frac{2\sqrt{2}}{q}$	m_i
monofásica	1	2,8284	$2{,}8284/\cos\varphi \cdot \eta$
trifásica	3	0,9428	$0{,}9428/\cos\varphi \cdot \eta$
tetrafásica	4	0,7071	$0{,}7071/\cos\varphi \cdot \eta$
hexafásica	6	0,4714	$0{,}4714/\cos\varphi \cdot \eta$

Fig. 11.23 Relación de las corrientes en una conmutatriz.

11.6 Arranque de una conmutatriz

En este apartado se verán los métodos de arranque de una conmutatriz, utilizándola como *convertidor directo.*

Las diferentes formas para el arranque de una conmutatriz se sintetizan en dos:

— Por medios propios.
— Por medios auxiliares.

Ambos son difíciles, debido a las regulaciones de velocidad hasta alcanzar el sincronismo y posteriormente la conmutación de tensiones.

11.6.1 *Arranque de una conmutatriz por medios propios*

La conmutatriz no dispone más que de dos sistemas propios para poder efectuar el arranque: los devanados de alterna por una parte y los de continua por otra.

11.6.1.1 *Arranque como motor shunt*

Si se puede disponer de tensión continua independiente en el momento de arranque, al suministrársela al devanado de continua, la conmutatriz arrancará como un motor shunt y, regulando su velocidad mediante un reóstato de arranque R, se podrá lograr la velocidad síncrona, pudiéndose desconectar I_1 y conectar los anillos rozantes a la red, con las mismas precauciones que en el acoplamiento de los alternadores (fig. 11.24).

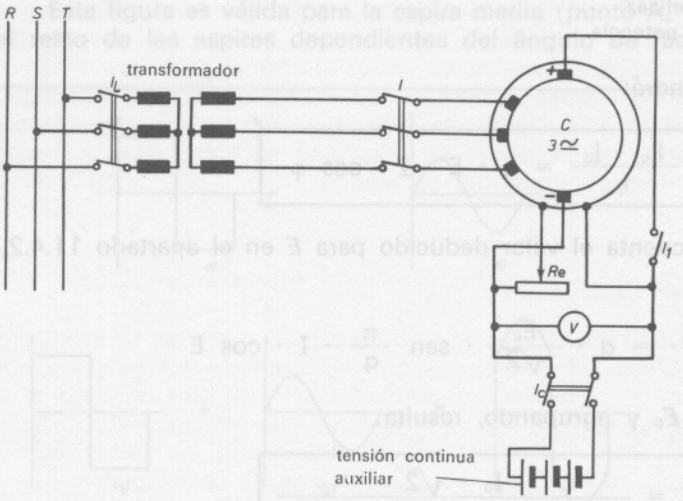


Fig. 11.24 Arranque de una conmutatriz como motor shunt.

11.6.1.2 *Arranque como motor asíncrono*

Cuando no se dispone de una tensión continua para el arranque y tan solo se dispone de alterna, se puede arrancar la conmutatriz como un motor asíncrono. En este caso, es preciso dejar la excitación en circuito abierto y, por tanto, al aplicarle tensión al estator se crea un campo giratorio, que induce en los polos de la máquina unas corrientes que originan el arranque del rotor. Regulando la tensión suministrada al motor, para el arranque por medio de autotransformadores y resistencias, se obtendrá una velocidad muy próxima a la síncrona, alcanzándose ésta, al cerrar el inductor (excitación).

El proceso de suministrar corriente a las barras de continua es muy delicado puesto que, si la velocidad no es la síncrona, la tensión suministrada en las delgas es alterna de una frecuencia muy baja. Por esta razón hay instrumentos para medir la tensión de excitación (fig. 11.25); cuando la tensión sea la adecuada, se podrá conectar a las barras.

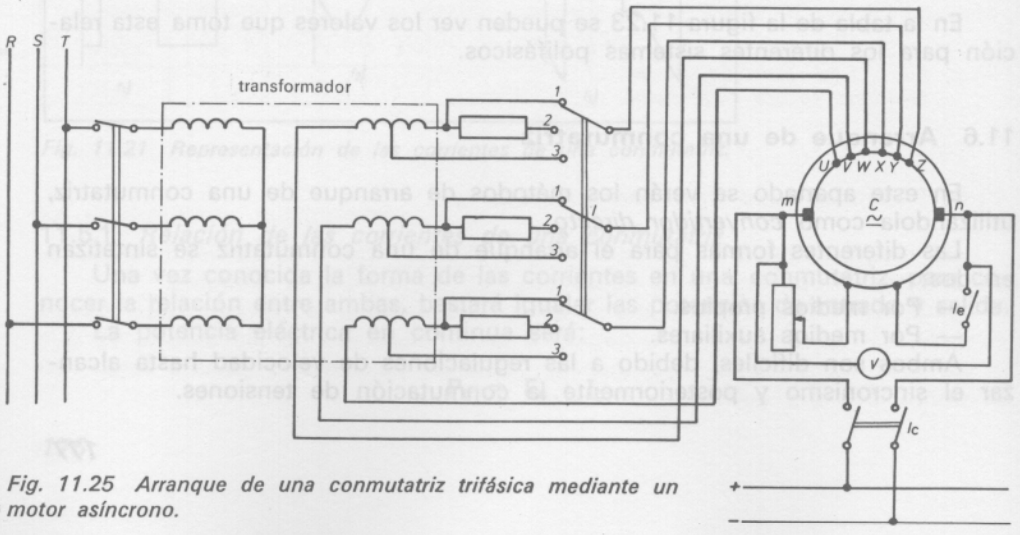


Fig. 11.25 Arranque de una conmutatriz trifásica mediante un motor asíncrono.

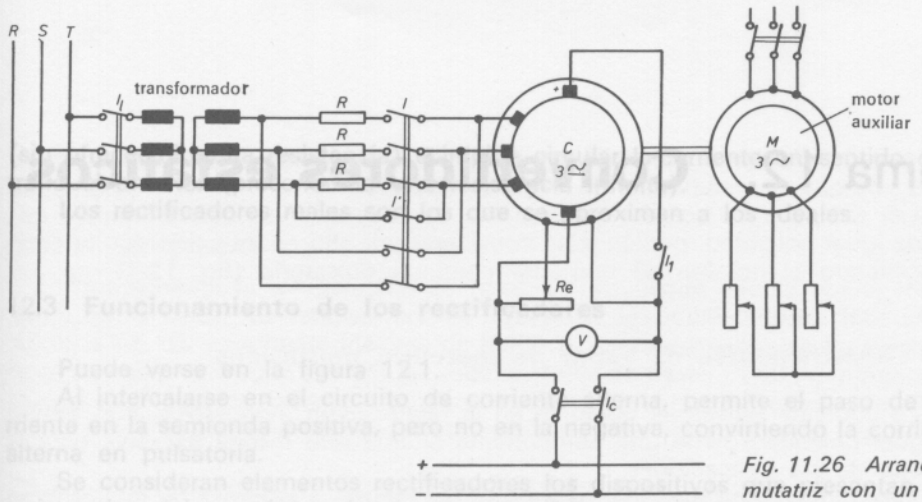


Fig. 11.26 Arranque de una conmutatriz con un motor auxiliar.

11.6.2 *Arranque de una conmutatriz por medios auxiliares*

Los medios auxiliares para el arranque de una conmutatriz son cualquier clase de motor: síncronos, asíncronos, asíncronos sincronizados y motores de c. c. que se encuentran solidarios con el eje de la conmutatriz.

El método de arranque con estos medios es común a todos ellos.

En primer lugar, se arranca el motor auxiliar, que arrastra a la conmutatriz; una vez que se ha alcanzado la velocidad síncrona, se conecta la línea de alterna a los anillos rozantes y, posteriormente, las delgas *m*, *n* a las barras (fig. 11.26).

Así, pues, tan solo es necesario regular los arranques de los motores por un medio auxiliar.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Realícense, en el laboratorio de máquinas, las conversiones posibles con grupos convertidores y conmutatrices, desarrollando un trabajo monográfico sobre estos procesos.

— Búsquense catálogos de estos convertidores y estúdiense sus usos industriales más usuales.

CUESTIONARIO

11.1 ¿Cuál es la razón fundamental para el uso de los convertidores?

11.2 ¿Cuál será la corriente que circula por una línea de alta tensión, si la tensión de servicio es 15 000 V y la potencia de servicio son 30 kVA?

11.3 ¿Cuál será la potencia necesaria suministrable a un convertidor si el rendimiento de motor y generador es respectivamente 0,6 y 0,7, sabiendo que la potencia deseada es de 10 kW?

11.4 Del problema anterior, dedúzcase uno de los inconvenientes de los convertidores.

11.5 ¿Qué es un grupo convertidor?

11.6 ¿Cuál es la forma de energía que ataca al generador en los grupos motor-generador?

11.7 ¿Cómo se puede regular la tensión de salida de un grupo c. a./c. c.?

11.8 En el arranque de un grupo convertidor c. a./c. c. cuyo motor es síncrono, ¿cómo se produce el arranque?

11.9 ¿Cómo se llama el convertidor que pasa de c. a. a c. c.?

11.10 ¿Qué es un convertidor de frecuencia? ¿En qué se basa?

11.11 ¿Podría conseguirse la conversión de frecuencia si el motor y el generador disponen del mismo número de pares de polos?

11.12 Si se conocen las frecuencias de un convertidor de entrada y salida, 50 Hz y 125 Hz respectivamente, ¿cuál será el número de pares de polos del generador, si en el motor son 2?

11.13 Calcular la relación de pares de polos para un convertidor de frecuencia rotativo de 50 a 60 Hz, y para la conversión contraria.

11.14 ¿Qué es un dinamotor?

11.15 ¿Para qué se emplea una conmutatriz directa?

11.16 ¿Cuáles son los métodos de utilización de una conmutatriz?

11.17 Calcular cuál será la tensión que se debe suministrar a una conmutatriz trifásica si se desea una tensión continua de 359 V.

11.18 Si el rendimiento de la conmutatriz de la pregunta anterior es 0,8 y el factor de potencia es 1, calcular cuál será la corriente absorbida por línea, si conectamos una resistencia de 179,5 Ω en la salida de la conmutatriz.

11.19 ¿Cuáles son los sistemas de arranque de una conmutatriz?

BIBLIOGRAFIA

KÖNIGSLÖW, *Escuela del técnico electricista,* tomo V, Editorial Labor, S. A., Madrid 1968.

HERING P., *Escuela del técnico electricista,* tomo X, Editorial Labor, S. A., Madrid 1968,

RAPP J., *Tratado práctico de Electrotecnia,* tomo II, Editorial Vagma, Bilbao 1973.

Máquinas de corriente alterna; Transformadores, convertidores, Enciclopedia CEAC de Electricidad, Ediciones CEAC, S. A., Barcelona 1973.

Tema 12. **Convertidores estáticos**

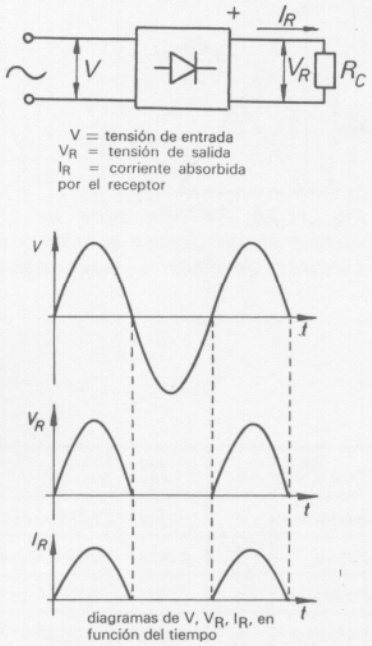


Fig. 12.1 Funcionamiento del rectificador en un circuito con carga óhmica.

OBJETIVOS

— *Adquirir los conocimientos suficientes para distinguir entre los diversos tipos de rectificadores.*
— *Entender el funcionamiento de los circuitos de rectificación.*
— *Conocer los materiales que constituyen los convertidores estáticos.*

GUION

— Rectificadores de vapor de mercurio.
— Ignitrón.
— Tiristor.
— Diodos semiconductores.
— Rectificadores de óxido de cobre y selenio.
— Puentes rectificadores.
— Onduladores.

PUNTOS CLAVE

— Conocer los métodos empleados actualmente para la producción de corriente continua.
— Diferenciar los distintos dispositivos utilizados en sistemas de rectificación, su funcionamiento y características.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— No se precisa de conocimientos previos.

EXPOSICION DEL TEMA

12.1 Introducción

La producción y el transporte de energía eléctrica resulta más rentable si se realiza con corriente alterna que con corriente continua; por ello, la distribución se hace en forma de corriente alterna. Pero como existen algunas instalaciones que deben funcionar con corriente continua, como tracción ferroviaria, industria electroquímica, soldadura eléctrica, etc., se hace necesaria la conversión de corriente alterna en continua.

Este trabajo lo realizan, entre otros convertidores, los llamados estáticos, que por su mayor rendimiento, menor volumen y mayor gama de posibilidades en el funcionamiento, han desplazado a los convertidores rotativos.

En la actualidad son los semiconductores los que se han impuesto a los sistemas tradicionales de rectificación. Por su avanzada tecnología y elevado rendimiento se colocan a la cabeza de todos los demás dispositivos.

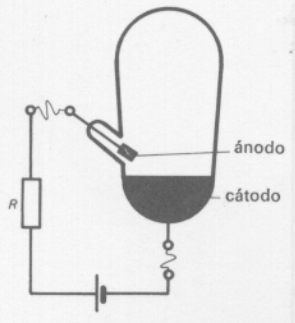


Fig. 12.2 Conexión de un rectificador de mercurio.

12.2 Conceptos generales sobre rectificadores

Se denomina *rectificador* todo aparato o dispositivo capaz de convertir corriente alterna en corriente continua.

Un rectificador ideal es el que permite el paso de corriente en un sentido

(sin ofrecer ninguna resistencia) e impide circular la corriente en sentido contrario al anterior (presentando una resistencia infinita).

Los rectificadores reales son los que se aproximan a los ideales.

12.3 Funcionamiento de los rectificadores

Puede verse en la figura 12.1.

Al intercalarse en el circuito de corriente alterna, permite el paso de corriente en la semionda positiva, pero no en la negativa, convirtiendo la corriente alterna en pulsatoria.

Se consideran elementos rectificadores los dispositivos que presentan una resistencia mínima a la corriente en un sentido, y muy elevada en el sentido opuesto. Ejemplo de dispositivos que funcionan según este requisito son las válvulas de vapor mercurio, placas de selenio, de silicio, de germanio, de óxido de cobre, ignitrón, tiratrón, tiristor.

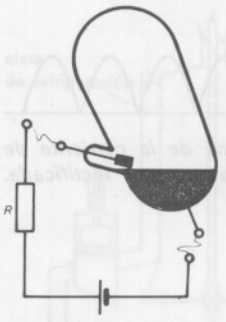


Fig. 12.3 Cebado.

12.4 Rectificadores de vapor de mercurio

Están constituidos por una ampolla de vidrio que contiene un ánodo de grafito y un cátodo de mercurio líquido.

Si ánodo y cátodo se conectan a través de un circuito, como el de la figura 12.2, y a continuación se inclina la ampolla hasta que el mercurio toque el ánodo, se cerrará el circuito (fig. 12.3).

Poniendo nuevamente la ampolla en la posición inicial se observa que el amperímetro detecta el paso de corriente. Quiere esto decir que se ha producido un cebado y el circuito se mantiene cerrado (fig. 12.4).

Este fenómeno va acompañado de un desprendimiento de luz azulada y la aparición de una mancha muy brillante (mancha catódica) que se mueve desordenadamente sobre el mercurio líquido; al mismo tiempo se produce una elevación de la temperatura, que da lugar a una evaporación de mercurio, el cual se condensa en las paredes de la ampolla volviendo de nuevo al cátodo.

El cebado se mantiene gracias al llamado campo eléctrico creado por los iones positivos, que se hallan próximos a la mancha catódica; se desceba sólo cuando se abre el circuito; por ejemplo, mediante un interruptor.

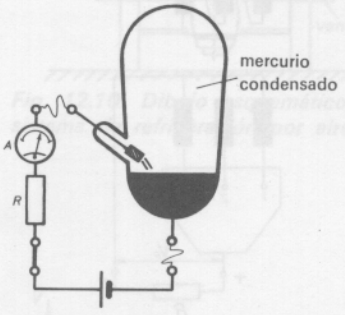


Fig. 12.4 Posición vertical de funcionamiento.

12.4.1 *Anodo de encendido*

Puede comprobarse fácilmente la dificultad práctica que el movimiento de la ampolla entraña cada vez que se desee poner en funcionamiento el circuito.

Esta dificultad se resolvió introduciendo un nuevo elemento: el ánodo de encendido, consistente en un electrodo auxiliar que está en contacto con el mercurio y que, al ser levantado, provoca el arco eléctrico suficiente para el cebado (fig. 12.5).

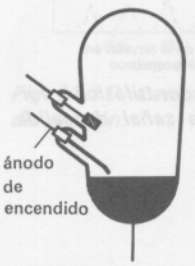


Fig. 12.5 Rectificador de vapor de mercurio con dispositivo de cebado.

12.5 Rectificador monofásico de vapor de mercurio

Añadiendo un nuevo ánodo principal a la ampolla de vidrio y conectando este conjunto, como aparece en la figura 12.6, se podrá rectificar la corriente alterna del transformador.

En los bornes de salida del secundario del transformador se tendrán polaridades opuestas, que variarán de acuerdo con la frecuencia. Por tanto, los ánodos principales tendrán polaridades contrarias en todo momento por estar conectados a estos bornes de salida.

Cuando se cierre el interruptor de cebado, se producirá el encendido, y el ánodo que en ese momento tenga polaridad positiva, por ejemplo A_1, conducirá a través del arco.

Al cambiar la polaridad en los bornes de salida del transformador, y como consecuencia en los ánodos, dejará de conducir el que lo hacía en el semiperíodo anterior A_1, cebándose el otro ánodo A_2.

Para mantener el cebado sin que tenga que actuar de nuevo el ánodo auxiliar, se conecta en el circuito una bobina que mantendrá la intensidad unos instantes, aun habiendo desaparecido la tensión; instantes suficientes para que

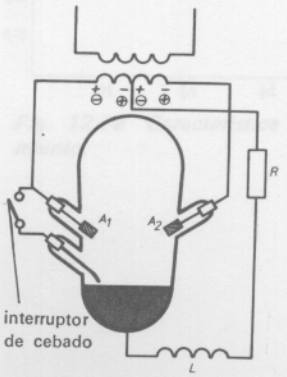


Fig. 12.6 Rectificador monofásico.

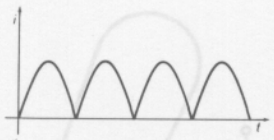


Fig. 12.7 *Forma de la corriente de salida una vez rectificada.*

el ánodo A_2 alcance el potencial positivo suficiente como para comenzar a conducir, sin que el rectificador se haya descebado.

Las senoides de corriente alterna del transformador se convertirán en ondas de igual polaridad, pudiéndolas considerar por ello como corriente continua y recibiendo el nombre de corriente continua pulsatoria (fig. 12.7).

12.6 Rectificadores de vapor de mercurio polifásicos

La corriente pulsatoria obtenida en la rectificación monofásica, aun siendo de igual polaridad, tiene una componente alterna que resulta excesiva para la mayoría de las aplicaciones.

Para reducir esta excesiva ondulación se recurre a sistemas de rectificación polifásicos, siendo los más utilizados los trifásicos y hexafásicos.

12.6.1 *Rectificador de vapor de mercurio trifásico*

Consta de una ampolla con tres ánodos, alimentados por el secundario de un transformador conectado en triángulo-estrella; cada ánodo conducirá mientras su tensión sea positiva y de valor superior a la de los otros dos, puesto que el campo eléctrico respecto al cátodo será el de valor más elevado.

La conmutación entre ánodos se produce automáticamente cuando éstos van alcanzando valores superiores a los que tenía el ánodo conductor.

En la figura 12.8, se aprecia el circuito de conexión y la señal de salida obtenida.

12.6.2 *Rectificador de vapor de mercurio hexafásico*

Es el más empleado en la práctica y está formado por una ampolla provista de seis ánodos. La alimentación de los ánodos se hace por el secundario del transformador en conexión triángulo-estrella hexafásica.

La conmutación se produce de igual modo que en el caso de rectificador trifásico.

En la figura 12.9, se ven el circuito de conexión y la señal resultante.

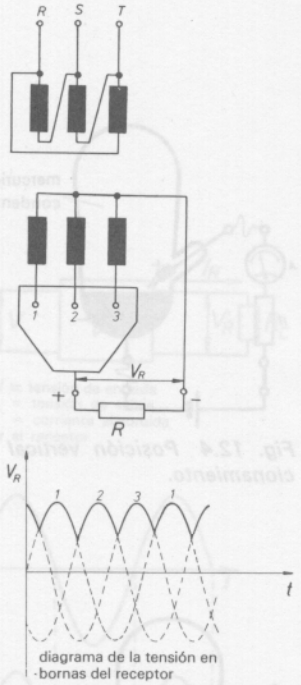


Fig. 12.8 *Rectificador trifásico y forma de la señal de salida.*

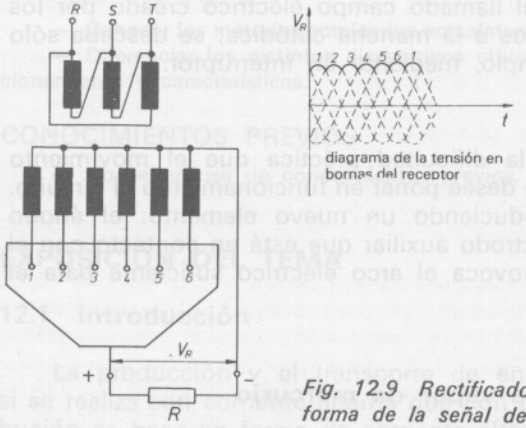


Fig. 12.9 *Rectificador hexafásico y forma de la señal de salida.*

12.7 Consideraciones generales

En los equipos de rectificación de vapor de mercurio se dan unas características muy de tener en cuenta para el correcto funcionamiento y mantenimiento.

12.7.1 *Mantenimiento del vacío*

El rectificador de ampolla de vidrio pierde su vacío al cabo de un número determinado de horas, que suele estar comprendido entre las 50 000 y las 100 000; y como, además, para corrientes elevadas habría que dar a las ampollas unas dimensiones enormes, ha sido sustituido por recipientes metálicos. El recipiente metálico dispone de doble pared para facilitar la refrigeración, un número de ánodos que oscila entre tres y veinticuatro, y un ánodo de encendido. Como resulta prácticamente imposible conseguir la hermeticidad total del recipiente

metálico en los grandes rectificadores, se instalan bombas de vacío para conseguirlo.

12.7.2 *Refrigeración*

Normalmente la refrigeración se hace por agua que circula por el interior de la doble pared. La temperatura de trabajo de los rectificadores debe ser de 45 °C a 55 °C, y corriente máxima de 8 000 A. Modernamente, se ha sustituido la refrigeración de agua por aire en rectificadores de hasta 1 500 A; refrigeración que se consigue mediante un soplado de aire frío que proporciona un ventilador y que incide sobre las aletas de refrigeración que lleva el rectificador (fig. 12.10).

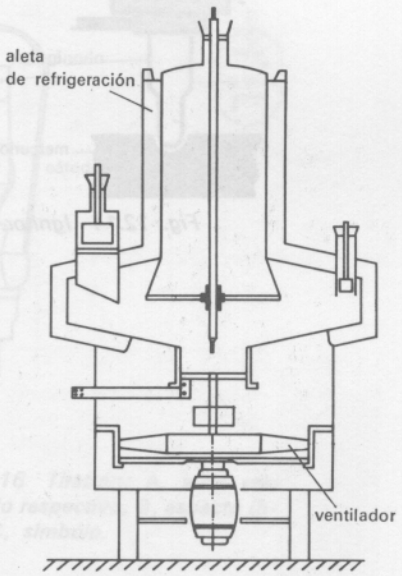


Fig. 12.10 Dibujo esquemático del sistema de refrigeración por aire.

12.7.3 *Características de los rectificadores de vapor de mercurio*

Las más importantes son: la caída de tensión y el rendimiento.

1.º La *caída de tensión* interna de un rectificador de vapor de mercurio se distribuye entre el cátodo, el ánodo y el recorrido del arco; por tanto, depende del tipo y del tamaño del rectificador, aunque normalmente oscila entre 20 y 30 V.

La característica de caída de tensión está en función de su corriente y de la refrigeración del rectificador. En la figura 12.11 se observa que, si la carga aumenta bastante, también lo hace la caída de tensión y, si la refrigeración es eficaz, disminuye considerablemente la caída de tensión.

2.º Rendimiento de un rectificador de vapor de mercurio. Viene expresado por la fórmula:

$$\eta = \frac{P_{útil}}{P_{útil} + P_{perdida}} = \frac{V_c \cdot I_c}{V_c \cdot I_c + v \cdot I_c} = \frac{V_c}{V_c + v}$$

siendo:

η = rendimiento;
P = potencia;
V_c = tensión rectificada;
v = caída de tensión interna;
I_c = corriente absorbida por la carga.

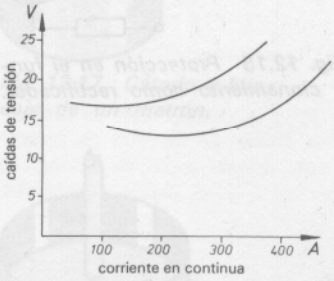


Fig. 12.11 Característica de la caída de tensión.

La característica del rendimiento, en función de la carga, se mantiene aproximadamente constante, a partir de 1/4 de plena carga (fig. 12.12).

12.8 **Ignitrón**

Es una válvula rectificadora cuya envoltura, de acero inoxidable, tiene una doble pared para facilitar el sistema de refrigeración por agua.

En el interior (fig. 12.13), van alojados los siguientes elementos: un cátodo de mercurio que hace contacto con la envoltura poniéndola, por tanto, a su mismo potencial. Un ánodo de grafito sujeto a la envoltura mediante un aislador de vidrio y un ignitor, que es el elemento más característico de este

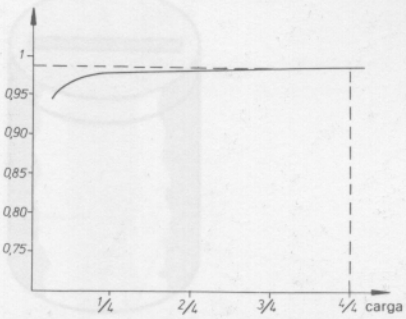


Fig. 12.12 Característica de rendimiento.

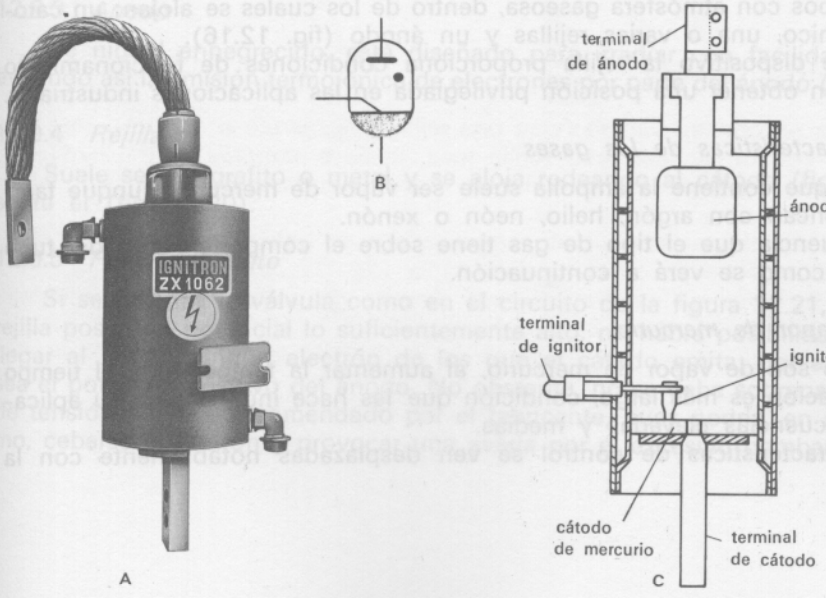


Fig. 12.13 Ignitrón: A, vista en su forma real; B, símbolo; C, corte esquemático.

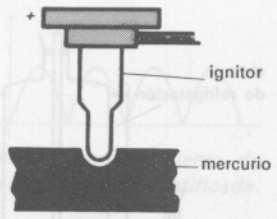


Fig. 12.14 Ignitor.

dispositivo, constituido por una barrita de un aglomerado de carburo de boro, muy resistente al desgaste.

Está aislado de la cuba y aunque su posición es tal que está sumergido en el mercurio, como el extremo sumergido tiene forma de punta de lápiz, penetra en el mercurio sin hacer contacto, ya que éste crea un menisco cóncavo (fig. 12.14).

12.8.1 *Funcionamiento del ignitrón*

Aplicando una diferencia de potencial de unos 120 a 150 V entre ignitor y cátodo, circulará una corriente de unos 10 a 30 A, que provocará un arco entre ellos, suficiente para conseguir una pequeña mancha catódica.

En estas condiciones, cuando en el ánodo haya un potencial positivo, se ionizará la válvula y conducirá.

Cuando el potencial anódico va decreciendo y llega a ser menor que el de arco (de 12 a 18 V), la corriente baja hasta un punto crítico, o cambia la polaridad, se interrumpe la conducción y la mancha catódica desaparece.

12.8.2 *Ignitrones para rectificación*

En su funcionamiento como rectificador de corriente alterna, el número de veces que actúe el sistema de encendido será el del valor de la frecuencia. Esto es, para una corriente alterna de 50 Hz, el sistema de cebado actuaría 50 veces.

Generalmente, suelen trabajar a tensiones que alcanzan hasta los 2 400 V e intensidades medias elevadas.

Suelen equiparse con otros elementos adicionales, como son: dos pantallas entre cátodo y ánodo para poder resistir tensiones inversas de varios miles de voltios, un nuevo ignitor que sirve como reserva y un ánodo auxiliar para mantener la mancha catódica, caso de que la intensidad bajase por causas ajenas al funcionamiento correcto.

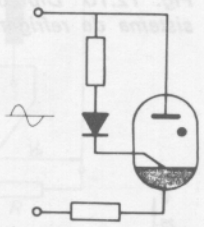


Fig. 12.15 Protección en el funcionamiento como rectificador.

Para el correcto funcionamiento de los ignitrones se deberán tener muy presentes los valores límite de tensión anódica y la intensidad máxima instantánea que circula por el ánodo; los proporciona el fabricante.

Para la obtención de un rendimiento aceptable, es factor fundamental que el sistema de refrigeración cumpla con su cometido, puesto que si trabajase con dificultad, el calor acumulado provocaría la elevación de la presión de vapor de mercurio y haría saltar arcos inversos, con la consiguiente destrucción de la válvula.

Para asegurar el correcto funcionamiento del ignitrón en los circuitos rectificadores, se conecta en serie, entre el ignitor y el ánodo, un rectificador seco (fig. 12.15).

Su funcionamiento es el siguiente: en el semiciclo cuyo ánodo es positivo, el ignitor, que está conectado a él, ceba la válvula y conduce. De no ser por este rectificador, al cambiar la polaridad, se produciría una corriente inversa que destruiría la válvula.

12.9 **Tiratrones**

Son tubos con atmósfera gaseosa, dentro de los cuales se alojan: un cátodo termoiónico, una o varias rejillas y un ánodo (fig. 12.16).

En este dispositivo la rejilla proporciona condiciones de funcionamiento que le hacen obtener una posición privilegiada en las aplicaciones industriales.

12.9.1 *Características de los gases*

El gas que contiene la ampolla suele ser vapor de mercurio, aunque también se fabrican con argón, helio, neón o xenón.

La influencia que el tipo de gas tiene sobre el comportamiento del tubo es grande, como se verá a continuación.

12.9.1.1 *Vapor de mercurio*

Cuando son de vapor de mercurio, al aumentar la temperatura, el tiempo de desionización es más largo, condición que les hace inútiles para su aplicación en frecuencias elevadas y medias.

Sus características de control se ven desplazadas notablemente con la

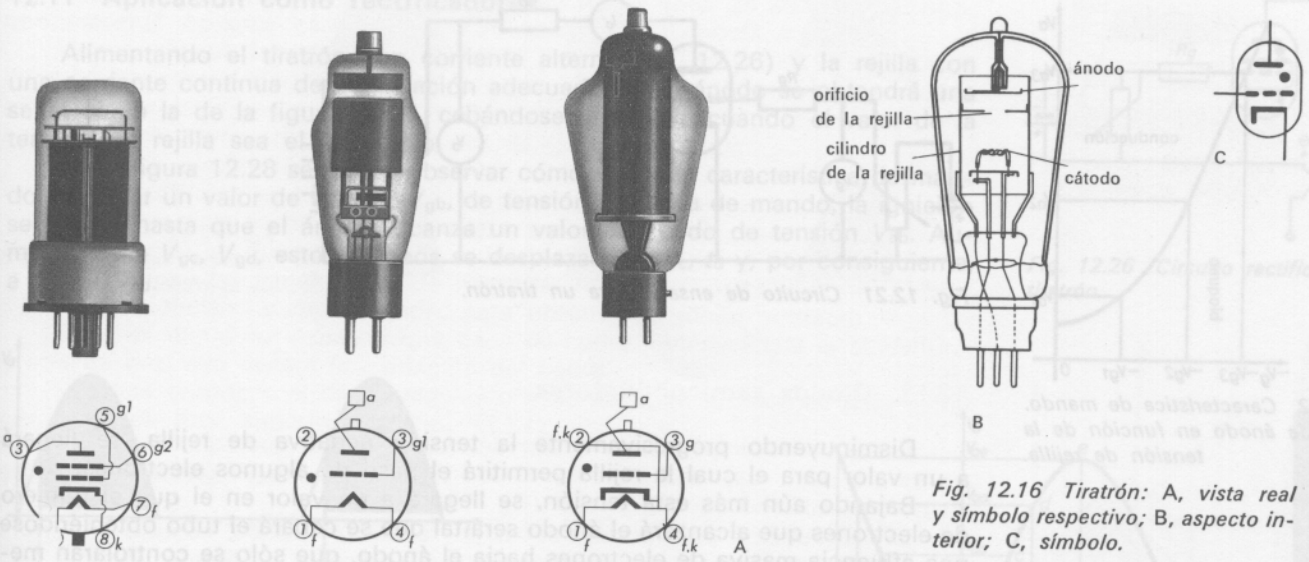


Fig. 12.16 Tiratrón: A, *vista real y símbolo respectivo;* B, *aspecto interior;* C, *símbolo.*

temperatura y, por tanto, los puntos de funcionamiento se trasladan a valores de tensión de rejilla más elevados.

Se precisa de un precalentamiento para producir una evaporación de mercurio que facilite después el encendido.

Deben montarse de manera que permanezcan en posición vertical para que el mercurio líquido se deposite en el fondo de la ampolla.

Es muy difícil que se produzca un arco inverso, y esta ventaja le hace útil para montajes de elevadas potencias, pudiendo alcanzar valores de tensión inversa de hasta 30 000 V.

12.9.1.2 *Gases de argón, helio, neón o xenón*

El aumento de temperatura influye muy poco sobre el normal comportamiento de estos dispositivos ya que, entre los valores de tensión y corriente de trabajo, el aumento de temperatura no llega a influir sobre la presión del gas dentro del tubo hasta valores peligrosos ni tan siquiera a valores suficientes como para desplazar los valores característicos de trabajo.

El tiempo útil de vida es mucho más corto que con mercurio.

La máxima tensión inversa que pueden soportar suele ser de unos 1 300 V.

Pueden emplearse para uso de altas frecuencias pues su tiempo de desionización es muy corto.

Pueden trabajar en cualquier posición.

12.9.2 *Cátodo*

Está recubierto de una capa de óxidos con elevado poder de emisión electrónica, siendo su forma más común la helicoidal. El cátodo suele estar rodeado de un blindaje que reduce las pérdidas caloríficas (fig. 12.17).

12.9.3 *Anodo*

De níquel ennegrecido, está diseñado para irradiar con facilidad el calor, evitando así la emisión termoiónica de electrones por parte del ánodo (fig. 12.18).

12.9.4 *Rejilla*

Suele ser de grafito o metal y se aloja rodeando al cátodo (fig. 12.19) o sobre él (fig. 12.20).

12.9.5 *Funcionamiento*

Si se polariza la válvula como en el circuito de la figura 12.21, cuando la rejilla posea un potencial lo suficientemente alto, no habrá posibilidad de hacer llegar al ánodo ningún electrón de los que el cátodo emita, por elevado que sea el potencial positivo del ánodo. No obstante, no se debe sobrepasar el valor de tensión anódica recomendado por el fabricante, pues podría, en caso extremo, cebarse el tiratrón y provocar una avería por el excesivo bombardeo.

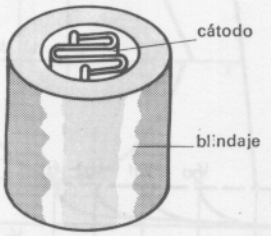


Fig. 12.17 Cátodo y blindaje de un tiratrón.

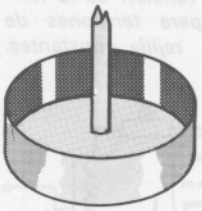


Fig. 12.18 Anodo de un tiratrón.

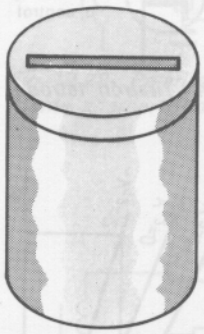


Fig. 12.19
Rejilla de mando.

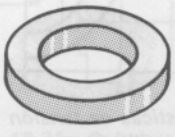


Fig. 12.20
Rejilla de mando.

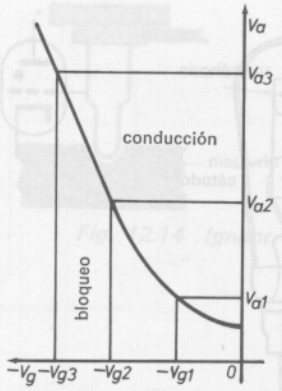


Fig. 12.22 Característica de mando. Tensión de ánodo en función de la tensión de rejilla.

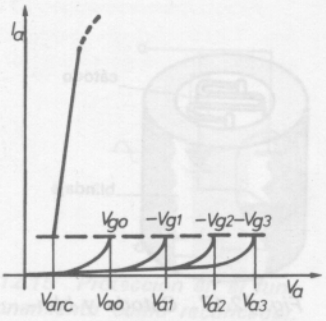


Fig. 12.23 Característica de intensidad de ánodo en función de la tensión de ánodo para tensiones de rejilla constantes.

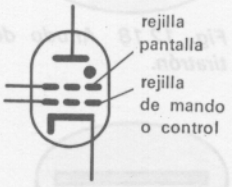


Fig. 12.24 Tiratrón tetrodo.

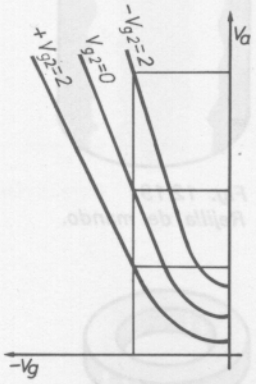


Fig. 12.25 Características de tensión de ánodo en función rejilla de mando, para tensiones de rejilla constantes.

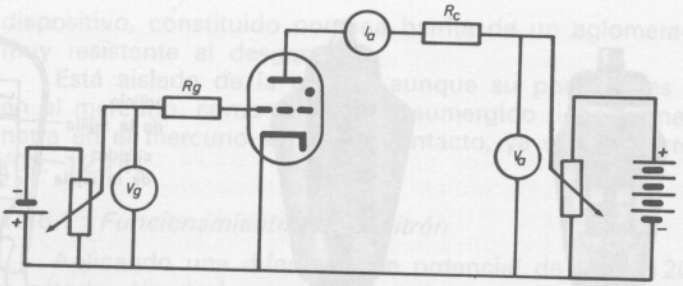


Fig. 12.21 Circuito de ensayo para un tiratrón.

Disminuyendo progresivamente la tensión negativa de rejilla, se llegará a un valor para el cual la rejilla permitirá el paso de algunos electrones.

Bajando aún más esta tensión, se llegará a un valor en el que el número de electrones que alcanzará el ánodo será tal que se cebará el tubo obteniéndose una afluencia masiva de electrones hacia el ánodo, que sólo se controlarán mediante la resistencia de ánodo y el potencial positivo de éste.

Para producir el cebado, los valores de tensiones de ánodo y rejilla van íntimamente ligados, y a cada potencial positivo de ánodos corresponde uno negativo de rejilla (fig. 12.22).

Una vez ionizada la válvula, aunque se aumenten los valores del potencial de rejillas, no se podrá cortar la conducción, ni siquiera controlarla, ya que alrededor de la rejilla se ha formado una nube iónica positiva que evita cualquier intervención de ésta sobre los electrones que fluyen hacia el ánodo.

El tubo se descebará y dejará de conducir sólo cuando la tensión entre ánodo y cátodo sea inferior a la de arco.

No obstante, si antes de desionizarse la rejilla, entre ánodo y cátodo se alcanza la tensión crítica, el tubo vuelve a conducir. De esto se desprende que se debe tener la precaución de no excitar de nuevo la válvula sin haber dejado transcurrir unos microsegundos, necesarios para que la rejilla se desionice y tenga de nuevo control sobre la válvula.

La desionización de la rejilla se produce a través de R_g, evitando así su destrucción.

12.9.6 *Característica de gobierno de un tiratrón*

Con el circuito de la figura 12.21, se podrán obtener los datos necesarios para la formación de las curvas que definan el comportamiento del tiratrón.

Para ello, se regularán las tensiones de rejilla, comprobándose que para producir el cebado será necesario aumentar la tensión anódica. Una vez cebada la válvula se comprobará igualmente cómo la tensión de ánodo es la misma, sean cuales sean los valores de tensión de rejilla y cebado que se han necesitado para poner en funcionamiento la válvula (fig. 12.23).

Ya se comentaba, en el párrafo anterior, la relación existente entre las tensiones de rejilla y ánodo, y cómo ambas se correspondían. Estas curvas características terminan de demostrar lo dicho.

12.10 Tiratrón tetrodo

No sólo se fabrican válvulas con una rejilla (de mando o control), sino que también se construyen con otra rejilla más, llamada *pantalla* (fig. 12.24).

Su misión es *apantallar* la rejilla de mando controlando la emisión electrónica que atraviesa a esta rejilla.

Podrán desplazarse las curvas características de gobierno del tiratrón, dando tensiones adecuadas a esta nueva rejilla (fig. 12.25).

Como se apreciará en dicha figura, cuando se polarice la rejilla pantalla a un valor de tensión negativo, si la tensión de rejilla de mando se ha mantenido constante, se tendrá que aumentar la tensión de ánodo para conseguir el cebado.

Polarizando la rejilla pantalla con tensión positiva, el cebado se conseguirá con una tensión de ánodo mucho menor.

12.11 Aplicación como rectificadores

Alimentando el tiratrón con corriente alterna (fig. 12.26) y la rejilla con una corriente continua de polarización adecuada, en el ánodo se obtendrá una señal como la de la figura 12.27, cebándose la válvula cuando el valor de la tensión de rejilla sea el adecuado.

En la figura 12.28 se puede observar cómo, sobre la característica de mando, al tomar un valor de tensión V_{gb}, de tensión de rejilla de mando, la ignición se retrasa hasta que el ánodo alcanza un valor adecuado de tensión V_{ab}. Aumentando a V_{gc}, V_{gd}, estos tiempos se desplazarían a t_c, t_d y, por consiguiente, a V_{ac} y V_{ad}.

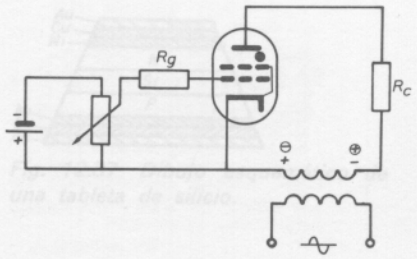


Fig. 12.26 Circuito rectificador con tiratrón.

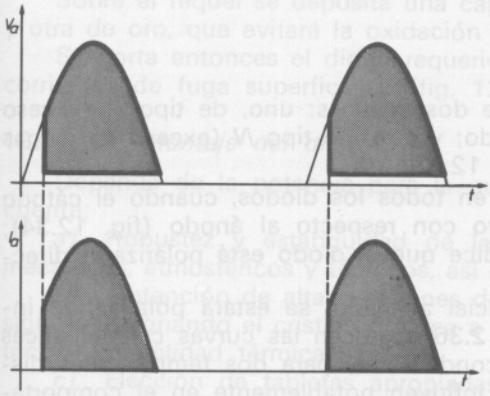
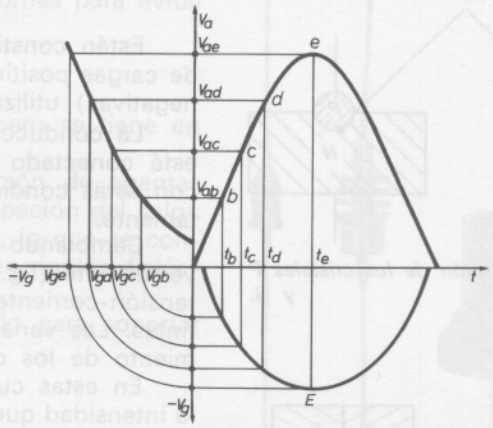
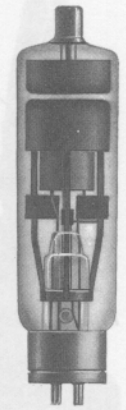


Fig. 12.27 Tensión y corriente de salida.





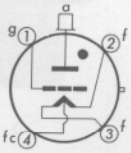


Fig. 12.28 Cebado con tensiones continuas.

El tiratrón conducirá hasta que la tensión de ánodo sea inferior a la tensión de arco, que tras el cebado cae a un valor menor permaneciendo en él constante.

Polarizando la rejilla de mando, mediante corriente continua, el control de cebado no podrá gobernarse pasado el punto *E*, correspondiente a una tensión V_{ge}, o sea, entre 0 y 90°.

12.12 Otros modos de control

Polarizando la rejilla con corriente alterna (fig. 12.29), se obtendrá el control que aparece en la figura 12.30. Este procedimiento es conocido por el nombre de *control horizontal.*

Superponiendo a una tensión continua otra alterna (fig. 12.31), se obtendrán los resultados de la figura 12.32. El sistema se conoce con el nombre de *control vertical.*

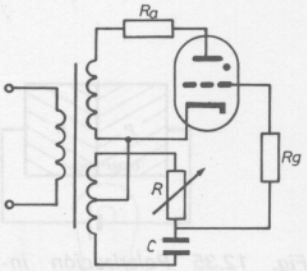


Fig. 12.29 Polarización mediante corriente alterna. Control horizontal.

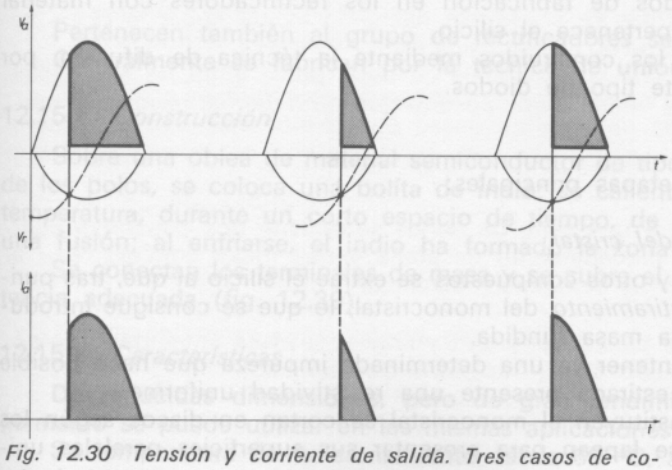


Fig. 12.30 Tensión y corriente de salida. Tres casos de corriente de salida.

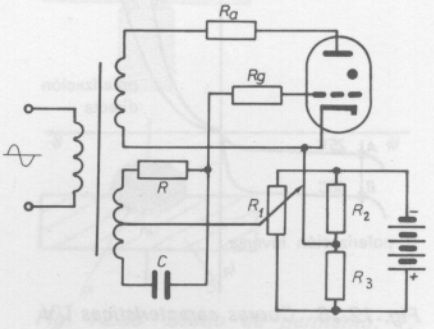


Fig. 12.31 Polarización mediante corriente alterna. Control vertical.

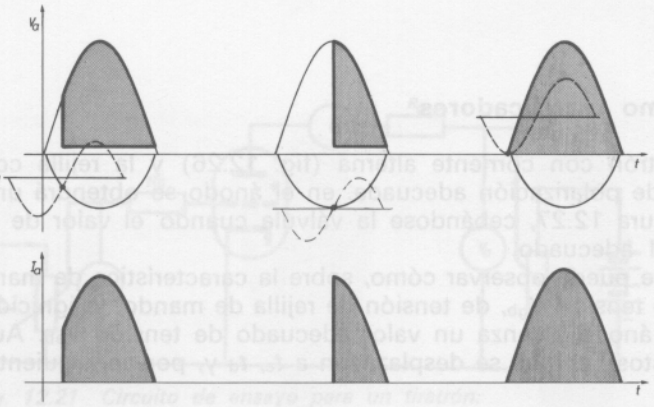


Fig. 12.32 Tensión y corriente de salida. Tres casos de corriente de salida.

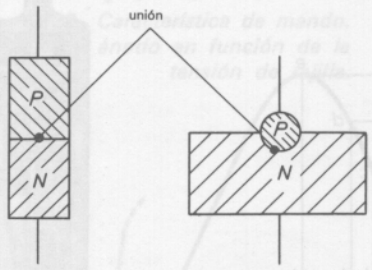


Fig. 12.33 Unión de los cristales P *y* N.

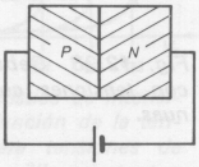


Fig. 12.34 Polarización directa.

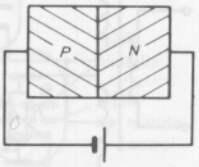


Fig. 12.35 Polarización inversa.

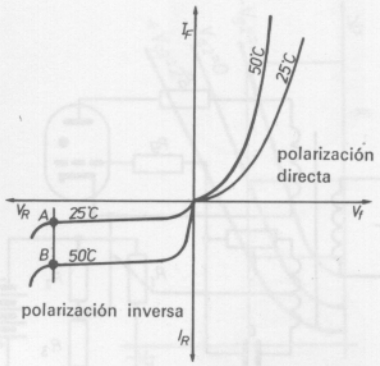


Fig. 12.36 Curvas características I/V *en polarización directa e inversa de un diodo a distintas temperaturas.*

12.13 Diodos semiconductores

Están constituidos por la unión de dos cristales: uno, de tipo *P* (exceso de cargas positivas), que sirve de cátodo; y otro, de tipo *N* (exceso de cargas negativas) utilizado como ánodo (fig. 12.33).

La conducción se produce, como en todos los diodos, cuando el cátodo está conectado a un potencial positivo con respecto al ánodo (fig. 12.34); con estas condiciones de tensión, se dice que el diodo está polarizado directamente.

Cambiando la polaridad del potencial aplicado, se estará polarizando inversamente (fig. 12.35). En la figura 12.36 aparecen las curvas características tensión-corriente, de dos diodos semiconductores, para dos temperaturas distintas. Las variaciones de temperatura influyen notablemente en el comportamiento de los diodos semiconductores.

En estas curvas se comprobará fácilmente cómo, en polarización directa, la intensidad que circula es muy elevada y la resistencia del diodo muy pequeña; y cómo, en polarización inversa, la tensión tiene que aumentar mucho para conseguir aumentos de intensidad insignificantes, lo cual demuestra la elevada oposición que el diodo presenta en estas condiciones.

Si se sigue aumentando la tensión, se llega a una zona (prohibida), puntos *A* y *B* de la figura 12.36, en la que el diodo se perfora y conduce totalmente.

12.13.1 *Características generales*

En polarización directa no debe sobrepasarse nunca el valor de pico establecido por el fabricante ni la potencia máxima que puede disipar el diodo.

En polarización inversa, la mayor precaución se tendrá en no alcanzar el valor de tensión en el que se produce la *ruptura.*

La ruptura se produce cuando el potencial inverso es tan elevado que arranca electrones de sus órbitas por ruptura del enlace covalente, ruptura que, por otra parte, es rapidísima, fundiéndose los cristales y destruyendo la unión.

12.14 Rectificador de silicio

Hay diversos métodos de fabricación en los rectificadores con material semiconductor, al cual pertenece el silicio.

Se estudiarán aquí los construidos mediante la técnica de difusión, por ser más utilizada en este tipo de diodos.

12.14.1 *Construcción*

Se distinguen dos etapas principales:

12.14.1.1 *Preparación del cristal*

De los halogenuros y otros compuestos se extrae el silicio al que, tras purificar, se somete a un *estiramiento* del monocristal, lo que se consigue introduciendo un germen en la masa fundida.

Esta masa suele contener ya una determinada impureza que hace posible que la barra cilíndrica estirada presente una resistividad uniforme.

Las barras que constituyen el monocristal se cortan en discos según los espesores deseados y se lapean para presentar sus superficies paralelas uniformes.

El monocristal más utilizado es el de tipo N, de unos 24 mm de diámetro, que presenta óptimas características en polarización directa e inversa.

Para conseguir las zonas P y N en el monocristal, se utiliza el sistema de difusión por calentamiento. El procedimiento es muy lento, el tiempo empleado para obtener estas zonas es aproximadamente 24 horas y las profundidades de sus capas se controlan con precisiones de $\pm$ 1 μ de error.

Tras una predifusión de P_2O_5 sobre una capa de monocristal, que crea una capa vitrificada en la superficie, se difundirá el fósforo sobre el silicio.

En la otra cara se habrá formado una película de SiO_2, que se elimina por abrasión; luego se difunde el boro, que da lugar a la zona P.

Se eliminan las capas de óxido formadas en ambas caras durante la difusión y se niquelan, a continuación, para obtener un mejor contacto.

Sobre el níquel se deposita una capa de cobre, que facilitará la soldadura, y otra de oro, que evitará la oxidación del cobre.

Se corta entonces el diodo requerido y se decapan los bornes para evitar corrientes de fuga superficiales (fig. 12.37).

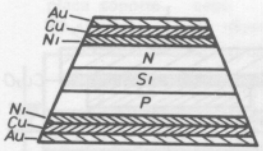


Fig. 12.37 Dibujo esquemático de una tableta de silicio.

12.14.1.2 *Montaje del diodo*

Depende de la potencia para la que se haya diseñado, pero se tiene en cuenta:

a) Robustez y estanquidad de la cápsula, para protección de agentes mecánicos, atmosféricos y térmicos, así como capacidad de disipación del calor.

b) Obtención de altas tensiones de ruptura o perforación, lo que se consigue impregnando el cristal con laca a base de silicona de gran rigidez dieléctrica y estabilidad térmica.

c) Elección de tabletas apropiadas y conductor adecuado para soportar las corrientes elevadas de polarización directa.

12.14.1.3 *Características*

Los valores que deben tenerse en cuenta cuando se manejan diodos de silicio y, en general, esto sucede para cualquier material, serán aquellos que dé el fabricante para el caso; no obstante, aquí se hace un pequeño resumen orientativo.

La caída de tensión directa suele ser de 1 V, soportando una tensión inversa máxima del orden de los 3 800 a 4 000 V.

Soporta una densidad de corriente de unos 100 A/cm^2.

No suele resistir temperaturas superiores a los 200 °C.

Es sólido a sobrecargas y cambios de temperatura, por el amplio dimensionado de la tableta.

Se fabrican para pequeñas, medianas y grandes potencias; los de estas últimas, provistos de aletas de refrigeración (fig. 12.38).

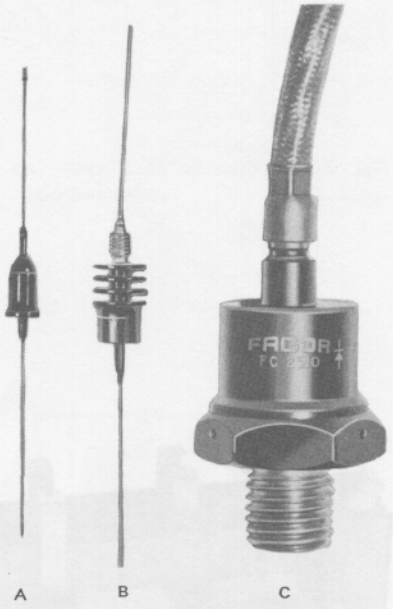


Fig. 12.38 Diodos de silicio. A, *pequeña potencia;* B, *mediana;* C, *gran potencia.*

Requieren protecciones:

a) contra sobreintensidades, fusibles ultrarrápidos;

b) contra sobretensiones, circuitos RC.

12.15 **Rectificadores de germanio**

Pertenecen también al grupo de rectificadores semiconductores.

Generalmente se fabrican por la técnica de unión por aleación.

12.15.1 *Construcción*

Sobre una oblea de material semiconductor de tipo N, que constituye uno de los polos, se coloca una bolita de indio; se calienta el conjunto a elevada temperatura, durante un corto espacio de tiempo, de manera que se produce una fusión; al enfriarse, el indio ha formado la zona P.

Se conectan los terminales de masa y se cubre el conjunto con una resistencia adecuada (fig. 12.39).

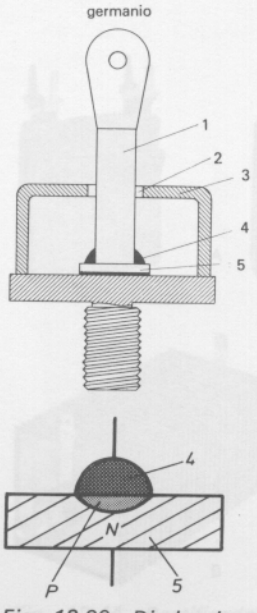


Fig. 12.39 Diodo de germanio: 1, electrodo de cobre; 2, aislante; 3, protección; 4, indio; 5, germanio.

12.15.2 *Características*

De reducidas dimensiones, pero de gran rendimiento, el rectificador de germanio se puede utilizar en las mismas aplicaciones que el de silicio.

Su temperatura de funcionamiento es de 65 °C, aunque es deseable que no alcance este valor.

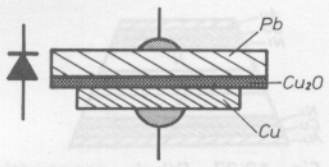


Fig. 12.40 Dibujo esquemático de un diodo de óxido de cobre.

Aplicando 0,2 V, se obtiene ya conducción; el silicio necesita 0,7 V.

Tiene menor resistencia dinámica que el de silicio y mayor rendimiento.

La caída de tensión es de 0,5 V aproximadamente.

La máxima tensión inversa oscila entre 750 y 800 V.

La densidad admisible es un poco menor que la del silicio, pero se acerca a los 100 A/cm².

12.16 Rectificadores de óxido de cobre

Ha perdido importancia en el campo de aplicaciones industriales porque las técnicas con semiconductores y selenio han dado mejores rendimientos.

12.16.1 *Construcción*

Como placa base se utiliza cobre puro.

Calentándola a 1 000 °C, se forma una capa de óxido de cobre (CuO) de unos 2 mm.

Se uniformiza la capa de óxido de cobre y se cubre con bióxido de cobre, con lo cual habrá un exceso de oxígeno creándose, de este modo, un semiconductor de tipo P.

Se aplica por presión un electrodo de grafito o plomo en la capa oxidada, quedando así constituido este dispositivo (fig. 12.40).

El sentido de la corriente será del cobre hacia el óxido.

12.16.2 *Características*

Les afecta notablemente la temperatura y no pueden superar los 50 °C.

La tensión en polarización directa no supera unos pocos voltios y la inversa máxima que soporta es de unos 8 V, necesitando por ello colocar muchos elementos en serie y derivación cuando aumenta la tensión o la intensidad que no supera los 80 mA/cm².

Todo ello justifica su declive.

12.17 Rectificadores de selenio

Consiste en una placa metálica, sobre una sola de cuyas caras se deposita una capa de selenio. La placa metálica actúa simplemente de soporte ya que el selenio no posee la consistencia mecánica necesaria.

12.17.1 *Construcción*

En un principio se utilizó como metal soporte el hierro, pero en la actualidad se ha sustituido por aluminio por ser su peso menor, ventaja importante sobre todo en los montajes de bloques que llevan varias placas.

La primera etapa de fabricación consiste en un tratamiento superficial de la placa soporte, para obtener mayor superficie útil y la rugosidad necesaria para una buena adhesión de las capas de metal que se depositen sobre ella y que dan, como resultado, una mejora en las cualidades eléctricas finales.

El aumento de superficie se conseguía haciendo incidir sobre la placa un chorro de arena que producía las rugosidades.

Este procedimiento tiene la desventaja de dejar polvo entre las superficies y necesitar un proceso de limpieza complicado que no daba los resultados apetecidos.

12.17.1.1 *Tratamiento químico*

Sometiendo la placa a una serie de baños se obtiene una superficie ocho veces mayor que por el procedimiento de arena y una mejor limpieza, con la consiguiente disminución de resistencia eléctrica.

Los baños son:

— De H_2SO_4-HNO_3, para desengrasar y limpiar la placa antes del proceso.

— De NaOH, decapado de la superficie de aluminio.

— De HCl, corrosión de la superficie de la placa.

— De HNO_3-HF, limpieza, eliminación de polvo de aluminio, de cloruros, de metales pesados; estabilización del aluminio.

— De níquel, deposición de una capa de níquel sobre el aluminio.

— De selenio, deposición de una capa de selenio sobre el níquel.

Por su mayor interés, se verán a continuación los baños de níquel y selenio.

12.17.1.2 *Baño de níquel*

Mediante baño electrolítico se deposita una finísima capa de níquel, que actuará de capa intermedia entre el metal soporte de aluminio y el elemento rectificador, selenio.

El baño consiste, en esencia, en una disolución concentrada de sulfato de níquel y cloruro de níquel.

12.17.1.3 *Baño de selenio*

Es una disolución concentrada de ácido de selenio cristalizado industrial (SeO_3H_2) a la que se le añade un gramo por litro de sauril de sulfato sódico ($C_{12}H_{25}SO_4Na$) para favorecer la electrólisis.

Por simple baño electrolítico, no puede conseguirse la capa necesaria de selenio y debe recurrirse a la vaporización en cámaras de vacío.

Mediante el proceso de cámaras de vacío exclusivamente, la adherencia del selenio a la placa no era perfecta y, por ello, se recurre a depositar primero una fina capa mediante baño electrolítico; y el resto, por cámara de vacío (figura 12.41).

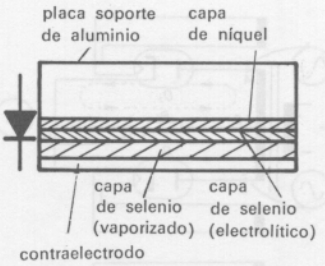


Fig. 12.41 Sección de la placa rectificadora de selenio.

12.17.1.4 *Contraelectrodo*

Sobre la capa de selenio, sólo resta colocar una placa de la aleación de baja fundición, compuesta por estaño-cadmio-bismuto, que recibe el nombre de *contraelectrodo.*

El contraelectrodo no ocupa toda la superficie de la placa de selenio, como se aprecia en la figura 12.42.

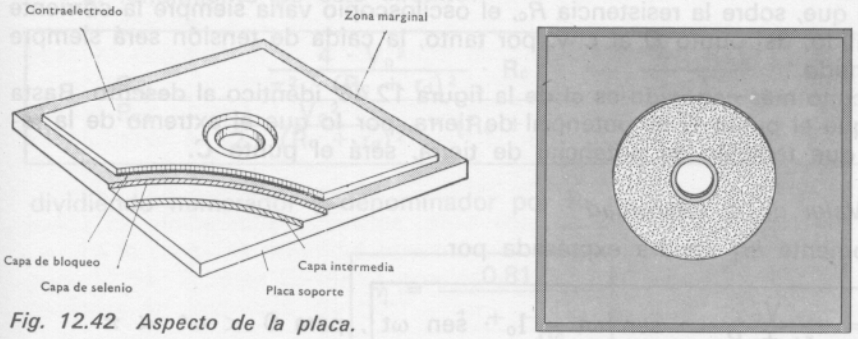


Fig. 12.42 Aspecto de la placa.

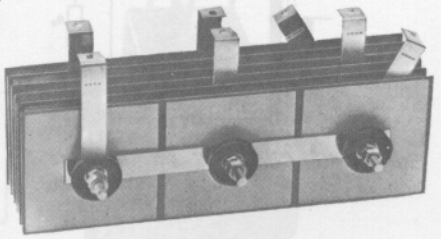


Fig. 12.43 Grupo rectificador de selenio.

12.17.2 *Funcionamiento*

El selenio depositado se ha transformado, por el proceso de fabricación, en extrínseco de tipo P, lo que quiere decir que es portador de cargas positivas.

Así, se ha formado una barrera entre el semiconductor y el contraelectrodo.

El sentido de la corriente será del selenio al contraelectrodo. La dirección de los electrones, por tanto, será el contrario, esto es, del contraelectrodo al selenio.

Su acción rectificadora se comprobará al someter el conjunto a la corriente alterna, ya que éste sólo dejará pasar corriente en aquellos semiciclos en los que la polaridad sea positiva en el electrodo y negativa en el contraelectrodo.

12.17.3 *Características*

Las placas rectificadoras pueden conectarse indistintamente en serie o paralelo. Van montadas una al lado de la otra, en columna, a determinada distancia y sobre bulones roscados aislados (fig. 12.43).

En las columnas rectificadoras para aplicaciones de alta tensión, la última placa rectificadora de cada columna está unida eléctricamente con el bulón.

El tamaño y número de placas de un conjunto rectificador dependen de la intensidad y tensión de carga requerida (fig. 12.44).

Es insensible a las corrientes elevadas y sobreintensidades de corta duración, evitando así la necesidad de una protección.

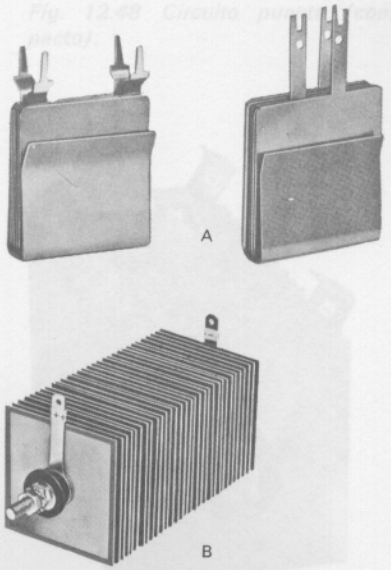


Fig. 12.44 Rectificadores de selenio, para: A, *pequeñas tensiones;* B, *tensiones elevadas.*

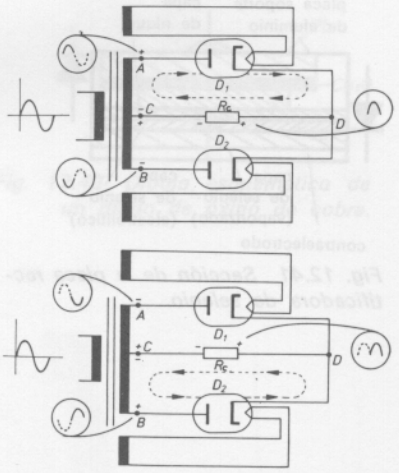


Fig. 12.45 Circuito rectificador de onda completa.

La máxima tensión inversa que soportan es del orden de los 25 a 30 V por elemento.

La densidad de carga de las placas depende, entre otras cosas, de su superficie activa, pudiendo oscilar entre 70 y 100 mA/cm² en refrigeración natural, y 210 a 310 mA/cm² en refrigeración forzada.

Para la vida útil del rectificador de selenio, es esencial la temperatura de servicio de las placas, la cual depende del calor debido a las pérdidas eléctricas (de paso y bloqueo), y de la refrigeración de las placas.

En condiciones de uso normales, se alcanza la temperatura máxima de servicio con 35 °C de temperatura ambiente, entre los 75 y 85 °C.

Con estas temperaturas, las horas útiles de vida alcanzan hasta las 100 000 horas.

12.18 Circuito rectificador de onda completa

Obsérvense los circuitos de la figura 12.45; si se conecta un osciloscopio en el punto *A* y otro en el *B*, se verá que las ondas generadas por la entrada del primario del transformador son iguales y opuestas. Esto, si se toma como común el punto *C*, central del transformador. Así pues, se podrá decir que el punto *A* es positivo respecto al *C* durante el semiciclo positivo, y que el *B* es negativo respecto al *C*. Análogamente, durante el semiciclo negativo, el punto *A* será negativo, y *B* será positivo respecto al *C*.

Por tanto, en el semiciclo positivo, el diodo D_1 conducirá, ya que los electrones salidos del cátodo serán atraídos por el positivo de *A* y existirá corriente de ánodo.

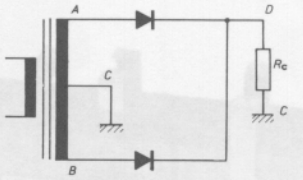


Fig. 12.46 Circuito rectificador de onda completa.

Por el contrario, D_2 permanecerá bloqueado, por ser *B* negativo y estar polarizado inversamente. En el semiciclo negativo, por el contrario, D_2 conducirá y D_1 permanecerá bloqueado, y sólo habrá corriente por el circuito inferior. Obsérvese que, sobre la resistencia R_c, el osciloscopio varía siempre la corriente en un sentido, del punto *D* al *C* y, por tanto, la caída de tensión será siempre de un sentido.

El circuito más conocido es el de la figura 12.46, idéntico al descrito. Basta observar que el punto *C* es potencial de tierra, por lo que el extremo de la resistencia, que también es potencial de tierra, será el punto *C*.

12.18.1 *Valor de la intensidad*

La corriente i_{D_1} vendrá expresada por

$$\boxed{i_{D_1} = \frac{V_o}{r_d + R_c} \cdot \operatorname{sen} \omega t = I_o \cdot \operatorname{sen} \omega t}, \quad \text{para } 0 < \omega t < \pi$$

$$\boxed{i_{D_1} = 0}, \quad \text{para } \pi < \omega t < 2\pi$$

y la i_{D_2} por:

$$\boxed{i_{D_2} = 0}, \quad \text{para } 0 < \omega t < \pi$$

$$\boxed{i_{D_2} = \frac{V_o}{r_d + R_c} \cdot \operatorname{sen} \omega t = I_o \cdot \operatorname{sen} \omega t}, \quad \text{para } \pi < \omega t < 2\pi$$

La i_D total que circula por R_c será:

$$\boxed{i_D = i_{D_1} + i_{D_2}}$$

y la ecuación general:

$$\boxed{i_D = |I_o \cdot \operatorname{sen} \omega t|}, \quad \text{para } 0 < \omega t < 2\pi$$

La corriente media en la salida será:

$$\boxed{I_{med.} = \frac{2 \cdot I_o}{\pi}}$$

y el valor eficaz de la corriente:

$$I = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$$

Análogamente las tensiones,

$$V_{med.} = \frac{2 \cdot V_o}{\pi}$$

y en función del valor eficaz:

$$V_{med.} = \frac{2 \times \sqrt{2}}{\pi} \cdot V = 0{,}9 \cdot V$$

12.18.2 *Valor de las potencias y del rendimiento*

La potencia de corriente continua suministrada a la carga es:

$$P_{cc} = R_c \cdot I_{cc}^2 = R_c \cdot \left(\frac{2 \cdot V_o}{\pi \, (R_c + r_d)} \right)^2 = \frac{4 \cdot V_o^2}{\pi^2 \, (R_c + r_d)^2} \cdot R_c$$

La potencia alterna suministrada:

$$P_{ca} = (R_c + r_d) \cdot I^2 = \frac{V_o^2}{2 \, (R_c + r_d)^2} \cdot (R_c + r_d)$$

El rendimiento de este circuito:

$$\eta = \frac{P_{cc}}{P_{ca}} = \frac{\dfrac{4 \cdot V_o^2}{\pi^2 \cdot (R_c + r_d)^2} \cdot R_c}{\dfrac{V_o^2}{2 \cdot (R_c + r_d)^2} \cdot (R_c + r_d)} = \frac{\dfrac{4 \cdot R_c}{\pi^2}}{\dfrac{R_c + r_d}{2}} = \frac{8 \cdot R_c}{\pi^2 \, (R_c + r_d)}$$

dividiendo numerador y denominador por R_c

$$\eta = \frac{0{,}812}{1 + \dfrac{r_d}{R_c}}$$

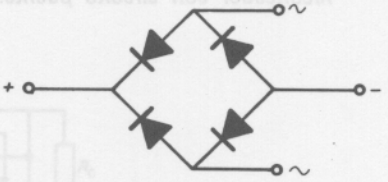


Fig. 12.47 Circuito puente.

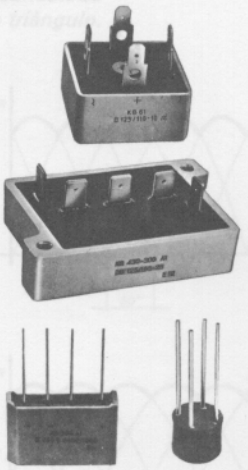


Fig. 12.48 Circuito puente (compacto).

12.19 Puentes de rectificación

Su nombre procede de la similitud que guardan estos circuitos (fig. 12.47) con los puentes de medida.

Por su economía, rigidez mecánica, gran rendimiento y ventaja de utilizar transformadores sin toma central, etc., han alcanzado un puesto importante en las aplicaciones industriales.

12.19.1 *Rectificador monofásico de onda completa o rectificador en puente*

El puente rectificador es un componente compacto (integrado) que encierra cuatro diodos (fig. 12.48).

Los primeros puentes rectificadores se construyeron a base de materiales semiconductores (óxido de cobre o selenio), montados sobre chapas de hierro.

Poniendo capas sucesivas, se consiguen los puentes deseados (fig. 12.48).

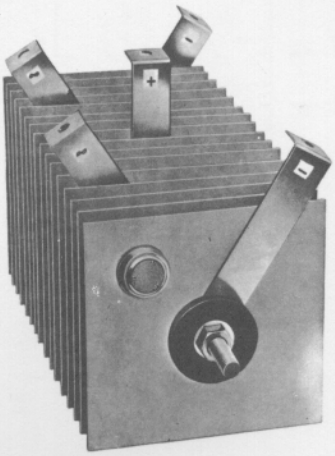


Fig. 12.49 Circuito puente con placas.

12.19.1.1 *Funcionamiento*

Véase cómo funciona un circuito rectificador con estos componentes, o también montado en serie-paralelo de diodo, según el esquema de la figura 12.49.

Sea el circuito de la figura 12.50. Cuando el punto *A* sea positivo respecto al *B*, el diodo D_1 queda polarizado directamente y conduce a través de la resistencia *R* y del diodo D_3 hasta el punto *B*, donde se cierra el circuito. Véase que los diodos D_2 y D_4 se polarizan inversamente.

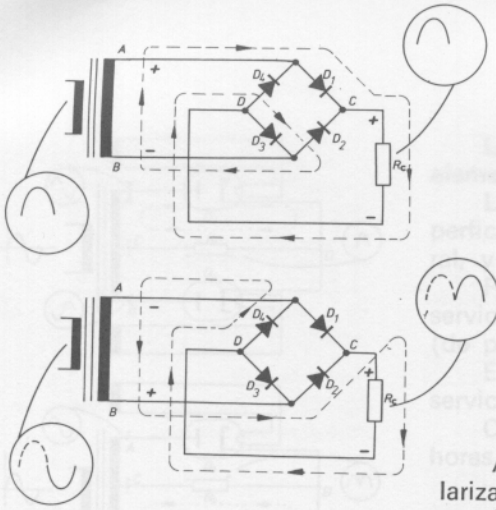


Fig. 12.50 Funcionamiento de un rectificador con circuito puente.

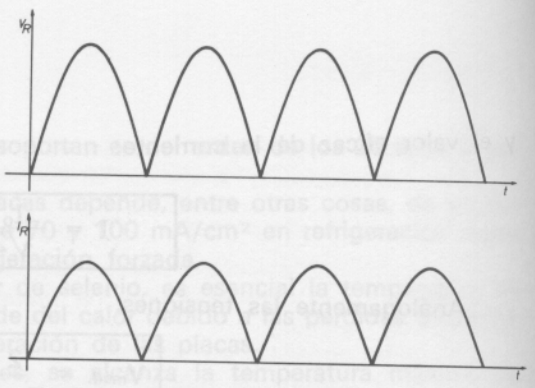


Fig. 12.51 Señal rectificada.

Análogamente, cuando *A* es negativo respecto de *B*, el diodo D_2 está polarizado en sentido directo a través de *R* y D_4. Con ello se consigue que, tanto en el semiciclo positivo como en el negativo, fluya una corriente en el mismo sentido a través de *R*.

En bornes de la resistencia *R* se obtendrá la forma de onda de la figura 12.51.

12.19.1.2 *Valor de intensidad*

La corriente i_R que circula por la resistencia de carga será:

$$i_R = \frac{V_o}{2 \cdot r_d + R_c} \cdot \text{sen } \omega t = I_o \cdot \text{sen } \omega t \text{, para } \begin{cases} 0 < \omega t < \pi \\ \pi < \omega t < 2\pi \end{cases}$$

La corriente media por la resistencia de carga:

$$I_{med.} = \frac{2 \cdot V_o}{\pi \cdot (2 \cdot r_d + R_c)} = \frac{2 \cdot I_o}{\pi}$$

y el valor eficaz de la corriente:

$$I = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$$

Análogamente las tensiones:

$$V_{med.} = \frac{2}{\pi} \cdot V_o$$

y en función del valor eficaz:

$$V_{med.} = \frac{2 \times \sqrt{2}}{\pi} \cdot V = 0{,}9 \cdot V$$

12.19.1.3 *Valor de las potencias y del rendimiento*

La potencia de corriente continua suministrada a la carga valdrá:

$$P_{cc} = R_c \cdot I_{cc}^2 = \frac{4 \cdot R_c}{\pi^2} \cdot \frac{V_o^2}{(R_c + 2 \cdot r_d)^2}$$

Siendo el valor de la potencia alterna suministrada:

$$P_{ca} = I^2 \cdot (2 \cdot r_d + R_c) = \frac{V_o^2}{2\,(2 \cdot r_d + R_c)}$$

El rendimiento de este circuito:

$$\eta = \frac{P_{cc}}{P_{ca}} = \frac{\dfrac{4 \cdot R_c}{\pi^2} \cdot \dfrac{V_o^2}{(R_c + 2 \cdot r_d)^2}}{\dfrac{V_o^2}{2\,(2 \cdot r_d + R_c)}} = 0{,}812 \cdot \frac{1}{1 + \dfrac{2 \cdot r_d}{R_c}}$$

12.19.2 *Rectificador trifásico de onda completa o rectificador trifásico en puente*

Generalmente, en las aplicaciones industriales, se utiliza la corriente eléctrica trifásica por razones de economía, de rendimiento y porque así la sirven las empresas suministradoras. De aquí nace la necesidad de tener grupos convertidores en corriente continua adaptados a estos sistemas trifásicos, siendo el que tratamos aquí el de mayores ventajas.

12.19.2.1 *Funcionamiento*

Se precisará para este montaje un transformador trifásico y seis diodos, conjunto que podrá conectarse de dos modos distintos según como se halle conectado el secundario del transformador.

En las figuras 12.52 y 12.53 se aprecian dos circuitos rectificadores trifásicos en puente conectados a los secundarios de dos transformadores, conectados, a su vez, en estrella y triángulo respectivamente.

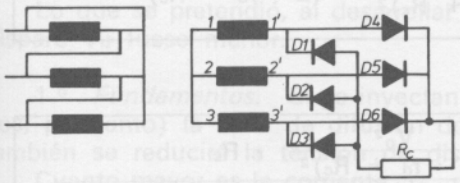


Fig. 12.52 Rectificador trifásico de onda completa o puente rectificador trifásico conectado a un transformador con secundario en estrella.

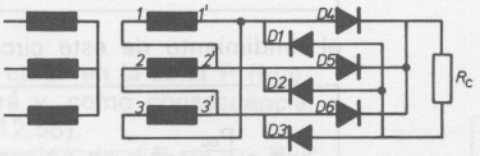


Fig. 12.53 Rectificador trifásico de onda completa o puente rectificador trifásico conectado a un transformador con secundario en triángulo.

El resultado de la rectificación será el mismo en uno y otro caso.

Atendiendo a la figura 12.52, cuando en el bobinado *1-1'* el punto *1'* sea positivo respecto al *1*, la corriente circulará por D_4, puesto que su ánodo es positivo, y no lo hará por D_1, cuyo cátodo es positivo. Unos instantes más tarde, cambiará la polaridad del devanado; entonces *1* será positivo y *1'* será negativo. La corriente ahora entrará en devanado proveniente del diodo D_1, y el diodo D_4 permanecerá bloqueado.

Por características de la corriente trifásica, lo expuesto aquí sucede en todos los devanados y diodos, pero con un pequeño desfase.

En la carga se obtendrá una tensión continua, cuya forma será la de la figura 12.54. En esta figura se aprecia cómo cada diodo permite el paso de la corriente en intervalos de 60°.

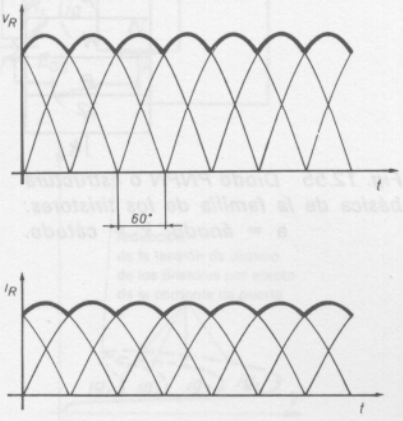


Fig. 12.54 Tensión de salida de puente rectificador trifásico.

12.19.2.2 *Valor de la intensidad*

La corriente rectificada que circula por la resistencia de carga será:

$$I_{med.} = \frac{6}{\pi} \cdot I_o \cdot \text{sen}\ \frac{180^o}{6} = I_o \cdot \frac{6}{\pi} \cdot \frac{1}{2} = 0{,}95 \cdot I_o$$

La corriente de pico rectificada valdrá:

$$I_o = \frac{V_o}{R_c + 2 \cdot r_d}$$

y la corriente eficaz:

$$I = I_o \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{6}{4\,\pi} \cdot \text{sen}\ \frac{2 \times 180^o}{6}}$$

$$= I_o \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{6}{4 \times 3{,}14} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}} = 0{,}91 \cdot I_o$$

Análogamente las tensiones:

$$V_{med.} = \frac{6}{\pi} \cdot V_o \cdot \text{sen}\ \frac{180^o}{6} = 0{,}95 \cdot V_o \quad ; \quad V = 0{,}91 \cdot V_o$$

12.19.2.3 *Valor de las potencias y rendimiento*

La potencia de corriente continua suministrada a la carga valdrá:

$$P_{cc} = R_c \cdot I_{cc}^2 = \left(\frac{3}{\pi} \cdot I_o\right)^2 \cdot R_c = \left(\frac{3}{\pi} \cdot \frac{V_o}{R_c + 2 \cdot r_d}\right)^2 \cdot R_c$$

$$= \frac{9}{\pi^2} \cdot \frac{V_o^2}{(R_c + 2 \cdot r_d)^2} \cdot R_c$$

Siendo el valor de la potencia alterna suministrada:

$$P_{ca} = I^2 \cdot (2 \cdot r_d + R_c) = \left(\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3 \times \sqrt{3}}{4\,\pi}} \cdot I_o\right)^2 \cdot (2 \cdot r_d + R_c)$$

$$= \left(\frac{1}{2} + \frac{3 \times \sqrt{3}}{4\,\pi}\right) \cdot \frac{V_o^2}{(2 \cdot r_d + R_c)^2} \cdot (2 \cdot r_d + R_c)$$

el rendimiento de este circuito:

$$\eta = \frac{P_{cc}}{P_{ca}} = \frac{\frac{9}{\pi^2} \cdot \frac{V_o^2}{(2 \cdot r_d + R_c)^2} \cdot R_c}{\left(\frac{1}{2} + \frac{3 \times \sqrt{3}}{4\,\pi}\right) \cdot \frac{V_o^2}{(2 \cdot r_d + R_c)^2} \cdot (2 \cdot r_d + R_c)}$$

$$= \frac{9}{\pi^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{3 \times \sqrt{3}}{4\,\pi}\right) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot r_d}{R_c}\right)}$$

$$= 0{,}998 \cdot \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot r_d}{R_c}}$$

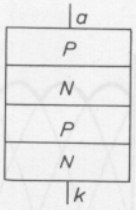


Fig. 12.55 Diodo PNPN o estructura básica de la familia de los tiristores: a = ánodo; k = cátodo.

12.20 Tiristores

Se construyen con la unión de cuatro cristales, dos de tipo P y dos de tipo N, formando la estructura de la figura 12.55.

En la mayoría de los tratados se estudia primero el diodo PNPN (fig. 12.55), para luego pasar al estudio del tiristor (thyristor).

Se considera más conveniente llamar tiristor a este diodo puesto que, a partir de él, salen una serie de componentes, básicamente de la misma estructura, pero con diferentes funcionamientos. De esta forma, se da un nombre genérico a una gran familia de tiristores.

12.20.1 *Fundamentos*

Véase cómo funciona la estructura básica de esta familia. Para ello se monta el circuito de la figura 12.56 (obsérvese el esquema puesto al lado de la estructura). Si se hace variar la tensión E de la pila, se verá que la corriente va aumentando muy poco. Hay que tener en cuenta que el diodo D_2 está polarizado inversamente y, por tanto, la corriente que mida el amperímetro será muy próxima a la corriente inversa de D_2, ya que D_1 y D_3, al encontrarse polarizados directamente, provocarán una pequeña caída de tensión, casi despreciable, tramo OA del gráfico (fig. 12.56).

Si se sigue aumentando la tensión V, se ve que, una vez sobrepasada en cierto valor V_d (tensión de disparo), la corriente se desplaza a un valor I_o, que es la intersección de la recta de carga debida a R y la característica de disparo. Este fenómeno ya ocurrió cuando se estudiaban los diodos de gas.

Nótese que, cuando D_1 llega a su tensión de avalancha, la corriente en esa unión ya no es función de la tensión aplicada, por lo que la tensión sobre el tiristor decrece, hasta hacerse igual a la caída de tensión de los diodos D_1 y D_3, punto B.

Si se invierte la pila E, tanto D_1 como D_3 se encuentran polarizados inver-

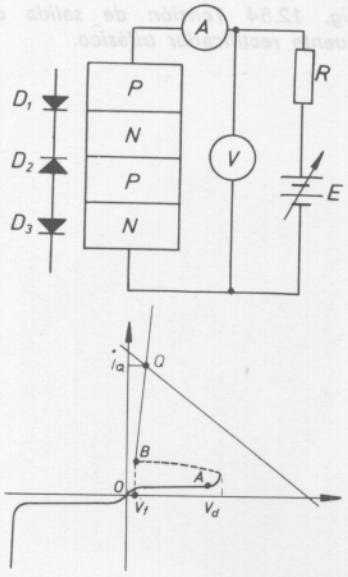


Fig. 12.56 Funcionamiento y característica de un tiristor.

samente, y D_2 queda en sentido directo, con lo que esta polarización prácticamente es idéntica a la de un diodo.

12.20.2 *Clasificación de los tiristores*

Se desarrollan un sinfín de variantes de esta estructura. Estudiamos, a continuación, las siguientes:

— SCR.
— Diac.
— Triac.

12.20.2.1 *Rectificador controlado de silicio (SCR)*

Este dispositivo es el que se denomina simplemente tiristor; obsérvese, en la figura 12.57, cómo la estructura del SCR es la misma del diodo PNPN, que se ha dado en llamar familia de tiristores.

También puede verse cómo en la región P central se tiene conectado un nuevo terminal, llamado puerta *G, (Gate),* que es la modificación introducida.

Lo que se pretendió, al desarrollar este componente, fue que la tensión de disparo V_d fuese menor.

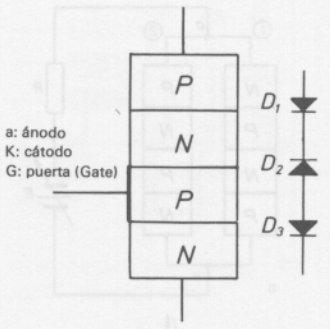


Fig. 12.57 Estructura del SCR.

1.º *Fundamentos.* Si se inyectan portadores de carga en la zona P (huecos, por tanto) la zona de difusión de D_2 se reducirá y, como consecuencia, también se reducirá la tensión de disparo V_d (fig. 12.58).

Cuanto mayor es la corriente i_g, menor será la tensión de disparo, ya que se introducen mayor cantidad de portadores en relación al tiempo.

$$i_g = \frac{Q}{t}$$

siendo Q la carga introducida.

Además, una vez obtenido el disparo del mismo, ya no es necesario que se mantenga i_g, puesto que la corriente ánodo-cátodo (I) es independiente; nótese que, además, no sólo no es necesario, sino que es peligroso mantenerla, pues por la unión de D_3 pasaría $i_g + 1$, que podría destruir la unión. Por lo que, una vez conseguido el disparo, es necesario abrir el interruptor S.

Por lo general, i_g se consigue mediante la sustitución de E_{GG} por un generador de impulsos de tensión.

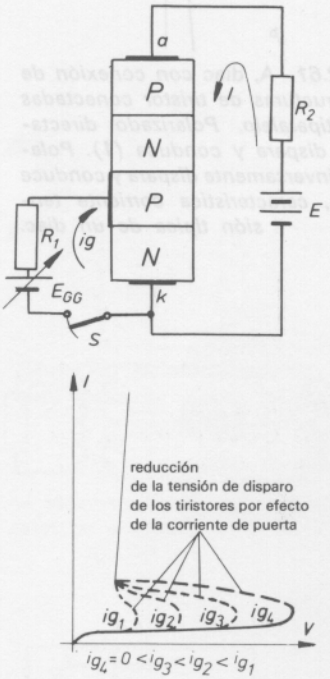


Fig. 12.58 Característica de un tiristor en función de la corriente de disparo.

2.º *Aplicaciones.* El rectificador controlado de silicio (SCR) se utiliza para la rectificación de grandes potencias. La corriente I es del orden de 100 A o más. En la figura 12.59 pueden observarse algunos tiristores y su símbolo.

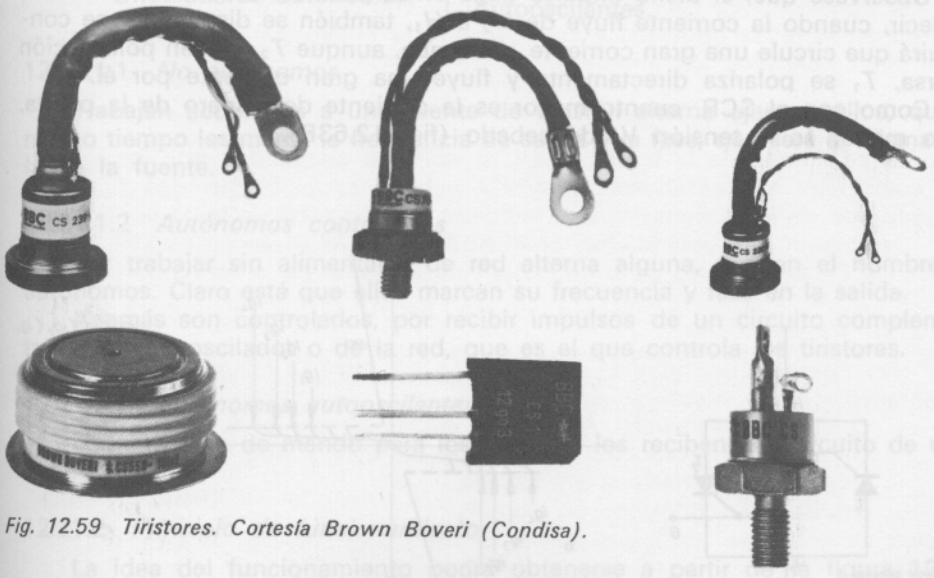


Fig. 12.59 Tiristores. Cortesía Brown Boveri (Condisa).

12.20.2.2 *Diac (diodo alternativo de corriente)*

Otra estructura, derivada de la familia de los tiristores, la constituye el diac (fig. 12.60).

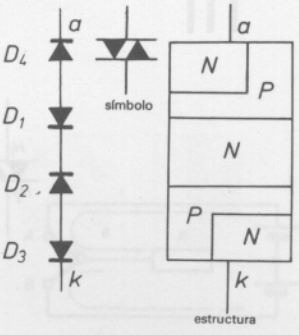


Fig. 12.60 Estructura y símbolo del diac.

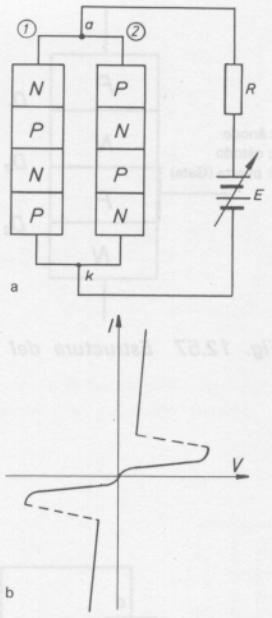


Fig. 12.61 A, diac *con conexión de las estructuras de tiristor conectadas en antiparalelo. Polarizado directamente dispara y conduce (1). Polarizado inversamente dispara y conduce (2);* B, *característica corriente tensión típica de un diac.*

Aunque no del todo correctamente, puede decirse que el diac es como dos estructuras de tiristor conectadas en antiparalelo (fig. 12.61A).

1.º *Fundamentos.* Para ver cómo funciona, basta fijarse en la figura anterior. Si se polariza directamente (a +, K −), al variar *E*, se llega a producir la tensión de disparo en (1) y, como consecuencia, su característica es idéntica a la del tiristor (1); si, por el contrario, se polariza negativamente (a−, K+), se produce la tensión de disparo (2) y su característica es idéntica a la anterior, pero invertida (fig. 12.61B).

2.º *Aplicaciones.* El diac, cuyo símbolo se puede observar en la figura 12.60, se utiliza en algunos circuitos para proporcionar los impulsos que abran al triac (fig. 12.62).

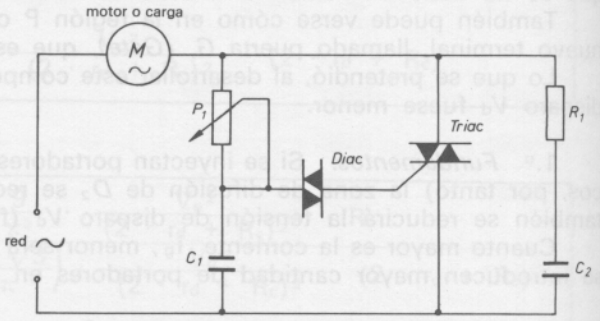


Fig. 12.62 Circuito de utilización diac para control de un triac.

12.20.2.3 *Triac (triodo alternativo de corriente)*

El triac es un componente semiconductor similar al diac, pero que consta de una puerta para controlar la tensión de disparo, tanto en sentido positivo como negativo.

También se conoce a este componente como tiristor bidireccional, ya que se puede suponer como dos SCR conectados en antiparalelo (fig. 12.63A).

1.º *Fundamentos.* De la misma forma que el *tiristor o SCR,* el *triac,* una vez disparado el impulso que excita la puerta, conduce en un sentido hasta que la tensión decrece por debajo de 1 V (la menor tensión de funcionamiento V_f); y no vuelve a conducir mientras no llegue un nuevo impulso que lo vuelva a disparar.

Obsérvese que, si dicho impulso llega en la polarización inversa del triac, es decir, cuando la corriente fluye de H_2 a H_1, también se disparará y se conseguirá que circule una gran corriente, dado que, aunque T_2 esté en polarización inversa, T_1 se polariza directamente y fluye una gran corriente por él.

Como con el SCR, cuanto mayor es la corriente de disparo de la puerta, tanto menor es la tensión V_d de cebado (fig. 12.63B).



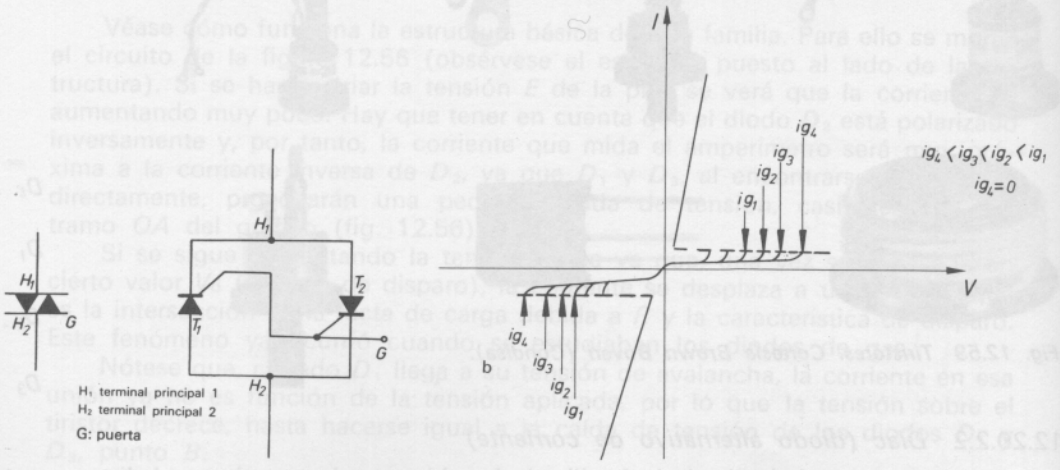


Fig. 12.63 A, *triac con conexión de los* SCR *en antiparalelo. Símbolo y fotografía;* B, *gráfica corriente/tensión del triac.*

2.º *Aplicaciones.* Por la propiedad de circular corriente en los dos sentidos, se utiliza como interruptor de máquinas de corriente alterna gobernadas electrónicamente. El circuito electrónico de mando le genera los impulsos de disparo, los cuales se aplican a la puerta, con lo que dejará pasar la *c. a.,* siempre que el circuito le mande los impulsos. Cuando no lo haga, se comportará como un circuito abierto. En la figura 12.64 se ve el circuito de mando de un motor con *triac* gobernado por un circuito integrado.

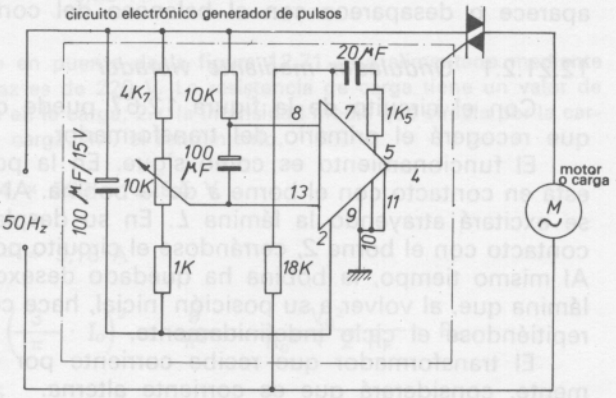


Fig. 12.64 Circuito electrónico de mando de un triac.

12.21 Onduladores

Los dispositivos destinados a la obtención de corriente alterna a partir de corriente continua reciben el nombre de *onduladores.*

Para conseguir este propósito, los circuitos generalmente se basan en válvulas de gas y en transistores, pero sobre todo en tiristores, que proporcionan mayor rendimiento, mayor duración y más seguridad.

Por todo ello, en este apartado será a los onduladores con tiristores a los que más importancia se les dará.

12.21.1 *Clasificación*

Pueden agruparse del siguiente modo:

— Onduladores no autónomos

— Onduladores autónomos { Controlados. / Autooscilantes.

12.21.1.1 *No autónomos*

Trabajan acoplados a una fuente de tensión alterna ajena a ellos, que al mismo tiempo les marca la frecuencia de salida y la fase, que será la misma que la de la fuente.

12.21.1.2 *Autónomos controlados*

Por trabajar sin alimentarse de red alterna alguna, reciben el nombre de autónomos. Claro está que ellos marcan su frecuencia y fase en la salida.

Además son controlados, por recibir impulsos de un circuito complementario llamado oscilador o de la red, que es el que controla los tiristores.

12.21.1.3 *Autónomos autooscilantes*

Los impulsos de mando para los tiristores los reciben del circuito de utilización.

12.21.2 *Principio de funcionamiento*

La idea del funcionamiento podrá obtenerse a partir de la figura 12.65.

Estando el conmutador en la posición *A*, la corriente eléctrica circulará por la resistencia de carga en el sentido indicado por la flecha de línea continua.

Pasando el conmutador a la posición *B*, la corriente hará el recorrido indicado por la flecha de línea de trazos.

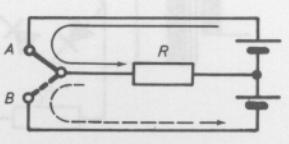


Fig. 12.65 Ondulador electromecánico.

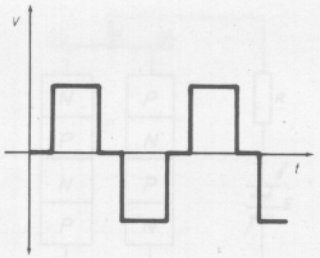


Fig. 12.66 Tensión en bornes de la resistencia de carga.

Haciendo que el conmutador cambie de posición con rapidez, la resistencia de carga recibirá la corriente por un extremo distinto en cada cambio, pudiéndose asegurar que esto es corriente alterna.

La frecuencia dependerá de la velocidad con que el conmutador cambie de posición, y desde luego se obtendría una corriente alterna pero no senoidal (fig. 12.66), ya que mientras el conmutador esté sin tocar uno u otro borne, no circula corriente por *R*, consiguiéndose variaciones perpendiculares al eje de abscisas, puesto que la corriente ni crece ni decrece gradualmente, sino que aparece o desaparece con el balanceo del conmutador.

12.21.2.1 *Ondulador mediante vibrador*

Con el circuito de la figura 12.67 puede obtenerse una corriente alterna que recogerá el primario del transformador.

El funcionamiento es como sigue. En la posición de reposo, la lámina *L* está en contacto con el borne *a* de la bobina. Al cerrar el interruptor *I*, la bobina se excitará atrayendo la lámina *L*. En su desplazamiento, la lámina ha hecho contacto con el borne *2*, cerrándose el circuito por el primario del transformador. Al mismo tiempo, la bobina ha quedado desexcitada y ha dejado de atraer la lámina que, al volver a su posición inicial, hace contacto con el borne *1* y con *a*, repitiéndose el ciclo indefinidamente.

El transformador que recibe corriente por extremos opuestos alternativamente, considerará que es corriente alterna.

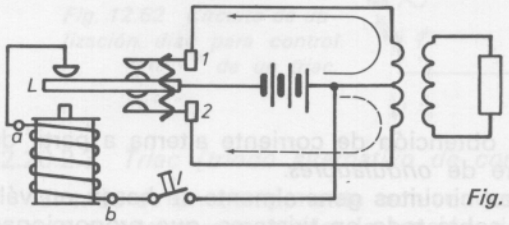


Fig. 12.67 Vibrador.

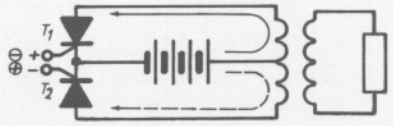


Fig. 12.68 Ondulador mediante vibrador a tiristores.

12.21.3 *Ondulador mediante vibrador de tiristores*

Disponiendo del circuito de la figura 12.68, al introducir una señal que polarice positivamente la puerta de T_1 el tiristor conducirá, y la corriente hará el recorrido indicado por la flecha de trazo continuo. T_2 permanece bloqueado.

Invirtiendo las polaridades, conducirá T_2; T_1 quedará bloqueado, y el recorrido de la corriente será el indicado por la flecha de trazos.

El transformador será recorrido por una corriente que circulará alternativamente en sentidos opuestos y cuya frecuencia dependerá de la velocidad con que sean aplicados los impulsos.

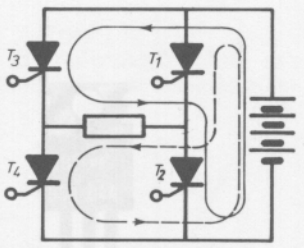


Fig. 12.69 Ondulador en puente.

12.21.4 *Ondulador en puente*

En el circuito de la figura 12.69, al polarizar adecuadamente los tiristores, se conseguirá que conduzcan T_3 y T_2; permanecerán bloqueados T_4 y T_1; y el recorrido de la corriente será el indicado por la flecha de trazo continuo.

Cambiando las polaridades, conducirán T_4 y T_1 y permanecerán bloqueados T_3 y T_2; el recorrido de la corriente será ahora, el de la flecha de trazos.

12.21.5 *Generalidades*

Hay infinidad de circuitos que llevan a los mismos resultados ya descritos y simplemente se nombran algunos aquí para conocimiento general:

— Ondulador reversible. Actúa con rectificador u ondulador.
— Ondulador en cascada. Utiliza dos baterías y dos tiristores.
— Onduladores trifásicos en estrella.
— Onduladores trifásicos en puente.

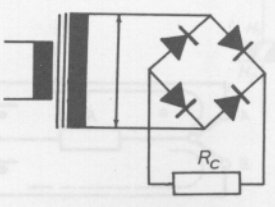


Fig. 12.70 Rectificador en puente.

Ejemplos prácticos

A un circuito rectificador en puente como el de la figura 12.70 se le aplica una tensión en sus bornes de entrada, con valor eficaz de 220 V. Calcular: 1.º, el valor de la tensión media en la carga; 2.º, la intensidad media que circula por la carga; 3.º, intensidad media que suministrará cada uno de los diodos cuando se hallen en polarización directa.

La resistencia de carga tiene un valor de 100 Ω.

1.º $V_{med.} = \frac{2 \times \sqrt{2}}{\pi} \cdot V = \frac{2 \times \sqrt{2}}{\pi} \times 220 = 198$ V

2.º $I_{med.} = \frac{V_{med.}}{R_C} = \frac{198}{100} = 1{,}98$ A

3.º $I_{F1} = I_{F2} = \frac{I_F}{2} = \frac{1{,}92}{2} = 0{,}99$ A

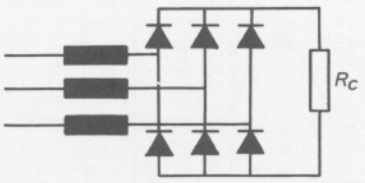


Fig. 12.71 Rectificador trifásico en puente.

El circuito rectificador trifásico en puente de la figura 12.71 está alimentado mediante una tensión alterna cuyo valor eficaz es de 220 V. La resistencia de carga tiene un valor de 25 Ω. Calcular: 1.º, la tensión media en la carga; 2.º, la intensidad media que circula por la carga; 3.º, la potencia continua en la carga; 4.º, el rendimiento.

1.º $V_{med.} = 1{,}04 \cdot V = 1{,}04 \times 220 = 229{,}5$ V

2.º $I_{med.} = \frac{V_{med.}}{R_c} = \frac{229}{25} = 9{,}18$ A

3.º $P_{cc} = R_c \cdot I_{cc}^2 = R_c \cdot \left(\frac{3}{\pi} \cdot I_o\right)^2 = \frac{9}{\pi^2} \cdot \frac{V_o^2}{R_c^2 + 2\,R_F} \cdot R_c$

Al ser $V_o = \frac{V_{med.}}{0{,}95} = \frac{229{,}5}{0{,}95} = 241$ V, suponiendo despreciable la resistencia directa de los diodos, y sustituyendo, resulta:

$$P_{cc} = \frac{9}{\pi^2} \cdot \frac{241^2}{25^2} \cdot 25 = 211{,}39 \text{ W}$$

4.º $\eta = 0{,}998 \cdot \frac{1}{1 + \frac{2\,R_F}{R_c}} \approx 0{,}998 \cdot \frac{1}{1} = 0{,}998$

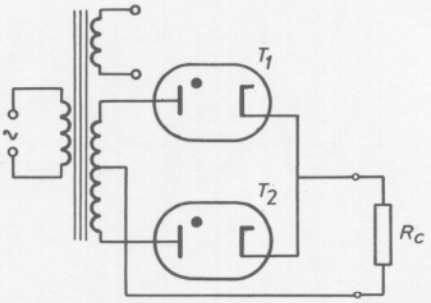


Fig. 12.72 Rectificador de onda completa mediante diodos de gas.

Se han empleado dos diodos de gas conectados como se ve en la figura 12.72, los cuales tienen una tensión de cebado de 17,5 V y la de arco son 12 V. Se desea que por la carga circule una intensidad media máxima de 3,5 A. Si se obtiene una tensión de 2 300 V de tensión eficaz entre cada bobinado del secundario, calcular: 1.º, la tensión media en la carga; 2.º, la resistencia de carga mínima que deberá colocarse en el circuito sin peligro de cortocircuito; 3.º, tensión de pico que soportará cada diodo; 4.º, la potencia continua máxima obtenida.

1.º $V_o = \sqrt{2} \times 2\,300 = 3\,252{,}6$ V

$$V_{med.} = \frac{2 \cdot V_o}{\pi} - V_{arc} = \frac{2 \times 3\,252{,}6}{\pi} - 12 = 1\,023{,}8 \text{ V}$$

2.º $R_c = \frac{V_{med.}}{I_{med.}} = \frac{1\,023{,}8}{3{,}5} = 292{,}51\ \Omega$

3.º La tensión inversa a la que se someterá a cada diodo será doble de la que existe en cada salida del secundario del transformador:

$$2 \cdot V_o = 2 \times 3\,252{,}6 = 6\,505{,}2 \text{ V}$$

4.º $P_{cc} = I_{med.}^2 \cdot R_c = 3{,}5 \times 292{,}51 = 1\,023{,}78$ W

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Montar los circuitos rectificadores y onduladores descritos en el tema y comprobar lo dicho en las descripciones precedentes. Realizar un trabajo teórico-práctico.

— Realícese un trabajo teórico sobre aplicaciones industriales concretas, en las que intervengan un rectificador y un ondulador.

CUESTIONARIO

12.1 ¿Qué es necesario para poner en funcionamiento un rectificador de mercurio?

12.2 Explicar las ventajas de los rectificadores de vapor de mercurio de ampolla metálica, frente a los de ampolla de vidrio.

12.3 ¿Qué diferencias hay en el funcionamiento entre el ánodo de encendido de las válvulas de vapor de mercurio y el ignitor de los ignitrones?

12.4 ¿Cuándo se produce el descebado del ignitrón?

12.5 ¿Para qué sirve la R_g conectada en la rejilla del tiratrón?

12.6 Polarizando con corriente continua la rejilla de mando del tiratrón, ¿entre qué ángulos podemos controlar el tiratrón?

12.7 El control mediante corriente alterna superpuesta a una corriente continua, ¿qué nombre recibe?

12.8 Cuáles son las diferencias, en cuanto a características se refiere, entre el diodo de silicio y germanio.

12.9 Un rectificador de media onda utiliza un diodo de gas que puede suministrar a la carga de 2K7, una intensidad media máxima de 0,5 A, estando conectado a una fuente de corriente alterna que da una tensión en bornes de 1 200 V. La tensión de arco es de 12 V y la de cebado de 18,5 V. Se desea averiguar: 1.º, la tensión media en la carga; 2.º, la intensidad eficaz suministrada por la fuente de corriente alterna.

12.10 Un rectificador en puente trifásico, cuya tensión eficaz aplicada es de 425 V, tiene conectada una carga de 60 Ω. Calcular: 1.º, tensión media en la carga; 2.º, intensidad media que circula por la carga; 3.º, potencia continua en la carga; 4.º, intensidad que circulará por cada rectificador polarizado directamente; 5.º, tensión inversa que soportarán los diodos.

BIBLIOGRAFIA

Revistas *Fagor Electrotécnica* S. C. I.

LECLERCQ GUY A., *Transistores y semiconductores industriales,* Marcombo, S. A., Barcelona 1975.

BERGTOLD, *Circuitos con triacs, diacs y tiristores,* Gustavo Gili, Barcelona 1974.

Transformadores convertidores, Enciclopedia CEAC de Electricidad, Ediciones CEAC, S. A., Barcelona 1974.

Tema 13. **Técnicas de iluminación**



OBJETIVOS

— *Conocimiento de las magnitudes fundamentales de Luminotecnia.*
— *Enumerar las diferentes fuentes de luz.*
— *Analizar el funcionamiento de cada una.*
— *Demostrar la necesidad de los accesorios de algunos tipos de lámparas.*
— *Aplicar el cálculo a la iluminación de pequeños locales.*
— *Reconocer los tipos de fuentes de luz y aparatos que hay que instalar en los alumbrados publicitarios.*

GUION

— Naturaleza de la luz.
— Clasificación de las radiaciones electromagnéticas.
— Magnitudes fundamentales.
— Fórmulas fundamentales en Luminotecnia.
— Fuentes de luz.
— Incandescencia.
— Tipos de lámparas incandescentes.
— Lámparas de descarga.
— Fluorescencia.
— Composición de las lámparas de descarga.
— Lámparas de vapor de mercurio.
— Lámparas de luz mezcla.
— Lámparas de sodio.
— Tubos fluorescentes. Composición.
— Sistemas de arranque de los tubos fluorescentes.
— Cálculo de un alumbrado interior. Ejemplo de cálculo.
— Alumbrados publicitarios.

PUNTOS CLAVE

— Iniciación al conocimiento de las diferentes fuentes de luz.
— Consideración de las características de cada una.
— Conocer el proceso que se debe seguir en la iluminación de locales.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— No se precisa de conocimientos previos.

EXPOSICION DEL TEMA

13.1 **Naturaleza de la luz**

La luz es una de las manifestaciones de la energía, al igual que la electricidad, el calor, etc. La diferencia de ésta con algunas de las otras manifestaciones energéticas es que no precisa de un medio material para propagarse, como lo necesita la electricidad, y el calor, por ejemplo.

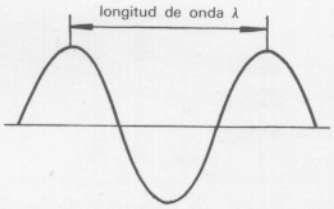


Fig. 13.1 Longitud de onda y período de una radiación.

Varias fueron las teorías que de la luz fueron dando los investigadores como Newton, Huyghens, Maxwell, Epstein, etc., pero fue Broglie (en 1924) quien, uniendo las diferentes teorías anteriores, nos da la suya, hasta ahora válida, de la *radiación.*

13.1.1 *Radiación*

Se designa con el término general de *radiación* la transmisión de energía a través del espacio sin soporte material. Este transporte se efectúa por la propagación de radiaciones. Es decir, de perturbaciones periódicas del estado electromagnético del espacio.

Todas las radiaciones electromagnéticas poseen una propiedad común: consiste en que su velocidad de propagación en el vacío es la misma para todas ellas, siendo su valor de unos 300 000 km/s aproximadamente. A pesar de ello, cada tipo de radiación puede definirse y distinguirse de las demás por una de las tres características que se especifican a continuación:

13.1.1.1 *Características de las radiaciones*

Frecuencia. Es una propiedad absolutamente invariable de la misma y puede definirse como *el número de ciclos completos efectuados por una radiación durante un segundo.* Se expresa en ciclos por segundo o en cualquiera de sus múltiplos (kilociclo o megaciclo), la unidad es el *hertzio* (Hz) y se designa por la letra *f.*

Período. Es también una característica invariable de la misma y se define como *el tiempo que tarda una radiación en recorrer un ciclo.* Se expresa en segundos y se representa por la letra *T.* Es fácil deducir que el período es igual a la inversa de la frecuencia (fig. 13.1).

Longitud de onda. Es una propiedad no invariable de la misma, que se define como *el camino recorrido por una radiación durante un período.*

Las longitudes de onda se expresan en unidades de longitud y se representan por medio de la letra griega λ (lambda). La longitud de onda no es una característica invariable, puesto que la velocidad de las radiaciones electromagnéticas depende de la naturaleza del medio a través del cual se propagan.

A pesar de que la longitud de onda no es una característica invariable de las radiaciones, será más utilizada que la frecuencia por razones de costumbre y facilidad, ya que las frecuencias de las radiaciones visibles son extraordinariamente elevadas.

Las unidades más empleadas para medir la longitud de onda son: el *angstrom* (Å), que vale una diezmillonésima de milímetro; y la *micra* (μ), que vale una milésima de milímetro.

13.2 **Clasificación de las radiaciones electromagnéticas**

Hay un número infinito de radiaciones electromagnéticas simples, que pueden clasificarse tanto en función de su forma de generarse como por sus manifestaciones o efectos; o también, según las características propias que se han definido en el apartado anterior.

La clasificación más usada es la que se basa en las longitudes de onda (fig. 13.2).

De entre todas ellas, las radiaciones visibles ocupan una franja muy estrecha, comprendida aproximadamente entre 3 800 y 7 800 Å.

13.3 **Luminotecnia**

Es la ciencia que estudia las distintas formas de producción de luz, así como su control y aplicación.

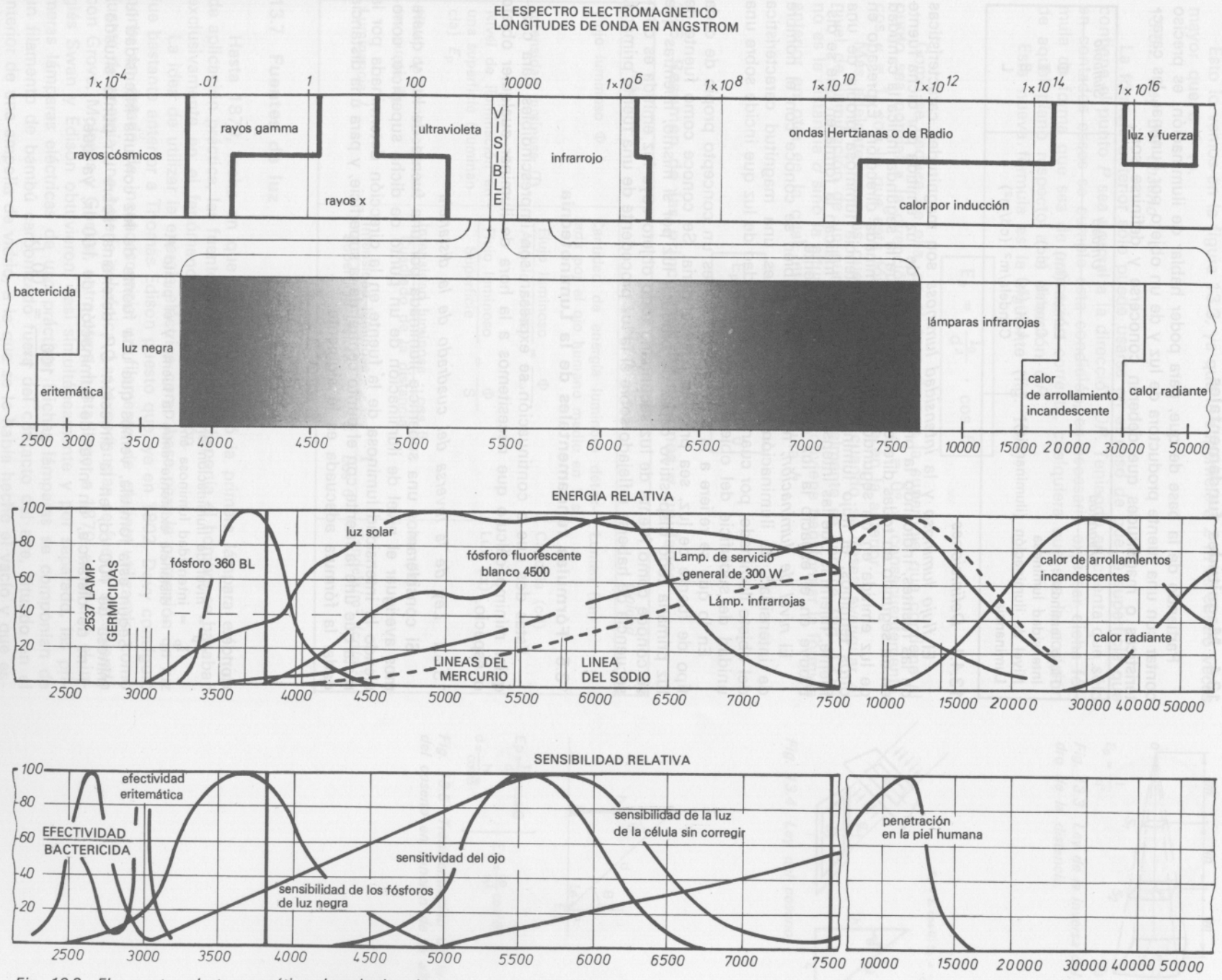


Fig. 13.2 El espectro electromagnético. Longitudes de onda en Angstrom.

13.4 Magnitudes fundamentales

Partiendo de la base de que, para poder hablar de iluminación, es preciso contar con una fuente productora de luz y de un objeto por iluminar, las características o magnitudes que deberán conocerse y definirse son:

Magnitud	*Unidad*	*Símbolo*
Flujo luminoso	Lumen (lm)	Φ
Intensidad luminosa	Candela (cd)	I
Nivel de iluminación (iluminancia)	Lux (lx)	E
Luminancia	Candela/m² (cd/m²)	L

13.4.1 *Definiciones*

El *flujo luminoso* y la *intensidad luminosa* son magnitudes características de las fuentes, indicando la primera la cantidad de luz emitida por dicha fuente en un segundo en todas direcciones, mientras que la segunda indica la cantidad de luz emitida en un segundo y en una determinada dirección. Expresado en otros términos, el flujo luminoso indica la potencia luminosa propia de una fuente, mientras que las intensidades luminosas indican la forma en que se distribuye en el espacio la luz emitida por la fuente.

El *nivel de iluminación,* magnitud que también se conoce con el nombre de intensidad de iluminación o iluminancia, es una magnitud característica del objeto iluminado, por cuanto indica la cantidad de luz que incide sobre una unidad de superficie del objeto iluminado.

En lo que se refiere a la *luminancia,* éste es un concepto propio de cada tipo de fuente de luz, sea primaria o secundaria. Se conoce como fuente de luz primaria todo dispositivo capaz de producir luz por sí mismo, mientras que se conoce como fuente de luz secundaria todo objeto cuya luz emitida es consecuencia de haberse reflejado sobre él la luz procedente de una fuente primaria.

13.5 Fórmulas fundamentales de la Luminotecnia

Estas dos que a continuación se expresan son imprescindibles para cualquier mínimo cálculo que necesitemos a la hora de iluminar cualquier objeto o espacio.

13.5.1 *Ley de la inversa del cuadrado de la distancia*

Si consideramos una superficie iluminada por una fuente de luz y queremos averiguar el nivel de iluminación de un punto de dicha superficie, conociendo la intensidad luminosa de la fuente en la dirección determinada por la recta que une la fuente con el punto central de la superficie, y para una distancia dada, la fórmula adecuada es la siguiente:

$$E_p = \frac{I_p}{d^2}$$

donde:

E_p = nivel de iluminación en el punto *P*;
I_p = intensidad luminosa en la dirección *OP*;
d = distancia existente entre la fuente y el punto *P*.

Según esta fórmula, vemos que una fuente de luz con una intensidad luminosa de 100 cd, en la dirección *OP*, determina, sobre un punto situado a 1 m de distancia, un nivel de iluminación de 100 lx, ya que:

$$E_p = \frac{100}{1^2} = 100 \text{ lx}$$

Ahora bien, si el punto está situado a 2 m únicamente, obtendremos:

$$E_p = \frac{100}{2^2} = 25 \text{ lx}$$

o sea, una cuarta parte.

Esto lo vemos en la figura 13.3, ya que la superficie a 2 m es cuatro veces mayor que a 1 m.

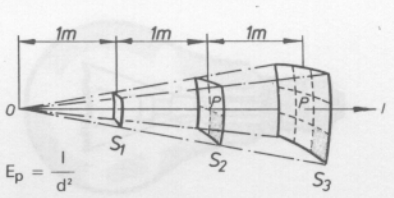


Fig. 13.3 Ley de la inversa del cuadro de la distancia.

13.5.2 *Ley del coseno*

La fórmula anterior sólo puede usarse en el caso de que la superficie que contiene el punto *P* sea normal a la dirección *OP*. Teniendo en cuenta que sólo en contados casos se cumple esta condición, es necesario expresar dicha fórmula de forma que sea de aplicación correcta, cualquiera que sea la posición de aquel plano respecto a la dirección *OP*.

Esta nueva fórmula es la siguiente (fig. 13.4):

$$E_p = \frac{I_\theta}{d^2} \cdot \cos \theta$$

Como se deduce de ella, en el caso de que la superficie que contiene al punto sea normal a la dirección *OP*, el ángulo $\alpha = 0°$ y, consecuentemente, $\cos \alpha = 1$, con lo que esta fórmula se convierte en la anterior.

Más adelante veremos que, en la práctica, cuando se desea averiguar el nivel de iluminación de un punto, lo que generalmente se conoce (fig. 13.5) no es la distancia *d* sino la altura *h*, por lo cual conviene transformar la fórmula anterior en otra en la cual intervenga dicha altura *h*.

$$E_p = \frac{I_\theta}{h^2} \cdot \cos^3 \theta$$

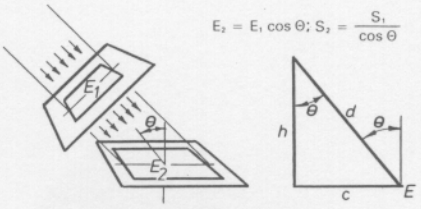


Fig. 13.4 Ley del coseno.

13.6 Resumen de las principales definiciones y unidades

Magnitud	*Definición*	*Unidad*
Flujo luminoso Φ	Cantidad de energía luminosa detectada por el ojo humano medio en 1 s	Lumen (lm)
Intensidad luminosa (I)	$\frac{\text{Flujo luminoso}}{\text{Angulo sólido}} = \frac{\Phi}{\omega}$	Candela (cd)
Nivel de iluminación en una superficie (iluminancia) E_p	$\frac{\text{Flujo luminoso}}{\text{Superficie}} = \frac{\Phi}{S}$	Lux (lx)
Nivel de iluminación en un punto E_p	$\frac{\text{Intensidad luminosa} \cdot \cos\theta}{\text{Cuadrado de la distancia}}$	lux (lx)
Luminancia *L*	$\frac{\text{Intensidad luminosa}}{\text{Superficie visible}} = \frac{I}{S \cdot \cos\theta}$	Candela/m² (cd/m²)

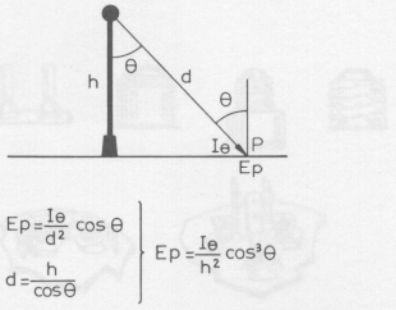


Fig. 13.5 Transformación de la ley del coseno en función de la altura.

13.7 Fuentes de luz

Hasta 1879, fecha en que Edison construyó la primera lámpara eléctrica de aplicación práctica, las fuentes de luz de que disponía el hombre se basaban exclusivamente en el fenómeno de la combustión.

La idea de utilizar la energía eléctrica como base para la obtención de luz fue bastante anterior a Thomas Edison puesto que, ya en 1802, Davy consiguió poner en estado de incandescencia un filamento de platino utilizando como fuente de energía una batería galvánica. Las experiencias se fueron sucediendo con Grove, Molenys y Goebel, entre otros, hasta llegar a 1870, en el que el inglés Swan y Edison obtuvieron, casi simultáneamente y por separado, las primeras lámparas eléctricas de uso práctico. Dichas lámparas se componían de un filamento de bambú carbonizado fuera del contacto del aire, situado en el interior de una ampolla de vidrio, a la que se le había hecho el vacío y que estaba rematada por un casquillo de conexión que, en la lámpara de Edison, era roscado, mientras que, en la de Swan, era de tipo bayoneta.

A partir de entonces, el avance de la técnica de transformación de energía eléctrica en luz ha sido incesante, mejorándose las características de las lámparas incandescentes ya mencionadas y apareciendo nuevos tipos de fuentes de luz basados en fenómenos distintos de la incandescencia.

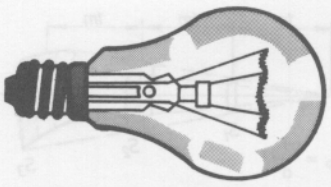


Fig. 13.6 Lámpara de incandescencia.

Los sistemas de mayor uso en la actualidad son:

— incandescencia;
— descarga a través de un gas;
— fluorescencia;
— electroluminiscencia.

Excepto la electroluminiscencia, cuyo desarrollo es todavía bastante reducido, los otros tres sistemas están ampliamente difundidos, por lo que, a continuación, se describirán las principales características, tanto constructivas como lumínicas, de las lámparas basadas en dichos sistemas.

13.8 **Incandescencia**

La incandescencia es un sistema en el que la luz se genera como consecuencia del paso de una corriente eléctrica a través de un filamento conductor.

Los principales componentes de las lámparas de incandescencia son los siguientes (fig. 13.6).

13.8.1 *Filamento*

Es un elemento conductor de resistencia media que, al paso de una corriente eléctrica, se pone incandescente emitiendo luz.

Al principio se usaban materias como carbón, osmio, tantalio; pero, en la actualidad, el material de uso exclusivo es el tungsteno o wolframio, cuya temperatura de fusión es de unos 3 400 °C aproximadamente, lo que permite una temperatura de funcionamiento relativamente elevada y, consecuentemente, una mayor vida, así como también un más elevado rendimiento luminoso en comparación con los obtenidos con los filamentos construidos con las sustancias antes citadas.

La vida o duración de los filamentos viene condicionada por el llamado fenómeno de evaporación. Dicho fenómeno consiste en que, a medida que un filamento se calienta, emite partículas que van adelgazándolo, hasta que se produce, finalmente, la rotura y la consiguiente muerte de la lámpara.

La velocidad de volatilización depende de la temperatura, por lo que será preciso no sobrepasar cierto límite si se quiere obtener una duración aceptable que, en la mayor parte de los tipos de lámparas incandescentes, se cifra en 1 000 horas.

Para evitar este fenómeno, se arrollan los filamentos en forma de hélice, al tiempo que se rellena la ampolla con un gas inerte a una determinada presión.

El gas de relleno, cuya misión consiste en frenar la volatilización, acostumbra a ser una mezcla de argón y nitrógeno, en proporciones que varían de acuerdo con la potencia de la lámpara, aunque, en algunos tipos de lámparas especiales, se utiliza criptón y también xenón.

En la figura 13.7, pueden verse diversos tipos de filamentos.

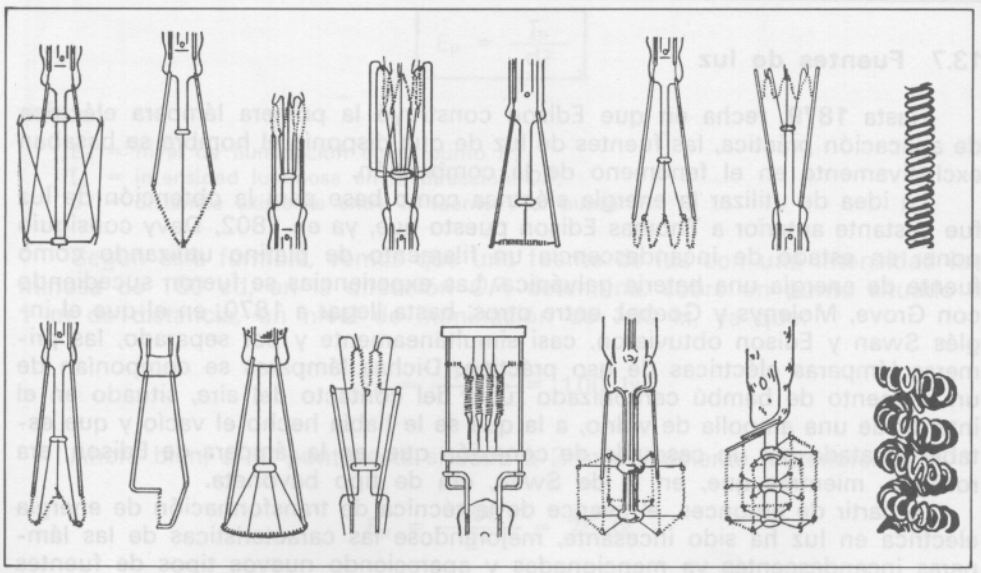


Fig. 13.7 Tipos de filamentos.

13.8.2 *Ampolla*

Las ampollas de las lámparas incandescentes tienen por objeto, junto con el casquillo, aislar al filamento del medio ambiente y, al mismo tiempo, permitir la evacuación del calor emitido por aquél.

Si un filamento se pusiera en estado incandescente en contacto con la atmósfera, el oxígeno presente en ésta produciría su rotura.

Por otra parte, la gran cantidad de calor radiado por el filamento debe ser evacuado para que su temperatura se mantenga dentro de unos límites correctos.

Las formas y tamaños de las ampollas dependerán de la potencia y aplicaciones. Las formas más usuales en el mercado pueden verse en la figura 13.8.

En lo que se refiere a la composición de las ampollas, por lo general, son de vidrio blando soplado aunque, en determinados casos, se utilizan vidrios especiales e incluso cuarzo.

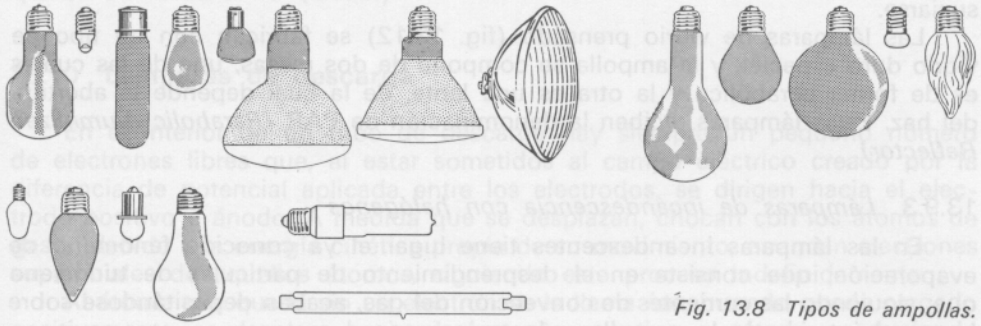


Fig. 13.8 Tipos de ampollas.

13.8.3 *Casquillo*

El casquillo es un elemento cuya misión fundamental consiste en conectar la lámpara a la red de alimentación. Hay una gran diversidad de formas y dimensiones; algunas de ellas se pueden ver en la figura 13.9.

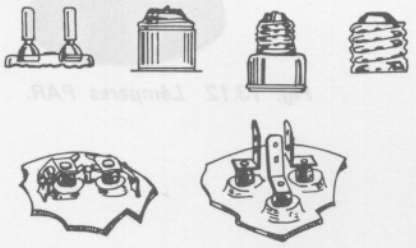


Fig. 13.9 Tipos de casquillos.

13.9 Clases de lámparas incandescentes

Hay un èlevado número de tipos de lámparas incandescentes que se diferencian por sus filamentos, ampollas y casquillos, aunque, para aplicaciones luminotécnicas comunes, se usan exclusivamente tres clases que son: las lámparas estándar, las lámparas con reflector y las lámparas halogenadas.

13.9.1 *Lámparas estándar*

Son las lámparas más utilizadas; su forma y detalles constructivos son los ya indicados en la figura 13.6.

Las características lumínicas y dimensionales de las lámparas estándar se indican en la tabla 13.10.

Tabla 13.10 Características lumínicas y dimensionales de lámparas estándar

Potencia (W)	*Flujo luminoso (lm)*		*Relleno*	*Filamento*	*Diámetro (mm)*	*Longitud (mm)*
	125 V	*220 V*				
15	135	120	Vacío	Esp. senc.	60	109
25	—	230	Vacío	Esp. senc.	60	109
25	260	—	Gas	Esp. doble	60	109
40	490	430	Gas	Esp. doble	60	109
60	820	730	Gas	Esp. doble	60	109
75	1 070	960	Gas	Esp. doble	60	109
100	1 560	1 380	Gas	Esp. doble	60	109
150	2 340	2 100	Gas	Esp. doble	80	148,5
200	3 250	2 920	Gas	Esp. doble	80	169,5
300	—	4 750	Gas	Esp. doble	90	183
300	5 100	—	Gas	Esp. senc.	90	188
500	9 300	8 400	Gas	Esp. senc.	110	239
1 000	20 000	18 800	Gas	Esp. senc.	150	308
1 500	31 000	30 000	Gas	Esp. senc.	170	343
2 000	43 000	40 000	Gas	Esp. senc.	200	358



Fig. 13.11 Lámpara de incandescencia con reflector (ampolla de vidrio soplado).

13.9.2 *Lámparas incandescentes reflectoras*

Hay dos clases de lámparas reflectoras: las de vidrio soplado y las de vidrio prensado.

Las primeras (fig. 13.11) son lámparas de incandescencia cuya ampolla presenta una forma especial, generalmente parabólica o elíptica, en cuyo interior existe un recubrimiento de una sustancia altamente reflectora, normalmente aluminio o plata, que permite obtener un control directo del flujo luminoso bastante preciso.

Las ventajas conseguidas con esta clase de lámparas son:

a) Un control direccional del flujo luminoso emitido y, por consiguiente, la posibilidad de prescindir de la luminaria.

b) Un factor de conservación del flujo luminoso más elevado, como consecuencia de que, al estar el reflector en el interior de la ampolla, no puede ensuciarse.

Las lámparas de vidrio prensado (fig. 13.12) se fabrican con un tipo de vidrio duro especial, y la ampolla se compone de dos piezas, una de las cuales es de forma parabólica y la otra es una lente, de la cual depende la abertura del haz. Estas lámparas reciben la denominación de PAR *(Parabolic Aluminized Reflector).*

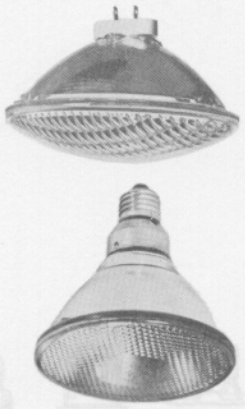


Fig. 13.12 Lámparas PAR.

13.9.3 *Lámparas de incandescencia con halógenos*

En las lámparas incandescentes tiene lugar el ya conocido fenómeno de evaporación, que consiste en el desprendimiento de partículas de tungsteno que, siguiendo las corrientes de convección del gas, acaban depositándose sobre la pared interior de la ampolla y la ennegrecen.

Si al gas de relleno se le añade una pequeña cantidad de yodo en forma de yoduro, en las zonas en que la temperatura sea inferior a 600 °C tiene lugar una reacción química, en virtud de la cual un átomo de tungsteno se combina con dos átomos de yodo y da como resultado un compuesto llamado yoduro de tungsteno.

Cuando las moléculas de este nuevo compuesto se aproximan al filamento, zona en la que la temperatura es superior a los 2 000 °C, se produce la reacción contraria, es decir, la disociación del yodo y el tungsteno, depositándose este último sobre el filamento y siguiendo el yodo el camino determinado por las corrientes de convección.

13.9.3.1 *Ventajas de las lámparas halogenadas*

Las ventajas que poseen las lámparas halogenadas sobre las estándar son las siguientes:

1.ª Una vida media bastante superior, cifrada en unas 2 000 horas, debida tanto a la menor evaporación del tungsteno (consecuencia de la mayor presión del gas de relleno) como a la reposición, sobre el filamento, del tungsteno evaporado.

2.ª Un factor de conservación sensiblemente más elevado; ello se debe a la acción limpiadora que el yodo lleva a cabo en la pared de la ampolla.

3.ª Unas dimensiones mucho más reducidas; debido a ello, es posible conseguir un control más preciso del haz luminoso.

13.9.3.2 *Clases de lámparas halogenadas*

Hay dos clases principales: lámparas de casquillos cerámicos, o de cuarzo yodo, y lámparas de doble envoltura; pueden verse ambas en la figura 13.13.

Las primeras están compuestas por una ampolla cilíndrica de diámetro muy reducido, en cuyo interior se encuentra un filamento de tungsteno arrollado en espiral simple, sumergido en una atmósfera compuesta de argón, nitrógeno y un halógeno, que acostumbra a ser yodo. Los dos extremos de la ampolla

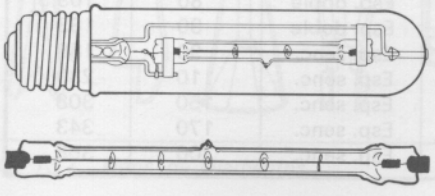


Fig. 13.13 Lámparas halogenadas, de doble envoltura y de casquillos cerámicos.

están cerrados por sendos casquillos de material cerámico, que protegen los contactos de conexión.

La posición de estas lámparas debe ser horizontal, con una inclinación máxima de 4°. En cuanto a su manipulación, deben tomarse precauciones debido a que el cuarzo se *desvitrifica* con mucha facilidad cuando sobre él se depositan materias grasas o simplemente sudor, siendo preciso en estos casos lavar las lámparas con alcohol o agua jabonosa y secarlas posteriormente.

Para evitar la desvitrificación y, al mismo tiempo, permitir el funcionamiento de la lámpara en cualquier posición, se han creado las lámparas llamadas de doble envoltura, en las que el tubo de cuarzo está situado en el interior de un segundo tubo de vidrio normal, cuya misión consiste en proteger el tubo de cuarzo y, al mismo tiempo, proporcionarle el equilibrio térmico que precisa para su buen funcionamiento. Para la conexión de estas lámparas, se usan casquillos de rosca *E-40* (Goliat).

13.10 Lámparas de descarga

En el interior de un tubo de descarga hay siempre un pequeño número de electrones libres que, al estar sometidos al campo eléctrico creado por la diferencia de potencial aplicada entre los electrodos, se dirigen hacia el electrodo positivo o ánodo. A medida que se desplazan, chocan con los átomos de gas y, debido a la energía cinética propia de su movimiento, arrancan electrones superficiales de aquellos átomos, siguiendo este proceso indefinidamente.

Al átomo que queda sin un electrón se le llama *ion;* cuando queda cargado positivamente, se desplaza hacia el electrodo negativo, o cátodo, produciendo nuevos choques.

Cuantos más electrones libres haya, mayor será la corriente que circule, y menor la resistencia que ofrecerá el tubo al paso de la corriente; por ello, será preciso limitar desde el exterior, por medio de un dispositivo adecuado, el valor de la corriente que se pretende hacer circular. Sin embargo, no todos los choques entre un electrón y un átomo producen la ionización de éste último, sino que, con gran frecuencia, la energía propia del electrón libre no es suficiente para arrancar un electrón superficial, dejándolo sujeto al átomo pero incrementándole su nivel energético.

Cuando sucede esto último, los electrones excitados tienden a volver a su nivel inicial, restituyendo, en forma de radiaciones electromagnéticas, la energía recibida en el choque. En la mayor parte de los casos, algunas de estas radiaciones son visibles, por lo que el tubo actuará como una fuente de luz (fig. 13.14).

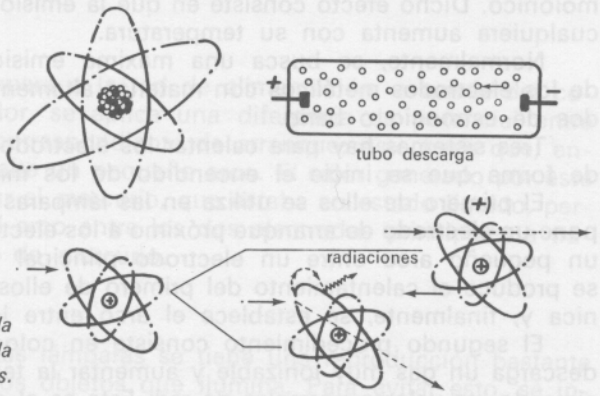


Fig. 13.14 Fundamento de la producción de luz por medio de la descarga a través de un gas.

En principio, hay dos diferencias fundamentales entre las fuentes de luz de origen térmico (como son las lámparas incandescentes) y las basadas en la descarga a través de un gas. La primera de ellas ya ha sido mencionada anteriormente y consiste en la disminución de resistencia al aumentar la corriente, creando una característica de carga inestable en las lámparas de descarga, por lo que estas últimas necesitan forzosamente de un elemento regulador de la intensidad. La segunda diferencia fundamental consiste en que el reparto espectral de la luz producida es continuo en las lámparas incandescentes y discontinuo en las lámparas de descarga. Dicho de otra forma, las lámparas incandescentes emiten radiaciones a lo largo de todo el espectro visible, mientras que las lámparas de descarga únicamente emiten radiaciones de determinadas longitudes de onda.

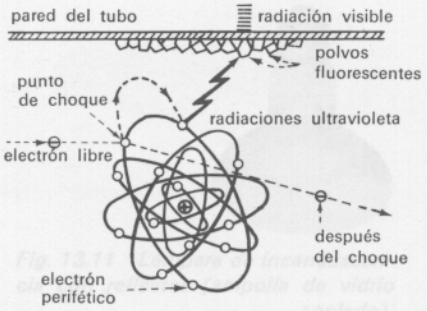


Fig. 13.15 Fundamento de la fluorescencia.

13.11 Fluorescencia

La fluorescencia es una propiedad que poseen ciertas sustancias, en virtud de la cual transforman las radiaciones que inciden sobre ellas en otras radiaciones de mayor longitud de onda.

Las sustancias fluorescentes empleadas en Luminotecnia son aquéllas que absorben radiaciones no visibles, generalmente ultravioletas, y las transforman en radiaciones visibles.

El fenómeno de fluorescencia puede considerarse como un sistema de generación de luz perfectamente definido y distinto de la incandescencia y de la descarga en gas; pero, en lo que se refiere a sus aplicaciones prácticas, cabe considerarlo como un complemento o perfeccionamiento de las lámparas de descarga en gas, toda vez que las radiaciones ultravioleta necesarias son siempre suministradas por un tubo de descarga que, en la mayor parte de los casos, es de mercurio. En la figura 13.15, se indica el principio básico del fenómeno de fluorescencia.

13.12 Composición de las lámparas de descarga

En toda clase de lámparas de descarga pueden destacarse tres componentes principales: el tubo de descarga, los electrodos y el gas de relleno. Los demás componentes, tales como casquillos y ampollas exteriores, dependen de cada clase.

13.12.1 *Tubo de descarga*

Es el elemento destinado a contener y aislar del medio ambiente los electrodos y el gas de relleno. En su construcción, se utilizan cuarzo y vidrio; su forma y tamaño varían considerablemente con la clase y potencia de las lámparas. Generalmente, el tubo de descarga va protegido por medio de una ampolla exterior.

13.12.2 *Electrodos*

Son unos elementos metálicos situados en los extremos del tubo de descarga, a los que se aplica la diferencia de potencial necesaria para el funcionamiento de la lámpara. En las lámparas de uso más frecuente, los electrodos trabajan a temperaturas relativamente elevadas, aprovechando el efecto termoiónico. Dicho efecto consiste en que la emisión electrónica de una sustancia cualquiera aumenta con su temperatura.

Normalmente, se busca una máxima emisión mediante el recubrimiento de los electrodos metálicos con materias altamente emisivas, como son los óxidos de estroncio o bario.

Tres sistemas hay para calentar los electrodos de las lámparas de descarga de forma que se inicie el encendido de los mismos.

El primero de ellos se utiliza en las lámparas de vapor de mercurio: se dispone un electrodo de arranque próximo a los electrodos principales; tras formarse un pequeño arco entre un electrodo principal y su correspondiente auxiliar, se produce el calentamiento del primero de ellos, aumenta su emisión electrónica y, finalmente, se establece el arco entre los dos electrodos principales.

El segundo procedimiento consiste en colocar en el interior del tubo de descarga un gas muy ionizable y aumentar la tensión de alimentación por encima de los valores normales de red. Este es el caso de las lámparas de sodio.

El tercer procedimiento, empleado en la mayor parte de los tubos fluorescentes, consiste en construir electrodos en forma de filamento y hacer pasar la corriente de arranque a través de ellos.

13.12.3 *Gas de relleno*

El gas de relleno en los tubos de descarga suele ser un gas fácilmente ionizable e inerte, como el argón o el neón.

En las lámparas de descarga comerciales (lámparas de mercurio, sodio y fluorescentes), además del gas de relleno, el tubo de descarga contiene en su interior una pequeña cantidad de mercurio o sodio, en estado líquido o sólido respectivamente que, una vez vaporizados, determinan las características de la luz emitida.

13.13 Accesorios necesarios para el funcionamiento de las lámparas de descarga

Como consecuencia de la característica negativa de resistencia de las lámparas de descarga, es preciso utilizar un elemento limitador de la corriente de arco. Los sistemas limitadores que pueden usarse son tres:

1.º resistencia óhmica;
2.º bobina de inductancia;
3.º autotransformador.

El primero es poco utilizado debido a la pérdida de potencia en la resistencia, por efecto Joule.

El segundo se utiliza cuando la tensión de red es suficiente. La bobina, formada por un arrollamiento sobre un núcleo magnético, engendra una fuerte autoinducción que limita convenientemente el paso de corriente.

Ahora bien, cuando la tensión de red no es suficiente, debe preverse un transformador que la eleve al valor deseado y, a continuación, colocar una bobina de inductancia.

De hecho, la solución adoptada consiste en utilizar un transformador de fugas magnéticas que realiza las dos funciones, elevación de tensión en vacío y limitación de la corriente.

En los dos casos las pérdidas propias del elemento limitador son muy reducidas pero determinan una notable disminución del factor de potencia del conjunto. La corrección del factor de potencia se efectúa mediante la colocación de un condensador, el cual producirá la corrección deseada siempre que el valor de la capacidad del condensador sea el adecuado.

13.14 Lámparas de vapor de mercurio

Se conoce con este nombre un tipo de lámparas de descarga en las que la emisión de luz es consecuencia de la excitación de los átomos de mercurio contenidos en el tubo de descarga.

Esta clase de lámparas está compuesta por (fig. 13.16):

— Un tubo de descarga de cuarzo, provisto de dos electrodos principales y uno o dos electrodos auxiliares, y en cuyo interior se encuentra una cierta cantidad de argón y unas gotas de mercurio.

— Una ampolla exterior, cuya misión consiste en proteger al tubo de descarga y permitir el equilibrio térmico necesario para su buen funcionamiento.

— Un casquillo de conexión roscado.

13.14.1 *Funcionamiento*

Cuando se conecta la lámpara a la red de alimentación, a través del correspondiente elemento limitador, se aplica una diferencia de potencial entre cada electrodo principal y su correspondiente de arranque; esto hace que, entre ellos y a través de argón, salte un pequeño arco. El calor generado por este arco es suficiente para vaporizar el mercurio, que estaba en estado líquido, permitiendo el establecimiento del arco entre los dos electrodos principales a través de la atmósfera de vapor de mercurio.

13.14.2 *Características*

Con la luz emitida por estas lámparas se tiene una reproducción bastante defectuosa de los colores de los objetos que ilumina. Para evitar esto, se introducen sustancias como el fluogermanato de magnesio o el vanadato de itrio; entonces se denominan de vapor *de mercurio color corregido.*

Aparte esto, las características más importantes de estas lámparas son:

1.ª El rendimiento de las lámparas de vapor de mercurio es muy superior al de las lámparas incandescentes estándar (de 38 a 60,7 lm/W), según potencia, frente a los 20 lm/W de las lámparas incandescentes de alta potencia.

2.ª La vida media puede llegar a alcanzar unas 16 000 horas en determinadas clases siendo, en cualquier caso, superior a 8 000 horas, considerando una frecuencia de encendidos igual a una conexión cada 3 horas.

3.ª El encendido no es instantáneo, precisándose un cierto tiempo para que la lámpara alcance su máxima emisión. Del mismo modo, el reencendido no es instantáneo y se debe esperar a que el mercurio se haya condensado para poder cebar de nuevo el arco.

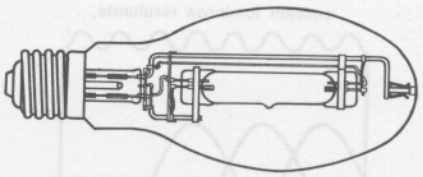


Fig. 13.16 Lámpara de vapor de mercurio color corregido.

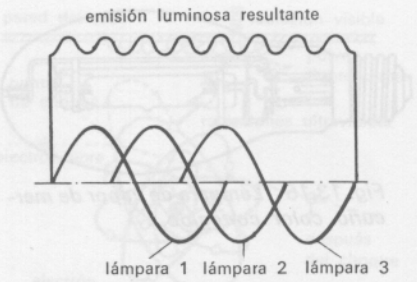


Fig. 13.17 Eliminación del efecto estrosboscópico.

4.ª Durante el período de arranque las lámparas de mercurio absorben una corriente cuyo valor es prácticamente el doble del valor de régimen normal.

5.ª Como todas las lámparas de descarga, pueden determinar el efecto estroboscópico. Dicho efecto consiste en que, si se iluminan cuerpos en movimiento con lámparas de descarga, dichos cuerpos pueden dar la impresión de estar parados o de moverse intermitentemente. Esto es debido a que las lámparas de descarga no poseen inercia alguna, por lo que, cuando la onda de corriente pasa por un valor nulo, la lámpara no emite radiaciones.

Teniendo en cuenta que en una red de corriente alterna de 50 Hz, la onda pasa por cero 100 veces cada segundo, el objeto dejará de estar iluminado el mismo número de veces. Hay diversos sistemas para eliminar el efecto estroboscópico y, de entre ellos, el más económico y práctico, si se dispone de corriente trifásica, consiste en conectar las lámparas en grupos de tres sobre pares de fases distintas *(RS, ST, TR)* (fig. 13.17).

13.15 Lámparas de luz mezcla

En el apartado 13.13, se dijo que uno de los sistemas para limitar la corriente en los tubos de descarga consistía en una resistencia conectada en serie con dicho tubo.

Basándose en este sistema, se ha desarrollado un tipo de lámparas en las que la emisión luminosa proviene simultáneamente de dos elementos: 1.º, un tubo de descarga similar al de las lámparas de vapor de mercurio; y 2.º, un filamento idéntico al de las lámparas incandescentes; éste va conectado en serie con el anterior y desempeña el papel de limitador de corriente. Ambos elementos están contenidos en el interior de una ampolla de vidrio normal que, además de protegerlos, puede estar cubierta interiormente por una capa de polvos fosfóricos, con el fin de mejorar el rendimiento en color. En la figura 13.18, pueden apreciarse los distintos componentes de una de estas lámparas.

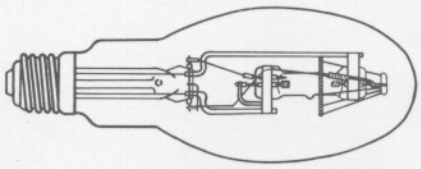


Fig. 13.18 Lámpara de luz mezcla.

13.15.1 *Ventajas*

Las más importantes que presentan estos tipos de fuentes de luz son las siguientes:

— Conexión directa a la red, sin necesidad de elementos limitadores ni arrancadores.

— Vida media de unas 6 000 horas con una frecuencia de un encendido cada 3 horas.

13.15.2 *Inconvenientes*

Entre éstos pueden citarse:

— Gran influencia de las variaciones de tensiones en lo que a rendimiento, consumo y vida de la lámpara se refiere.

— Rendimiento luminoso menor que las de vapor de mercurio.

13.16 Lámparas de sodio

Se conoce con esta denominación un tipo de lámparas de descarga en el que la producción de luz se efectúa como consecuencia de la excitación de átomos de sodio contenidos en el tubo de descarga.

La evolución de estas fuentes de luz ha sido realmente importante en los últimos años, debido principalmente a la aparición de las lámparas con óxidos metálicos y a las lámparas de alta presión.

13.17 Lámparas de vapor de sodio a baja presión

En principio, las lámparas de sodio a baja presión constan de un tubo de descarga en forma de *U*, una ampolla tubular que protege mecánica y térmicamente el tubo de descarga y un casquillo de conexión, que acostumbra a ser de bayoneta (fig. 13.19).

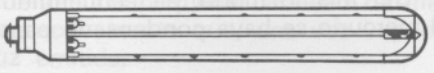


Fig. 13.19 Lámpara de vapor de sodio a baja presión.

13.17.1 *Funcionamiento*

En los extremos del tubo de descarga hay dos electrodos y, en su interior, se encuentra un gas de relleno, generalmente neón, y una pequeña cantidad de sodio en forma de gotas cuando la lámpara está fría.

En el instante en que se aplica una cierta tensión a los electrodos se produce una descarga a través del gas neón, la cual determina la emisión de una luz roja característica de dicho gas que, como es sabido, es muy ionizable.

El calor generado por dicho arco produce la vaporización progresiva del sodio; como consecuencia, la descarga pasa a efectuarse en una atmósfera en la que la concentración del sodio es progresivamente mayor, determinando una luz de tonalidad cada vez más amarilla.

13.17.2 *Características*

Las lámparas de sodio son las fuentes de luz de mayor rendimiento lumínico que hay en la actualidad, ya que se dispone de lámparas cuyo rendimiento es superior a los 175 lm/W frente a los 25 lm/W de las lámparas incandescentes más eficaces.

Las lámparas de sodio utilizadas hasta hace pocos años presentaban varios inconvenientes:

— Debido a la acción del sodio sobre el tubo de descarga, éste disminuía su transparencia de una forma progresiva.

— El insuficiente aislamiento térmico del tubo de descarga obligaba a un innecesario consumo de energía, que se destinaba a mantener la lámpara a la temperatura adecuada.

— Como consecuencia de la migración del sodio, se producían unos *espejos* de dicha sustancia, que disminuían aún más el factor de transmisión del tubo de descarga.

En las nuevas lámparas de sodio a baja presión, con óxido de estaño o con óxido de indio, se han eliminado estos inconvenientes mediante:

a) La utilización de nuevos tipos de vidrio resistentes al ataque del sodio

b) La inclusión, en la red interna del tubo exterior, de una fina capa de óxido de estaño o de óxido de indio, el cual refleja más del 90 % de las radiaciones infrarrojas emitidas por el tubo de descarga, lo que permite reducir la energía utilizada en la generación de dichas radiaciones.

c) Un nuevo tipo de tubo de descarga provisto de unos pequeños bulbos situados en su periferia, los cuales impiden la migración del sodio hacia la parte curva del tubo, con lo que se evita en gran parte la formación de los *espejos de sodio.*

Las principales características de estas lámparas se detallan en la tabla 13.20.

Tabla 13.20 Características principales de las lámparas de vapor de sodio

Potencia (W)	*Tensión de arranque (V)*	*Corriente lámpara (A)*	*Tensión lámpara (V)*	*Flujo luminoso (lm)*	*Tiempo rendimiento arranque lm/W (min)*
35	400	0,6	75	4 650	5 132,8
55	420	0,6	115	7 700	6 140,0
90	420	0,9	125	12 500	10 138,8
135	600	0,9	185	21 500	10 159,2
180	600	0,9	265	32 000	12 177,7

13.17.3 *Sistema de limitación de corriente*

Debido a que las tensiones de arranque en los tubos de descarga de las lámparas de sodio son superiores a 400 V, es preciso utilizar autotransformadores en lugar de reactancias inductivas usuales en las lámparas de vapor de mercurio. Asimismo, los portalámparas deberán estar dimensionados de forma que sean capaces de soportar estas puntas de tensión.

13.18 Lámparas de vapor de sodio a alta presión

En lo que respecta a su funcionamiento, las lámparas de vapor de sodio a alta presión necesitan para su arranque, además de la reactancia, de un nuevo elemento llamado ignitor o arrancador, cuya misión consiste en generar unos

puntos de tensión del orden de 3 a 4 kV, sin los cuales la lámpara no puede iniciar su encendido. Este arrancador puede estar incluido en la lámpara o puede ser un elemento ajeno a la misma. Por el momento, se utilizan, con preferencia, independientes de la lámpara.

En la figura 13.21, se representa el esquema de conexión más frecuente.

En lo que respecta al tiempo de arranque, éste suele durar unos 4 minutos, al cabo de los cuales la lámpara está emitiendo el 80 % de su flujo luminoso total.

13.18.1 *Características constructivas*

Las lámparas de vapor de sodio a alta presión se encuentran en el mercado en dos tipos distintos, caracterizados por la forma de su ampolla. Inicialmente aparecieron las lámparas de ampolla tubular, tal como se indica en la figura 13.22; pero posteriormente aparecieron las lámparas de ampolla ovoide, cuya forma y dimensiones, así como su reparto espacial, son idénticas a las lámparas de vapor de mercurio color corregido.

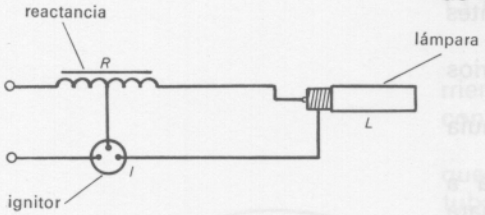


Fig. 13.21 Esquema de conexión de la lámpara de vapor de sodio de alta presión.

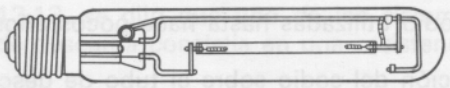


Fig. 13.22 Lámpara de sodio alta presión tubular.

13.18.1.1 *Tubo de descarga*

Debido a las especiales condiciones de funcionamiento de esta clase de lámparas, el tubo de descarga está construido con un material cerámico especial constituido por un óxido de aluminio sintetizado, cuya temperatura de fusión es del orden de los 2 000 °C, y que posee una transmitancia aproximada del 90 %, para un espesor de 1 mm. Desde el punto de vista químico, este material cerámico presenta una gran resistencia al ataque del sodio, lo que permite una larga vida útil del tubo.

Los electrodos, en número de dos, están situados uno a cada extremo del tubo y son de tungsteno.

En el interior del tubo, junto con una amalgama de sodio perfectamente dosificada, se encuentra un gas noble a baja presión para facilitar el cebado.

13.18.1.2 *Características luminosas*

A medida que aumenta la presión en el interior del tubo de descarga, el reparto espectral de la luz emitida por el tubo de descarga de sodio se va ampliando hasta que, a la presión normal de funcionamiento propia de estas lámparas, se puede observar un reparto sensiblemente continuo, gracias al cual se obtiene una cierta facilidad para distinguir los colores de los objetos iluminados, hecho que no era posible con la luz emitida por las lámparas a baja presión. A pesar de ello, las lámparas a alta presión siguen emitiendo preferentemente en la zona correspondiente a los tonos amarillos, debido a lo cual el color de la luz es amarillo.

La eficacia luminosa de estas lámparas, si bien es inferior a la de las lámparas a baja presión, alcanza unos valores notablemente altos. En la tabla 13.23, se indican los flujos luminosos y eficaces de este tipo de lámparas.

Tabla 13.23 Características luminosas de las lámparas de vapor de sodio a alta presión

Potencia (W)	*Ampolla*	*Flujo luminoso (lm)*	*Eficacia luminosa (lm/W)*
250	Tubular	25 500	102
	Ovoide	22 500	92
400	Tubular	47 000	117,5
	Ovoide	43 500	108,7
1 000	Tubular	120 000	120
	Ovoide	110 000	110

13.19 Tubos fluorescentes

Los tubos fluorescentes son unas fuentes en las que la luz se genera como consecuencia del fenómeno de fluorescencia, cuando sobre unos polvos fosfóricos, situados en la pared interior del tubo de descarga, inciden radiaciones ultravioleta de adecuada longitud de onda, generadas por una descarga a través del gas contenido en el tubo. A pesar de que la composición del gas a través del cual se efectúa la descarga es muy similar, hay dos diferencias fundamentales entre este tipo de fuentes y las de vapor de mercurio: la primera de ellas consiste en que la presión del gas en los tubos fluorescentes es mucho más baja que la del gas de las lámparas de vapor de mercurio; la segunda diferencia consiste en que, en las lámparas de vapor de mercurio con corrección de color, sólo un 10 % de la luz emitida es generada por fluorescencia mientras que en los tubos fluorescentes alcanza un 90 %. Esta segunda diferencia es, en gran parte, consecuencia de la primera, ya que la longitud de onda, predominante de las radiaciones generadas por la descarga a través de un gas, depende considerablemente de la presión de dicho gas.

13.20 Composición de los tubos fluorescentes

Los componentes principales de los tubos fluorescentes (fig. 13.24) son: un tubo de descarga, que está en contacto con el medio ambiente; dos casquillos de conexión, provistos de dos patillas cada uno, a las cuales van conectados unos electrodos en forma de filamento; el gas de relleno y los polvos fluorescentes.

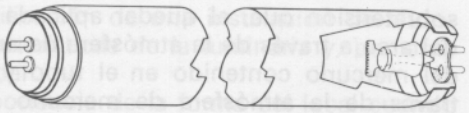


Fig. 13.24 Tubo fluorescente estándar.

13.20.1 *Tubo de descarga*

En las lámparas fluorescentes el tubo de descarga no dispone de una ampolla u otro tipo de dispositivo para su protección térmica o mecánica. Su forma es cilíndrica y los diámetros normales son de 16, 38 y 54 mm; las longitudes oscilan entre 142 y 2 438 mm, siendo las más comunes 600, 1 200 y 1 500 mm, que corresponden a los tubos estándar de 20, 40 y 54 W respectivamente. En la pared interna del tubo se encuentra depositada la carga de polvos fluorescentes.

Además de los tubos cilíndricos, en algunos casos, se utilizan tubos circulares, así como otros tipos de menor importancia.

13.20.2 *Casquillos de conexión y electrodos*

Las lámparas fluorescentes disponen generalmente de dos casquillos de conexión, situados uno a cada extremo del tubo, y provisto cada uno de dos patillas, que están unidas eléctricamente con los electrodos.

Hay tres tamaños de casquillos, previstos para ir acoplados respectivamente a los tubos de 16, 38 y 54 mm de diámetro.

Las patillas de conexión están aisladas del cuerpo del casquillo por medio de una pieza de baquelita u otro material de características semejantes.

Los electrodos son de hilo de tungsteno arrollado en doble o triple espiral, y están recubiertos de una capa de material altamente emisivo.

Durante el momento de arranque, el caldeo de los electrodos lo efectúa la corriente que circula a través de ellos, manteniéndolos posteriormente a la temperatura adecuada gracias al calor generado por la descarga.

13.20.3 *Gas de relleno*

El interior de los tubos fluorescentes está ocupado por una cierta cantidad de argón a baja presión y una pequeña cantidad de mercurio, que, cuando el tubo no funciona, está en estado líquido.

Al ser el argón muy ionizable, la primera descarga se efectúa a través de él, generando una cierta cantidad de calor que permite vaporizar las gotitas de mercurio, desarrollándose luego la descarga como si, en el interior del tubo, sólo hubiera vapor de mercurio.

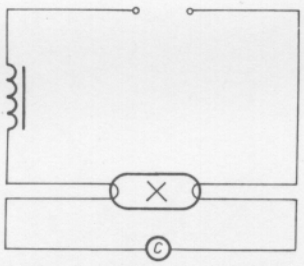


Fig. 13.25 Circuito de precalentamiento con cebador.

13.20.4 *Polvos fluorescentes*

Estas sustancias, llamadas también fósforos o luminofósforos, son las que transforman, en luz visible, las radiaciones ultravioleta producidas en la descarga. Son, por lo tanto, el elemento más importante de estas fuentes, pues aproximadamente un 90 % de la luz emitida por los tubos se debe a su acción.

Entre los fósforos más utilizados en la actualidad, pueden citarse el halofosfato de calcio activado con antimonio, el silicato de calcio activado con plomo, y el arsenato de magnesio activado con magnesio.

13.21 Sistemas de arranque de los tubos fluorescentes

Los tipos de circuitos para el arranque de tubos fluorescentes más comunmente usados en la actualidad son los de precalentamiento con cebador y los de arranque rápido con precalentamiento.

13.21.1 *Circuitos de precalentamiento con cebador*

En principio, en el caso de una tensión de alimentación de 220 V, estos circuitos comprenden una reactancia en serie con la lámpara y un interruptor que une los terminales de los electrodos que no están unidos con la red ni con la reactancia (fig. 13.25).

En primer lugar, el circuito se conecta a la red; posteriormente, se cierra el interruptor *C*; la corriente que circula en este primer instante por el circuito (que es la corriente de cortocircuito de la reactancia), al pasar por los electrodos, los calienta, de manera que empiezan a emitir electrones.

Abriendo bruscamente el interruptor *C*, se generará en la reactancia una sobretensión que, al quedar aplicada entre los electrodos, producirá el cebado del arco a través de la atmósfera de argón; con ello, se produce la evaporización del mercurio contenido en el tubo y, finalmente, el establecimiento del arco a través de la atmósfera de mercurio.

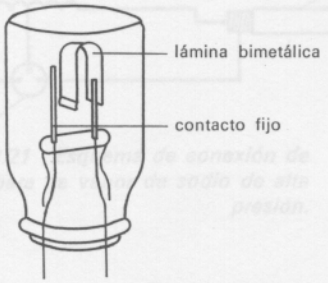


Fig. 13.26 Cebador.

Se ve, pues, que el establecimiento del arco precisa de tres maniobras:
— la conexión del circuito a la red;
— el cierre del interruptor *C*;
— la abertura del interruptor *C*.

Las dos últimas maniobras pueden efectuarse automáticamente por medio de un dispositivo llamado *arrancador* o *cebador,* el cual se compone de dos láminas (una de ellas bimetálica) situadas en el interior de una pequeña ampolla de gas inerte (fig. 13.26).

Su funcionamiento es como sigue: al conectar el circuito a la red, la tensión queda aplicada entre las dos láminas del cebador; por la proximidad a que se encuentran, se establece entre ellas, a través del gas de relleno, un pequeño arco; éste produce aumento de temperatura en el interior de la ampolla y, consecuentemente, la deformación de la lámina bimetálica, hasta ponerla en contacto con la fija; se cierra, con ello, el circuito de caldeo. Posteriormente, y debido a que el interior de la ampolla del cebador se enfría, la lámina bimetálica vuelve a su posición inicial, abriendo bruscamente el circuito, induciéndose una sobretensión en la reactancia tal como se indicó anteriormente; esto determina el establecimiento del arco y la consiguiente emisión de radiaciones. Una vez la lámpara en funcionamiento, la diferencia de potencial existente entre las dos láminas del cebador es insuficiente para hacerlo funcionar de nuevo.

13.21.2 *Circuitos de arranque rápido con precalentamiento*

Para remediar la falta de instantaneidad del encendido por cebador, así como también para evitar los inconvenientes de este tipo de elemento (duración limitada, posibilidad de averías, etc.), se ha desarrollado un sistema de encendido rápido precalentando los electrodos por medio de un circuito auxiliar, el cual sigue calentándolos aun durante el funcionamiento de la lámpara.

El esquema de principio de este tipo de circuitos se indica en la figura 13.27. Comprende, además de la reactancia estabilizadora, un pequeño transformador con un primario de pequeña potencia y gran impedancia, cuyos arrollamientos secundarios proporcionan una tensión relativamente baja para el caldeo de los electrodos.

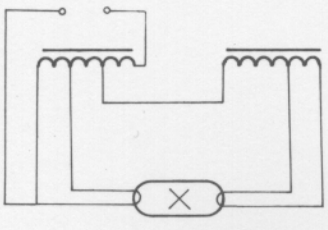


Fig. 13.27 Circuito de arranque rápido con precalentamiento.

Una vez conectado el circuito a la red de alimentación, los electrodos alcanzan muy rápidamente la temperatura de emisión y la lámpara se enciende

espontáneamente, evitándose con ello la mayor parte del tiempo que se precisaba para cerrar y abrir los contactos del cebador. De hecho, los circuitos actuales combinan sobre un mismo circuito magnético los arrollamientos que proporcionan la tensión de alimentación y los arrollamientos de caldeo de los electrodos.

13.22 Cálculo de un alumbrado interior

Una vez conocida la clase de actividad que se desarrollará en el local motivo de estudio, podrá determinarse fácilmente, con ayuda de las tablas publicadas al efecto, el nivel medio de iluminación necesario, el tipo de fuente de luz, el sistema de alumbrado más idóneo (directo, semi-directo, general-difuso, directo-indirecto, semi-indirecto o indirecto), y la distribución más conveniente. Una vez resueltos todos estos aspectos, deberán efectuarse una serie de cálculos con el objeto de determinar el número exacto de puntos de luz, la potencia de las lámparas y la distribución final de las luminarias.

13.22.1 *Determinación del coeficiente de utilización*

El coeficiente de utilización de una instalación de alumbrado es igual al cociente de dividir el valor del flujo luminoso que llega al plano de trabajo, por el valor del flujo luminoso total de las lámparas instaladas.

Este factor, para una instalación determinada, depende de diversas variables, como son: la eficacia de la luminaria, su distribución luminosa, la altura de instalación, la superficie de la zona por iluminar, y la reflectancia de techo, paredes y suelo.

Se ve, pues, que el coeficiente de utilización de una instalación de alumbrado depende, por una parte, de las características de la luminaria y, por otra, de las características del local por iluminar.

En la figura 13.28, puede verse la importancia de la forma del local cuando se trata de buscar el coeficiente de utilización. Del flujo emitido por la luminaria, una parte incide directamente sobre el plano de trabajo; otra parte incide sobre las paredes; y el resto, sobre el techo.

El flujo útil será la suma del flujo directo más el flujo que, después de incidir sobre paredes y techo, se refleja hacia el plano útil.

De la figura 13.28 puede deducirse que, en principio, cuanto mayor sea el ángulo de radiación directa, mayor será el coeficiente de utilización. El valor del ángulo de radiación directa es función de la forma y dimensiones del local. Estos se clasifican en 10 grupos de acuerdo con sus proporciones mutuas (lo que se llama relación del local) y cada uno de estos grupos se caracteriza por el llamado índice del local. Las relaciones de local se calculan mediante una de las fórmulas siguientes:

$$K = \frac{l \cdot a}{h \cdot (l + a)} \qquad [13.1]$$

$$K = \frac{3 \cdot l \cdot a}{2\,h \cdot (l + a)} \qquad [13.2]$$

La fórmula [13.1] se utiliza en alumbrados directos, semi-directos y directos-indirectos, mientras que la fórmula [13.2] se aplica para alumbrados semi-indirectos e indirectos.

Una vez calculada la relación del local, debe buscarse, en la tabla 13.29, su índice de local correspondiente y, mediante las tablas publicadas al efecto, óodrá conocerse el coeficiente de utilización de una instalación de alumbrado en función de: 1.º, clase de luminaria; 2.º, índice de local; 3.º, coeficiente de reflexión de paredes, techo y suelo (tabla 13.30).

13.22.2 *Determinación del coeficiente de depreciación*

Una instalación de alumbrado no mantiene indefinidamente sus características luminosas. Las causas se deben a dos factores principales: 1.º, la pérdida de flujo luminoso de las lámparas, motivada tanto por su envejecimiento natural como por el polvo o suciedad que pueda depositarse sobre ellas; 2.º,

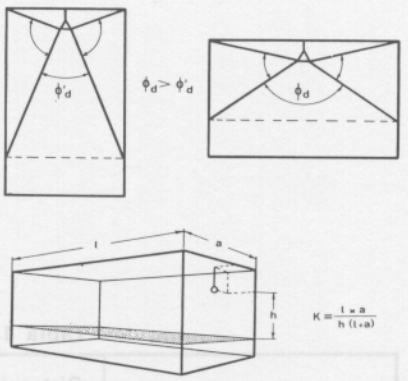


Fig. 13.28 Relación de local e importancia del mismo en el cálculo de los coeficientes de utilización.

Tabla 13.29 Relación del local. Indice del local

Indice del local	*Relación del local*	
	Valor	*Punto central*
J	Menos de 0,7	0,60
I	0,7 a 0,9	0,80
H	0,9 a 1,12	1
G	1,12 a 1,38	1,25
F	1,38 a 1,75	1,50
E	1,75 a 2,25	2
D	2,25 a 2,75	2,50
C	2,75 a 3,50	3
B	3,50 a 4,50	4
A	Más de 4,50	5

Tabla 13.30 Coeficientes de utilización para alumbrados interiores

Luminaria	*Distancia entre luminarias inferior a*	*Coeficiente de conservación*	*Techo*	*80 %*			*70 %*			*50 %*		
			Paredes	*50 %*	*30 %*	*10 %*	*50 %*	*30 %*	*10 %*	*50 %*	*30 %*	*10 %*
			Indice local	*Coeficiente de utilización*								
Regleta para tubos fluorescentes estándar. Montaje de superficie. Alumbrado *semidirecto.*	1,4 × Altura de montaje	Bueno 0,75 Medio 0,65 Malo 0,55	J	0,27	0,21	0,17	0,27	0,21	0,17	0,22	0,29	0,17
			I	0,35	0,30	0,24	0,35	0,30	0,24	0,34	0,28	0,24
			H	0,43	0,36	0,30	0,41	0,35	0,31	0,40	0,34	0,30
			G	0,49	0,42	0,37	0,49	0,42	0,36	0,46	0,40	0,36
			F	0,55	0,47	0,42	0,53	0,47	0,41	0,50	0,44	0,40
			E	0,62	0,55	0,50	0 60	0,53	0,49	0,57	0,52	0,47
			D	0,67	0,61	0,56	0,66	0,60	0,55	0,62	0,57	0,52
			C	0,71	0,65	0,60	0,70	0,63	0,59	0,65	0,61	0,56
			B	0,76	0,71	0,66	0,74	0,69	0,65	0,69	0,65	0,62
			A	0,81	0,76	0,71	0,78	0,74	0,70	0,73	0,69	0,67
Luminaria para tubos fluorescentes estándar provista de cubeta de material plástico. Montaje empotrado. Alumbrado *directo.*	1,2 × Altura de montaje	Bueno 0,70 Medio 0,60 Malo 0,50	J	0,27	0,22	0,20	0,26	0,22	0,19	0,25	0,22	0,19
			I	0,33	0,29	0,26	0,33	0,29	0,25	0,32	0,28	0,25
			H	0,38	0,34	0,30	0,38	0,33	0,30	0,37	0,33	0,30
			G	0,43	0,38	0,35	0,42	0,38	0,34	0,41	0,38	0,34
			F	0,46	0,42	0,38	0,46	0,41	0,38	0,44	0,41	0,38
			E	0,50	0,47	0,43	0,50	0,46	0,43	0,48	0,46	0,43
			D	0,53	0,50	0,47	0,53	0,49	0,47	0,51	0,48	0,46
			C	0,55	0,52	0,50	0,54	0,52	0,49	0,53	0,51	0,49
			B	0,59	0,55	0,53	0,58	0,55	0,53	0,56	0,54	0,52
			A	0,60	0,57	0,55	0,59	0,57	0,55	0,57	0,56	0,54

la pérdida de reflexión del reflector o de transmisión del difusor o refractor, motivada asimismo por la suciedad.

En consecuencia, al calcular el flujo luminoso necesario para obtener el nivel medio de iluminación previsto, será preciso tener en cuenta este hecho, aumentando el flujo inicial en la proporción adecuada.

La estimación de este coeficiente debe hacerse teniendo en cuenta diversos factores relativos a la instalación, tales como la clase de luminaria, grado de polvo y suciedad existente en la nave por iluminar, clase de lámpara utilizada, número de limpiezas anuales y sistema de reposición de las lámparas.

Generalmente, los valores utilizados oscilan entre 0,50 y 0,80, correspondiendo el valor más elevado a instalaciones situadas en locales limpios, efectuados con luminarias cerradas y provistos de lámparas de baja depreciación, en los que se efectúan limpiezas frecuentes y reposiciones de lámparas en bloque o, cuando menos, en grupos; mientras que el valor más bajo corresponde a locales de ambiente polvoroso o sucio, en los que las limpiezas son poco frecuentes y el mantenimiento de la instalación difícil.

13.22.3 *Cálculo del flujo luminoso necesario*

Una vez conocidos el nivel medio de iluminación que se debe obtener, la superficie por iluminar, el coeficiente de utilización y el coeficiente de depreciación, puede calcularse el flujo luminoso necesario mediante la siguiente fórmula:

$$\Phi = \frac{E_{med.} \cdot S}{C_u \cdot C_d}$$

en la que:

Φ = flujo luminoso total necesario para obtener el nivel medio de iluminación;
$E_{med.}$ = nivel medio de iluminación previsto (lux);
S = superficie por iluminar (m^2);
C_u = coeficiente de utilización;
C_d = coeficiente de depreciación.

13.22.4 *Cálculo del número de puntos de luz*

Para calcular el número de puntos de luz necesarios, se debe dividir el valor del flujo luminoso total necesario por el flujo de la lámpara o lámparas contenidas en un punto de luz; es decir:

$$N = \frac{\Phi_t}{\Phi_p}$$

en la que:

N = número de puntos de luz o luminarias;
Φ_t = flujo luminoso total necesario;
Φ_p = flujo nominal de las lámparas contenidas en una luminaria.

Como puede deducirse fácilmente, un mismo flujo luminoso total puede obtenerse mediante la instalación de un número elevado de lámparas de bajo flujo nominal, o mediante la instalación de un pequeño número de lámparas de elevado flujo nominal. En el primer caso, se obtiene una gran uniformidad en la iluminación, pero el mantenimiento de la instalación es difícil y a la vez caro. En el segundo caso, el mantenimiento es sumamente fácil, pero la uniformidad de la iluminación puede ser inferior al mínimo aceptable. El factor medio de uniformidad de una iluminación, concepto de gran importancia en toda instalación de alumbrado, se define como la relación entre la iluminación mínima y la iluminación media.

Volviendo al tema de la determinación de la potencia de las lámparas y el número necesario de las mismas para obtener el flujo luminoso total calculado, el sistema seguido la mayor parte de las veces consiste en instalar el menor número de puntos de luz cumpliendo con un valor aceptable del factor de uniformidad. A este respecto, en las tablas de coeficientes de utilización suele incluirse un dato que indica la separación máxima admisible entre luminarias para que el factor de uniformidad sea aceptable, estando expresada dicha separación máxima en función de la altura útil.

13.22.5 *Distribución de los puntos de luz*

Por regla general, es aconsejable que la separación entre los puntos de luz extremos y paredes sea la mitad de la separación existente entre puntos de luz contiguos, tanto para luminarias simétricas como para luminarias asimétricas. En ciertas clases de instalación, podrá llegarse a valores de distancias entre puntos de luz extremos y las paredes del orden de 1/3 ó 1/4 de la separación entre puntos de luz.

En instalaciones con luminarias simétricas, siempre que se pueda, deberá utilizarse una distribución según una retícula cuadrada, con el objeto de conseguir una mayor uniformidad de la iluminación.

13.23 Ejemplo de cálculo

Una planta destinada a oficinas tiene las siguientes dimensiones:
Anchura: 11,5 m.
Longitud: 26 m.
Altura: 2,80 m.

Hay, en esta planta, un falso techo constituido por una cuadrícula de placas de escayola; esta circunstancia nos permitirá utilizar luminarias de tipo empotrable. Tanto el falso techo como las paredes son de colores bastante claros. Como fuente de luz utilizaremos la fluorescencia, pues así lo aconsejan la altura de la planta y la consecución de un riesgo mínimo de deslumbramiento.

De acuerdo con las tablas de niveles de iluminación, a una oficina en la que haya instaladas máquinas de escribir y calcular y se realicen trabajos de

contabilidad, le corresponde un nivel comprendido entre los 300 y 600 lx. Para este caso, tomaremos el nivel recomendado, que es de 600 lx.

Para hallar la relación del local, emplearemos la fórmula propia de las luminarias directas, sustituyendo en ella los valores l = 26 m, a = 11,5 m y h = 2 m (recordemos que la altura del plano útil es del orden de 0,8 a 1 m).

$$K = \frac{l \cdot a}{h \cdot (l + a)} = \frac{26 \times 11{,}5}{2\ (26 + 11{,}5)} = 3{,}98$$

Según se desprende de la tabla 13.29, a una relación de local de 3,98 le corresponde un índice de local *B*.

Tomando como factor de reflexión un 50 %, tanto para el techo como para las paredes, y considerando la instalación de luminarias para tubos fluorescentes estándar provistos de difusor en material plástico y de montaje empotrado de las tablas de coeficientes (tabla 13.30) se deduce un coeficiente de utilización, para un local índice *B*, igual a 0,56 (0,56 = C_u). Por otro lado, considerando un ensuciamiento de tipo medio, el coeficiente de conservación puede cifrarse en 0,60 (0,60 = C_d).

Para calcular el flujo luminoso necesario, utilizaremos la siguiente fórmula:

$$\Phi_t = \frac{E_{med.} \cdot S}{C_u \cdot C_d}$$

Sustituyendo valores, tendremos:

$$\Phi_t = \frac{600 \times 299}{0{,}56 \times 0{,}60} = 533\,928 \text{ lm}$$

El número de puntos de luz se calculará mediante la fórmula

$$N = \frac{\Phi_t}{\Phi_p}$$

Supongamos que se instalan luminarias capaces para alojar 3 tubos de 40 W, y que sean del tipo de luz blanca fría, cuyo flujo luminoso es de 3 200 lm. El flujo total de una luminaria será 9 600 lm.

Por aproximación, se instalarán 55 luminarias, distribuidas según la figura 13.31. El factor de uniformidad será totalmente aceptable toda vez que la separación entre puntos de luz (fig. 13.31) es de 2,36 m en el sentido longitudinal y 2,3 m en el transversal, valores inferiores al obtenido si se multiplica la máxima relación admisible $\frac{D}{H}$, que en este caso es 1,2 (fig. 13.30), por el valor de la altura útil, 2 m.

$2 \times 1{,}2 = 2{,}4 > 2{,}36$ sentido longitudinal.
$2 \times 1{,}2 = 2{,}4 > 2{,}3$ sentido transversal.

La potencia instalada, teniendo en cuenta las pérdidas en las reactancias, será:

$$55 \times 3\ (40 + 10) = 8\,250 \text{ W} = 8{,}25 \text{ kW}$$

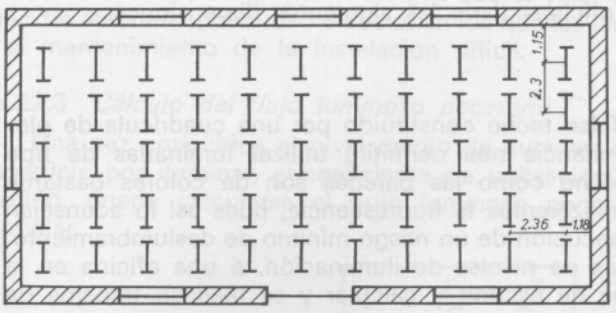


Fig. 13.31 Distribución de los puntos de luz en el ejemplo de cálculo.

13.24 Alumbrados publicitarios

Es bien conocido el gran desarrollo experimentado por las técnicas publicitarias a lo largo de los últimos años y, dentro de ellas, las que utilizan todo tipo de carteles, letreros y grabados de mediano y gran tamaño. Este tipo de reclamos se utiliza preferentemente en las vías públicas, en las vías de comunicación y en las zonas de esparcimiento.

Es evidente que, para que este tipo de publicidad sea realmente eficaz, será necesario que los carteles permanezcan iluminados durante las horas nocturnas, y ello presupone la utilización de un sistema de alumbrado artificial, generalmente a base de proyectores, cuyas características veremos a continuación.

13.25 Niveles medios de iluminación recomendables

Los niveles medios de iluminación que deberán poseer los carteles y rótulos publicitarios dependerán de diversos factores, tales como el factor de reflexión medio de sus superficies visibles y la iluminación de los alrededores. Teniendo en cuenta dichos factores, y en función de los mismos, en la tabla 13.32, se indican los niveles medios de iluminación necesarios para obtener un buen efecto publicitario.

Tabla 13.32 Niveles medios de iluminación recomendables

Factor de reflexión medio del cartel	*Nivel medio de iluminación recomendado*	
	Alrededores iluminados	*Alrededores oscuros*
Bajo	1 000 lux	500 lux
Alto	500 lux	200 lux

13.26 Clases de fuentes de luz utilizables

En este tipo de instalaciones se utilizan diversas clases de lámparas, como por ejemplo las incandescentes, en distintas versiones, como son las estándar, las reflectoras (preferentemente del tipo PAR) y las halogenadas (llamadas también de yodo o de cuarzo-yodo), las de vapor de mercurio color corregido y los tubos fluorescentes; estos últimos, solamente cuando es obligado colocar las fuentes luminosas muy próximas a la superficie por iluminar y no es necesario obtener unos niveles de iluminación elevados.

En la actualidad, se está intensificando sensiblemente el uso de lámparas halogenadas en los alumbrados publicitarios, entre otras razones, debido a que permiten una extraordinaria precisión en el control del haz luminoso, sin olvidar su muy buena reproducción cromática, su aceptable duración (2 000 horas), su rendimiento luminoso del orden de 25 lm/W, así como sus reducidas dimensiones.

Tanto las lámparas de vapor de mercurio color corregido como los tubos fluorescentes poseen, como principal ventaja, su elevado rendimiento luminoso (de 40 a 80 lm/W, según tipos y potencias) y su larga vida útil, superior a 8 000 horas; esta última propiedad es muy digna de tenerse en cuenta cuando se trata de instalaciones situadas en pleno campo, en lugares donde sea difícil la reposición de lámparas.

13.27 Clases de aparatos a instalar

Para las lámparas incandescentes estándar y las de vapor de mercurio, se instalan proyectores de distribución simétrica y de haz abierto, dependiendo esta abertura de haz de la distancia a la cual deben situarse los proyectores. Para lámparas halogenadas se utilizan proyectores de distribución asimétrica y de haz abierto (fig. 13.33).

Para tubos fluorescentes se utilizan pantallas previstas para alojar uno o dos de estos tubos, siempre que dichas pantallas estén protegidas térmicamente

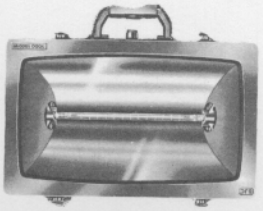


Fig. 13.33 Proyector de haz asimétrico para lámparas incandescentes halogenadas de casquillos cerámicos.

por medio de una cubeta de material plástico transparente, en razón de la notable sensibilidad de los tubos fluorescentes a las variaciones de temperatura.

13.28 Instalaciones normales de alumbrado de carteles publicitarios

Teniendo en cuenta que pueden utilizarse los diversos tipos de lámparas mencionadas en los apartados anteriores y que los aparatos que las contienen poseen diferentes repartos, se exponen a continuación unos datos de carácter orientativo para cada uno de dichos grupos de lámparas.

13.28.1 *Alumbrado de carteles publicitarios con tubos fluorescentes*

Las disposiciones normales de las unidades luminosas son las indicadas en la figura 13.34, es decir, colocando las pantallas en la parte superior del cartel, en el extremo de unos brazos, que pueden ser horizontales o ligeramente inclinados, debiendo guardar la longitud de estos brazos una cierta proporción con la altura del cartel.

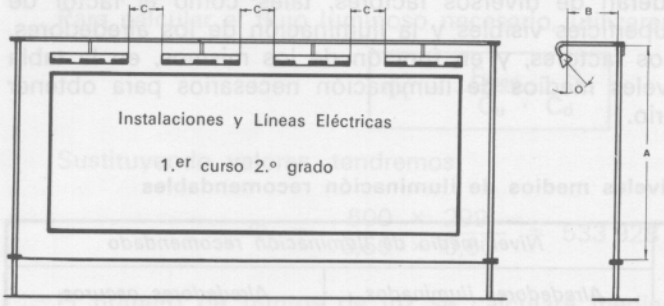


Fig. 13.34 Disposición de las unidades luminosas en los alumbrados de carteles publicitarios mediante tubos fluorescentes.

En la tabla 13.35, se indican los salientes de los brazos y la orientación vertical de las pantallas o luminarias en función de la altura del cartel.

Para conocer las características de la instalación de alumbrado de un cartel cualquiera, deberá actuarse de la forma siguiente: a partir de la altura del cartel se podrá conocer, mediante la tabla de la figura 13.35, la longitud aproximada de los brazos y la orientación de las luminarias, pudiéndose determinar el número de pantallas o luminarias con la fórmula siguiente:

$$N = \frac{E_{med.} \cdot S}{\Phi_p \cdot C_u \cdot C_d}$$

en la que:

N = número de pantallas;
$E_{med.}$ = nivel medio de iluminación deseado (lux);
S = superficie del cartel por iluminar;
Φ_p = flujo luminoso nominal de la lámpara o lámparas contenidas en una pantalla;
C_u = coeficiente de utilización;
C_d = coeficiente de depreciación.

Por regla general, los coeficientes de utilización oscilan entre 0,25 y 0,35, correspondiendo los valores más elevados a carteles de gran superficie.

Por su parte, los coeficientes de depreciación pueden estimarse comprendidos entre 0,60 y 0,70, utilizándose el primero de dichos valores para luminarias abiertas y el segundo para luminarias cerradas.

Tabla 13.35

Altura del cartel (m)	*Saliente del brazo*	*Orientación*
1,20	0,60	40º
1,80	0,90	40º
2,40	1,20	40º
3,05	1,20	30º
3,65	1,20	30º
4,25	1,80	30º
5,50	2,40	35º

13.28.2 *Alumbrado de carteles publicitarios con proyectores simétricos, provistos de lámparas incandescentes, estándar o de vapor de mercurio color corregido*

Las disposiciones normales de los puntos de luz son las indicadas en la figura 13.36.

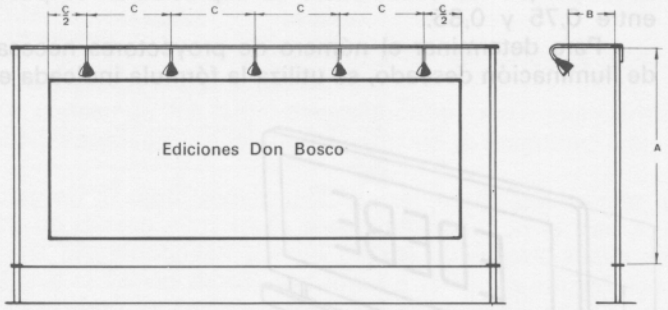


Fig. 13.36 Disposición de las unidades luminosas en los alumbrados de carteles publicitarios mediante lámparas incandescentes, estándar o de vapor de mercurio.

En la tabla 13.37 se relacionan las longitudes de los brazos y las interdistancias normales entre puntos de luz en función de la altura del cartel, indicándose asimismo los niveles medios de iluminación obtenidos en servicio, en función de los conceptos antes mencionados y de la potencia de las lámparas instaladas.

Para casos que se aparten de los indicados en esta tabla, puede utilizarse la fórmula del apartado anterior, teniendo presente que los coeficientes de utilización oscilan generalmente entre 0,30 y 0,40, mientras que los coeficientes de depreciación pueden estimarse comprendidos entre 0,55 y 0,65 para luminarias abiertas, y entre 0,65 y 0,75 para luminarias cerradas.

Tabla 13.37

Dimensiones en metros			*Potencia de las lámparas (vatios)*						
			100	*150*	*200*	*300*	*500*	*750*	*1 000*
A	*B*	*C*	*Nivel luminoso (lux)*						
		0,80	320	500	750	—	—	—	—
1,20	0,70	0,60	400	650	—	—	—	—	—
		0,40	600	—	—	—	—	—	—
		1,20	140	220	340	—	—	—	—
1,80	1,05	0,90	180	300	450	—	—	—	—
		0,60	280	450	650	—	—	—	—
		1,60	—	130	190	450	750	1 150	—
2,40	1,40	1,20	100	170	250	550	1 000	—	—
		0,80	160	250	360	850	—	—	—
		3,05	—	—	120	190	330	450	—
3,05	1,80	1,50	—	110	160	360	650	800	—
		1,00	100	160	230	550	950	—	—
		3,65	—	—	—	100	180	240	340
4,55	2,75	1,80	—	—	—	200	350	450	650
		1,20	—	—	—	300	500	700	950
		3,65	—	—	—	—	140	180	250
6,10	3,65	1,80	—	—	—	150	260	340	400
		1,20	—	—	—	220	390	500	700

13.28.3 *Alumbrado de carteles publicitarios con proyectores asimétricos para lámparas incandescentes halogenadas*

En esta clase de alumbrados es aconsejable instalar los proyectores en el suelo, de forma que la iluminación se efectúe de abajo hacia arriba siempre que ello sea posible; se puede, no obstante, colocar los proyectores en la parte supe-

rior del cartel mediante brazos de longitud adecuada, tal como se hacía con los proyectores simétricos. Las separaciones normales entre el cartel y los proyectores oscilan entre 2 y 4 m aproximadamente, y la orientación de éstos debe ser tal que el centro del haz incida sobre un punto cuya situación sea la indicada en la figura 13.38. Los coeficientes de utilización de los proyectores para lámparas halogenadas en las condiciones establecidas pueden variar entre 0,35 y 0,45, mientras que los coeficientes de depreciación se pueden estimar comprendidos entre 0,75 y 0,85.

Para determinar el número de proyectores necesarios para obtener el nivel de iluminación deseado, se utiliza la fórmula indicada en los apartados anteriores.

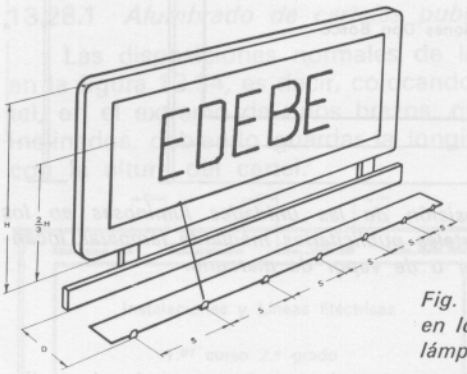


Fig. 13.38 Disposición de las unidades luminosas en los alumbrados de carteles publicitarios, mediante lámparas incandescentes halogenadas.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Realizar un estudio sobre aplicación práctica de cada una de las fuentes de luz estudiadas, según sus características.

— Calcular el alumbrado del aula de Dibujo.

— Calcular el número de luminarias que se deben utilizar para el alumbrado de un cartel publicitario, con las medidas siguientes: altura, 3 m; superficie, 18 m^2; el lugar de colocación es de libre elección.

CUESTIONARIO

13.1 Qué diferencia hay entre flujo luminoso e intensidad luminosa.

13.2 A qué distancia *OP* de una fuente de luz, con una intensidad luminosa de 600 cd, se alcanzará un nivel de iluminación de 50 lx, si la dirección de la intensidad luminosa forma, con la vertical trazada desde el punto *P*, un ángulo de 75°.

13.3 ¿Cuáles son los sistemas de mayor uso de producción de luz?

13.4 Explica el fenómeno de evaporación en un filamento de una lámpara de incandescencia.

13.5 En qué tipo de iluminación usarías una lámpara incandescente reflectora.

13.6 En las lámparas de descarga, es preciso colocar un dispositivo exterior para limitar la corriente. ¿Sabes explicar por qué?

13.7 Para evitar el dispositivo anterior, se desarrolló un nuevo tipo de lámpara. ¿Cuál es y cómo lo consigue evitar?

13.8 Las lámparas de vapor de sodio se utilizan, en general, en alumbrados de carretera y vías de circulación. Explica a qué se debe.

13.9 Explica la acción del cebador de un tubo fluorescente.

13.10 Qué sistemas de alumbrado conoces.

13.11 Qué relación tiene el ángulo de radiación directa con el coeficiente de utilización.

13.12 Conocido el nivel medio de iluminación de un local y sus dimensiones, ¿cómo hallaremos el flujo luminoso?

13.13 Qué distancias suelen separar los puntos de luz extremos de las paredes, con cualquier tipo de luminaria.

13.14 En alumbrados publicitarios, cuándo será mayor el nivel medio de iluminación recomendado, con alrededores iluminados o alrededores oscuros. ¿Por qué?

BIBLIOGRAFIA

CASADO R., *Tecnología Eléctrica/2,* Bruño-Ediciones Don Bosco, Barcelona 1977.

Equipo Técnico JOSA (BJC), Luminotecnia, Barcelona 1975.

LEBLANC M., *Iluminación e instalaciones eléctricas,* Marcombo, S. A., Barcelona 1963.

Tema 14. Técnicas y aparatos de medida

OBJETIVOS

— *Describir los instrumentos de medida desde el punto de vista de su funcionamiento.*

— *Desarrollar las técnicas más usuales en las mediciones de las principales magnitudes eléctricas.*

— *Conocer las partes básicas de los diferentes aparatos de medida.*

— *Comparar instrumentos de medida atendiendo a su funcionamiento y precisión.*

— *Citar los principales métodos de medida de potencias.*

— *Indicar las principales magnitudes que puede medir un aparato de medida universal.*

GUION

— Introducción a las medidas eléctricas.
— Características generales de los aparatos de medida.
— Clasificación de los aparatos de medida.
— Medida de intensidades. Amperímetros.
— Medida de tensiones. Voltímetros.
— Medida de potencias. Vatímetros.
— Medida de energía. Contadores.
— Registradores.
— Medida de resistencias, inductancias y capacidades.
— Medida de frecuencias y factores de potencia.
— Aparatos de medida universales. Multímetros.

PUNTOS CLAVE

— Desarrollar las técnicas de medida más generalizadas.
— Describir los aparatos de medida de las magnitudes eléctricas básicas.
— Clasificar los aparatos de medida según su funcionamiento y magnitud por medir.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

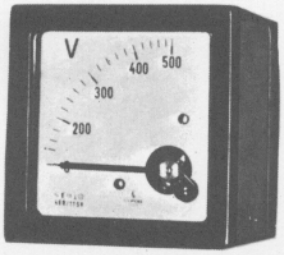
— Repaso del Tema 2, circuitos de corriente alterna.

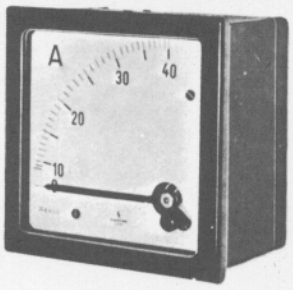
EXPOSICION DEL TEMA

14.1 Introducción a las medidas eléctricas

Dada la importancia que actualmente tiene la energía eléctrica en cualquier país industrializado o en fase de industrialización se comprende fácilmente la importancia del conocimiento total de las *magnitudes* que intervienen en cualquier instalación o dispositivo eléctrico.

El conocimiento y control de las magnitudes citadas se logra fundamentalmente con la ayuda de los *aparatos de medida eléctricos.* Además de los apa-





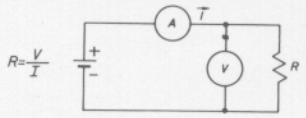


Fig. 14.2 Medición de una resistencia con voltímetro y amperímetro.

ratos es necesario conocer las *técnicas* más adecuadas para cada medición con objeto de evitar errores que falsearían los resultados.

En la tabla 14.1, se indican los aparatos empleados en la medición de las principales magnitudes eléctricas y magnéticas.

Tabla 14.1 Magnitudes eléctricas y magnéticas

	Magnitudes	*Símbolo*	*Unidad Giorgi*		*Aparato para su medición*
			Denominación	*Símbolo*	
Eléctricas	Cant. corriente	Q	Culombio	C	galvanómetro balístico
	Corriente	I	Amperio	A	amperímetro galvanómetro
	Resistencia	R	Ohmio	Ω	óhmetro y puentes
	Tensión	V	Voltio	V	voltímetro
	Potencia	P	Vatio	W	vatímetro
	Energía	W	Julio	J	contador
	Capacidad	C	Faradio	F	puente para capacidad
	Frecuencia	f	Hertz	Hz	frecuencímetro
	Factor de potencia	φ	Grados		fasímetro
Magnéticas	Inductancia	L	Henrio	H	puente para inductancia
	Flujo magnético	Φ	Weber	Wb	fluxímetro
	Inducción	B	Tesla	Wb/m^2	
	Fuerza Magnetomotriz	F	Amp. vuelta	Av	tensímetro magnético

14.1.1 *Técnicas utilizadas en las mediciones eléctricas*

En general, puede afirmarse que las técnicas empleadas en las mediciones de magnitudes eléctricas se resumen en dos:

a) De medición *industrial.*

b) De medición *de precisión.*



14.1.1.1 *Medición eléctrica industrial*

Comprende las mediciones necesarias para el control y seguridad de funcionamiento de cualquier instalación o dispositivo eléctrico industrial.

Los aparatos de medida eléctrica industrial se montan en cuadros, aunque en algunas ocasiones son portátiles; en ambos casos han de ser prácticos y robustos.

Las técnicas utilizadas en estas mediciones son muy simples y tienden siempre a facilitar las lecturas de las magnitudes; un ejemplo sería la medición de una resistencia con voltímetro y amperímetro de cuadro (fig. 14.2).

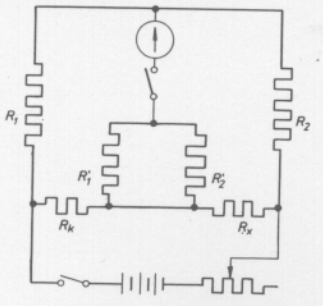


Fig. 14.3 Medición de una resistencia con un puente de resistencias.

14.1.1.2 *Medición eléctrica de precisión*

Abarca el campo de mediciones destinadas a la investigación y al desarrollo de la técnica.

Este tipo de aparatos de medida debe responder a extrictas exigencias de exactitud, lo que únicamente es posible cuando se construye en talleres apropiados (luminosidad, clima acondicionado, etc.) y por personal especializado.

Las técnicas seguidas en este tipo de mediciones son, en general, complicadas ya que han de buscar los resultados con la máxima precisión. En la figura 14.3, se muestra un aparato de gran precisión con su esquema interior, utilizado para la medición de resistencias muy pequeñas.

14.2 Características generales de los aparatos de medida

Aunque el principio de funcionamiento varía en algunos aparatos, sin embargo son bastantes los aspectos comunes a la mayoría de los instrumentos de medición. Con objeto de no repetirlos al describir cada tipo de aparato, se hace a continuación un resumen de los aspectos generales.

14.2.1 *Simbología*

Con el fin de identificar cada aparato, se han adoptado internacionalmente unos símbolos que pueden apreciarse en la tabla 14.4.

Una adecuada rotulación de los símbolos en el interior del aparato permitirá identificarlo fácilmente.

14.2.2 *Funcionamiento*

Por ser el instrumento indicador el más importante de los diversos tipos, se explicará brevemente su funcionamiento general.

El sistema de medida consta de los órganos productores del movimiento y el órgano móvil, cuyo desplazamiento depende del valor de la magnitud mensurable.

Esta magnitud produce, en la parte móvil, una fuerza motriz que tiende a desplazarlo de su posición de reposo (fig. 14.5) a otra posición, en la que actuará una fuerza antagonista proporcionada por un muelle. El órgano móvil se detendrá en un punto tal que la fuerza motriz sea igual a la fuerza antagónica, y la lectura de la medición la dará un índice sobre una escala graduada.

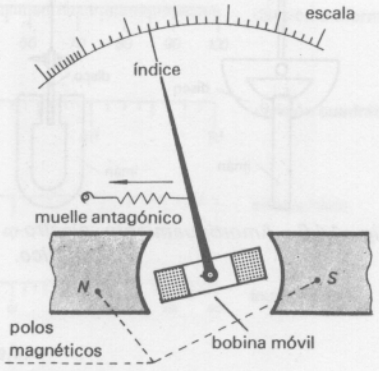


Fig. 14.5 Dispositivo medidor.

Tabla 14.4 Símbolos utilizados en los aparatos de medida

Símbolo	*Denominación*	*Símbolo*	*Denominación*	*Símbolo*	*Aparatos*
	Instrumento de bobina móvil con imán permanente, en general.		Convertidor termoeléctrico, aislado.	(A)	AMPERIMETRO
	Medidor de cocientes de carrete móvil.		Convertidor termoeléctrico con instrumento de bobina móvil.	(Ω)	OHMETRO
	Instrumento de imán móvil.		Rectificador.	(V)	VOLTIMETRO
	Instrumento de imán móvil medidor de cocientes.		Rectificador con instrumento de bobina móvil.	(W)	VATIMETRO
	Instrumento de hierro móvil.		Símbolo indicador de blindaje de hierro.	(VAr)	VARIMETRO
	Instrumento de hierro móvil medidor de cocientes.		Símbolo indicador de pantalla electrostática.	(f)	FRECUENCIMETRO
	Instrumento electrodinámico, sin hierro.	ast	Instrumento astático.	(φ)	FASIMETRO
	Instrumento electrodinámico medidor de cocientes, sin hierro.	—	Corriente continua.		SINCRONOSCOPIO
	Instrumento electrodinamico con circuito magnético de hierro.	~	Corriente alterna.	kWh	CONTADOR kWh.
	Instrumento electrodinámico medidor de cocientes, con circuito magnético de hierro.	≂	Corrientes continua y alterna.	kVArh	CONTADOR kVArh.
	Instrumento de inducción.	≋	Instrumento de corriente trifásica con un circuito medidor.		
	Instrumento de inducción medidor de cocientes.	≋	Instrumento de corriente trifásica con dos circuitos medidores.		
	Instrumento térmico de alambre dilatable.	≋	Instrumento de corriente trifásica con tres circuitos medidores.		
	Instrumento bimetálico.	⊥	Posición de empleo vertical.		
	Instrumento electrostático.	⊓	Posición de empleo horizontal.		
	Instrumento de vibración.	∠60°	Posición de empleo con un determinado ángulo de inclinación.		
	Convertidor termoeléctrico, en general.		Dispositivo de ajuste del cero.		
		☆	Signo de la tensión de prueba (estrella de contorno negro).		

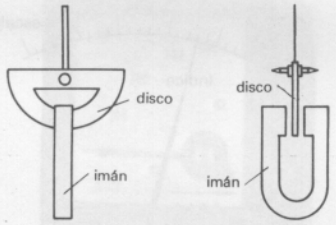


Fig. 14.6 Amortiguamiento electromagnético.

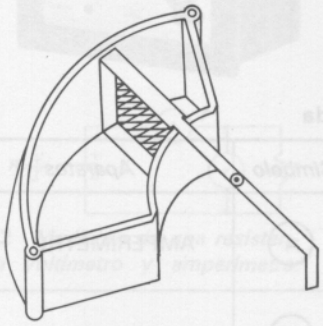


Fig. 14.7 Amortiguamiento por aire.

14.2.3 *Amortiguamiento*

Al conectar un aparato de medida a un circuito eléctrico se producirá el movimiento del órgano móvil hasta sobrepasar el punto de equilibrio teniendo que retroceder de nuevo, y así sucesivamente, de forma que se necesita un tiempo elevado para conseguir alcanzar el punto de equilibrio entre la fuerza motriz y la antagónica.

Para evitar estas oscilaciones, los aparatos disponen de sistemas de amortiguamiento, bien sean *electromagnéticos,* bien *de aire.*

14.2.3.1 *Tipos de amortiguamiento*

El amortiguamiento *electromagnético* está basado en el frenado por corrientes parásitas. Para ello el eje del aparato dispone de un disco metálico que se desplaza entre los polos de un imán permanente (fig. 14.6) induciéndose en el disco unas corrientes de Foucault que provocan el frenado del eje.

El *de aire* está formado por una pala de material ligero, solidaria al eje de giro, que se desplaza en el interior de una cámara cerrada de aire (fig. 14.7) motivando el frenado rápido del aparato.

14.2.4 *Tipos de apoyos del órgano móvil*

El tipo de apoyo dependerá del grado de precisión del aparato. En general, se dividen en tres tipos:

a) *De cintas,* formado por dos cintas de platino aleado muy finas; es adecuado para los instrumentos muy sensibles.

b) *De pivotes,* apoyados sobre asientos de bronce, con cavidad cónica, en los aparatos industriales; y sobre una piedra dura (ágata, zafiro, rubí), en los aparatos de precisión (fig. 14.8).

c) *De cojinetes,* en los instrumentos registradores y los destinados a vehículos, los extremos de los ejes, de acero, descansan sobre un cojinete formado por dos piedras, la piedra guía y la de asiento. Esta disposición de montaje les permite soportar esfuerzos en varias direcciones.

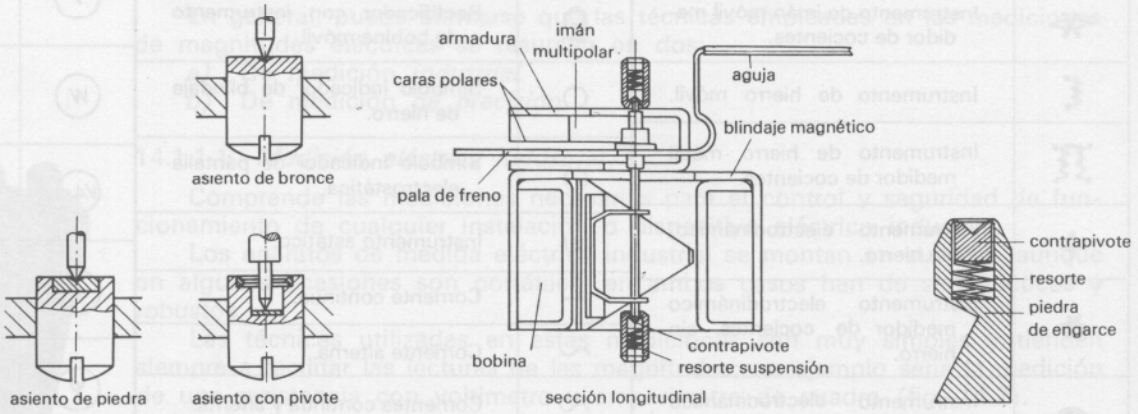


Fig. 14.8 Tipos de apoyo del órgano móvil.

14.2.5 *Dispositivos de lectura*

En la lectura de una medición, intervienen la *escala* y el *índice.*

14.2.5.1 *Escala*

La escala de un aparato de medida es un cuadrante graduado en el que queda indicada la lectura por la posición del índice.

Las escalas pueden ser: uniformes, cuadráticas, ensanchadas, logarítmicas, etc. También pueden clasificarse, según la graduación, en: gruesa, fina, doble, etc. (fig. 14.9).

14.2.5.2 *Indice*

Es la parte del aparato que señala el valor de la medición sobre la escala. Según la precisión del aparato pueden ser: de cuchilla o de hilo (aparatos de precisión) y de varilla o lanza en los aparatos industriales (fig. 14.10).

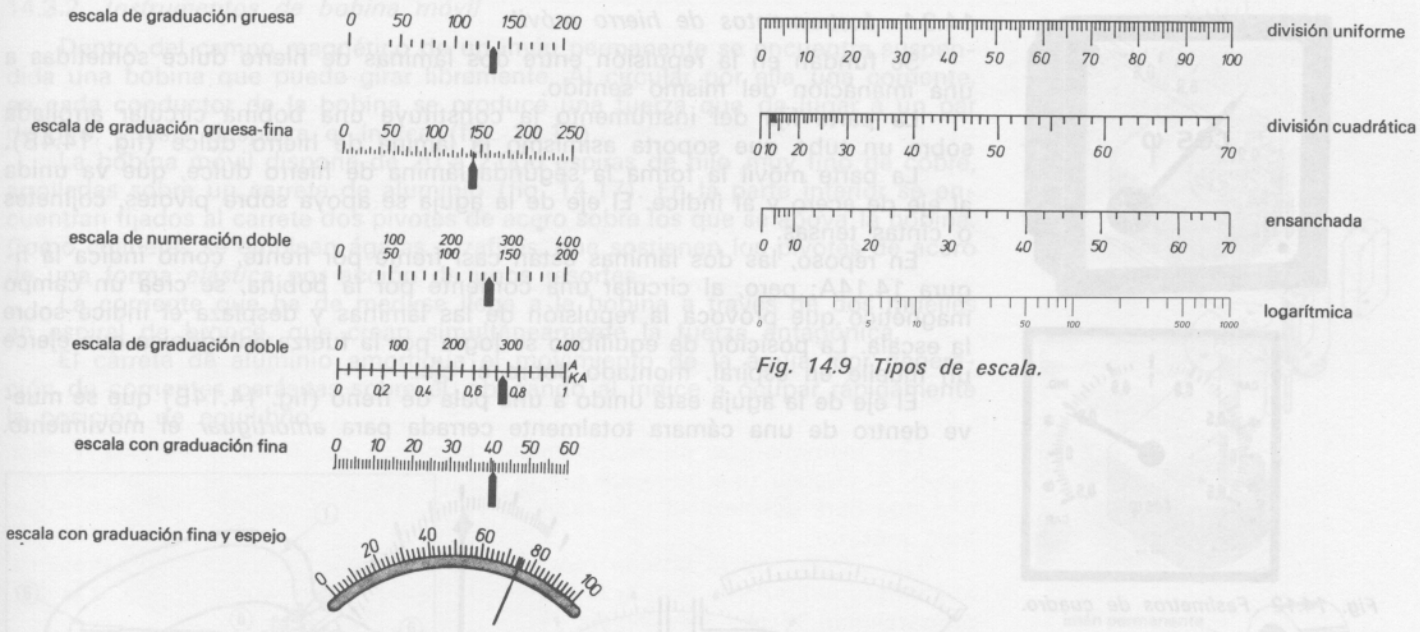


Fig. 14.9 Tipos de escala.

Normalmente, todos los aparatos disponen de un tornillo de puesta a cero del índice en reposo, puesto que, por movimiento del aparato u otros motivos, ha podido desviarse de la posición correcta.

14.2.6 *Definiciones de términos relacionados con aparatos de medida*

Instrumento de medida. Es el conjunto formado por el sistema de medida, la caja del mismo y los accesorios incorporados.

Aparato de medida. Es el conjunto formado por el sistema de medida, la caja del mismo, los accesorios incorporados y no incorporados.

Campo de indicación. Es el alcance total de la escala (fondo de escala).

Campo de medición. Es solamente la parte de la escala que puede medirse con exactitud.

Constante del instrumento. Es el cociente entre el fondo de escala y el número de divisiones. Cuando un aparato disponga de varios fondos de escala, tendrá varias constantes. Ejemplo: un voltímetro de fondo de escala 150 y 300 V, tiene 150 divisiones, por lo que sus constantes serán:

$$K_1 = \frac{150\ V}{150\ div.} = 1\ V/div.$$

$$K_2 = \frac{300\ V}{150\ div.} = 2\ V/div.$$

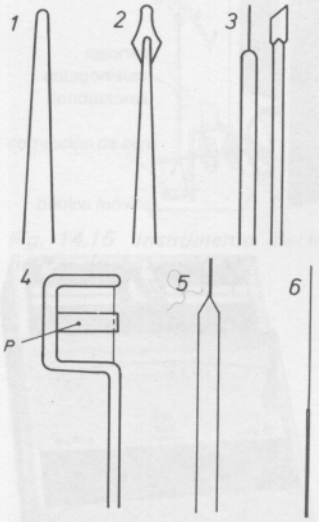


Fig. 14.10 Tipos de índice: 1, de varilla; 2, de lanza; 3, de cuchilla; 4, de hilo (P es un papel blanco); 5, aguja de forma angular; 6, aguja de forma tubular.

14.3 Clasificación de los aparatos de medida

Dada la extensión en el campo de las medidas, es preciso hacer la división de aparatos según varios criterios, que pueden resumirse en los siguientes:

a) *Principio de funcionamiento.* Que los divide en instrumentos de hierro móvil, de bobina móvil (fig. 14.11), electrodinámicos, electrotérmicos, de inducción, de vibración y electrostáticos.

b) *Magnitud por medir.* Pueden ser: voltímetros, amperímetros, vatímetros, ohmímetros, frecuencímetros, fasímetros (fig. 14.12), capacímetros, tacómetros, contadores, etc.

c) *Precisión.* En general se dividen en aparatos y equipos portátiles de uso industrial y aparatos para laboratorio (fig. 14.13).

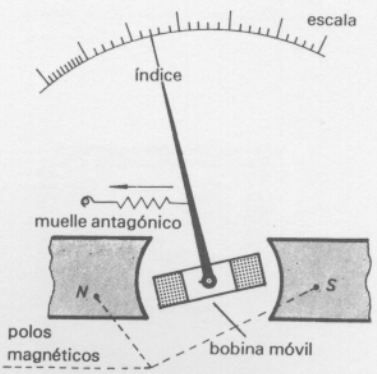


Fig. 14.11 Instrumento de medida de bobina móvil.

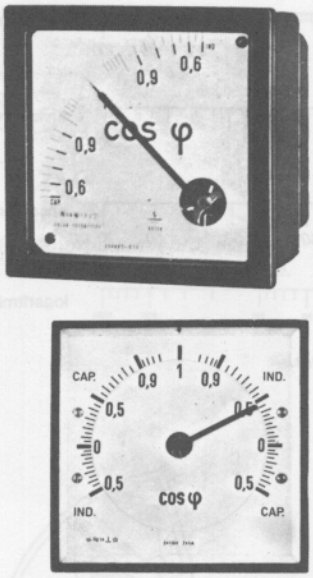


Fig. 14.12 Fasímetros de cuadro.



Fig. 14.13 Voltímetro de precisión.

14.3.1 *Instrumentos de hierro móvil*

Se fundan en la repulsión entre dos láminas de hierro dulce sometidas a una imanación del mismo sentido.

La parte fija del instrumento la constituye una bobina circular arrollada sobre un tubo que soporta asimismo la lámina de hierro dulce (fig. 14.4B).

La parte móvil la forma la segunda lámina de hierro dulce, que va unida al eje de acero y al índice. El eje de la aguja se apoya sobre pivotes, cojinetes o cintas tensas.

En reposo, las dos láminas están casi frente por frente, como indica la figura 14.14A; pero, al circular una corriente por la bobina, se crea un campo magnético que provoca la repulsión de las láminas y desplaza el índice sobre la escala. La posición de equilibrio se logra por la fuerza antagónica que ejerce un muelle en espiral, montado sobre el eje.

El eje de la aguja está unido a una pala de freno (fig. 14.14B) que se mueve dentro de una cámara totalmente cerrada para *amortiguar* el movimiento.

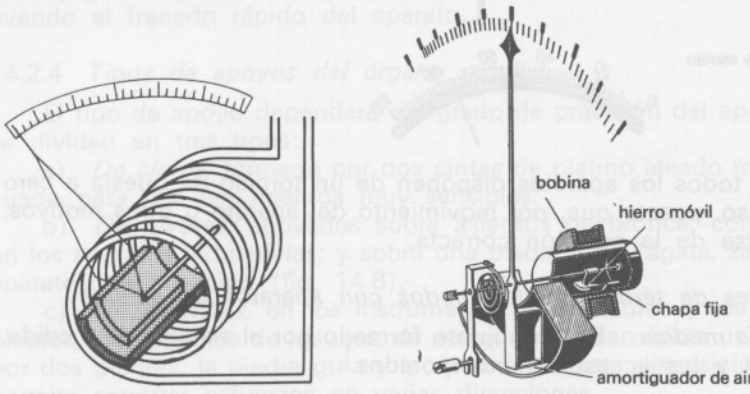


Fig. 14.14 Instrumento de hierro móvil: A, *aparato en reposo;* B, *sistema de medida.*

14.3.1.1 *Características más destacadas de los instrumentos de hierro móvil*

El campo de aplicación principal de los aparatos de hierro móvil lo constituyen las medidas *tensión* e *intensidad* en c. a. a la frecuencia industrial, indicando valores eficaces. No obstante, también puede utilizarse en c. c., puesto que una inversión de la corriente invierte a la vez el campo magnético en las dos láminas y sigue produciéndose la repulsión entre ellas.

El error en la indicación puede ser distinto en c. a. que en c. c. según la gama de medida; generalmente, se ajustan estos aparatos para una c. a. de 50 Hz.

La forma de la escala es cuadrática. Pero variando las dimensiones de las láminas, se pueden conseguir escalas prácticamente uniformes.

Actualmente, el instrumento electromagnético, por sencillo, robusto y seguro, es el aparato más comercial, especialmente para c. a. (fig. 14.15).

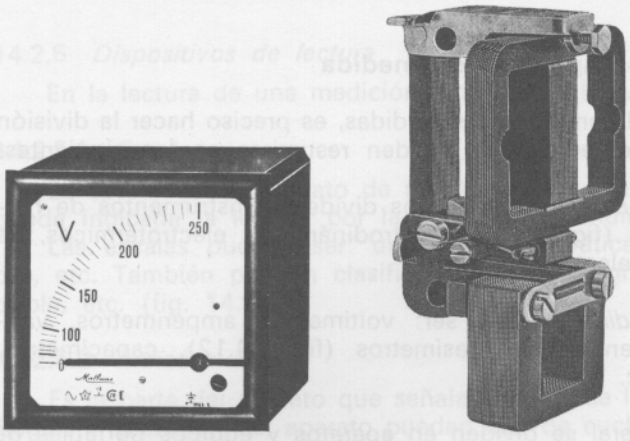


Fig. 14.15 Voltímetro de hierro móvil.

14.3.2 *Instrumentos de bobina móvil*

Dentro del campo magnético de un imán permanente se encuentra suspendida una bobina que puede girar libremente. Al circular por ella una corriente, en cada conductor de la bobina se produce una fuerza que da lugar a un par de giro, y éste desplaza el índice (fig. 14.16).

La bobina móvil dispone de 20 a 2 000 espiras de hilo muy fino de cobre, arrolladas sobre un carrete de aluminio (fig. 14.17). En la parte interior se encuentran fijados al carrete dos pivotes de acero sobre los que se apoya la bobina. Como cojinetes se emplean ágatas o zafiros, que sostienen los pivotes de acero de una forma *elástica* por acción de unos resortes.

La corriente que ha de medirse llega a la bobina a través de dos muelles en espiral de bronce, que crean simultáneamente la fuerza antagónica.

El carrete de aluminio amortigua el movimiento de la aguja, por generación de corrientes parásitas sobre él, obligando al índice a ocupar rápidamente la posición de equilibrio.

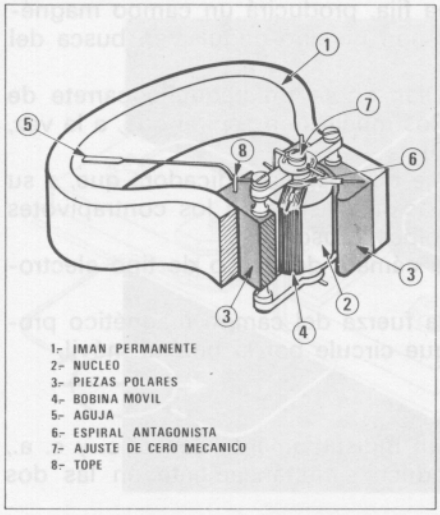
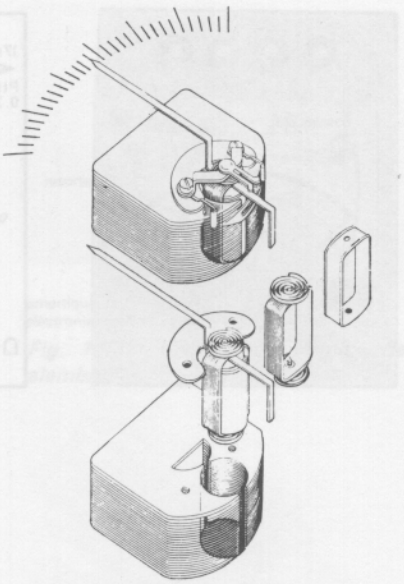


Fig. 14.17 Mecanismo básico del instrumento de bobina móvil.



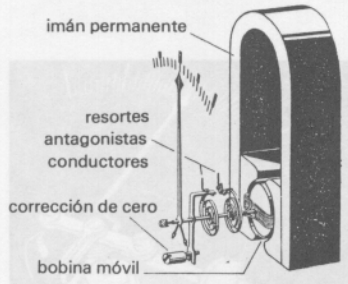


Fig. 14.16 Instrumento electromagnético de bobina móvil.

14.3.2.1 *Características más destacables*

Estos instrumentos sólo pueden utilizarse en c. c., por lo que habrá de conocerse la polaridad del circuito, para medir correctamente. Si el aparato se conectase con polaridad contraria, la parte móvil se desplazaría hacia atrás hasta el tope, por lo que sería necesario invertir las conexiones que llegan a los bornes del aparato.

También puede conectarse a circuitos de c. a., empleando un puente de rectificación, que irá alojado en el interior del aparato (fig. 14.18).

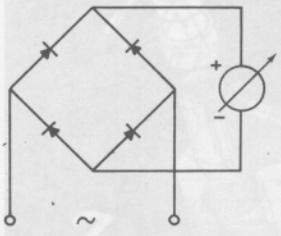


Fig. 14.18 Aparato de bobina móvil para c. a.

Los aparatos de medida basados en el sistema de bobina móvil e imán fijo son: galvanómetros, amperímetros, voltímetros, frecuencímetros, etc.

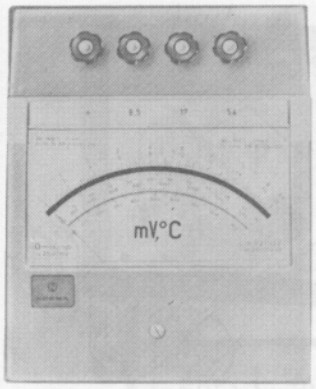
El instrumento de bobina móvil es el más adecuado para mediciones de tensión e intensidad en c. c. y alcanza mayor precisión que el resto de los aparatos.

En la figura 14.19, se muestra un milivoltímetro portátil de precisión, adecuado para medición de temperaturas con termopares de Fe-Constantán, o NiCr-Ni; su parte móvil es del tipo de aguja de cuchillo; la escala, de espejo; y la suspensión, por cintas tensadas.

La forma de la escala de los aparatos de bobina móvil es uniforme en toda su extensión.

14.3.3 *Instrumentos electrodinámicos*

El funcionamiento de estos instrumentos está basado en la regla del flujo máximo, según la cual, cualquier circuito eléctrico recorrido por una corriente, en un campo magnético, se desplazará buscando la posición que abarque el máximo flujo.



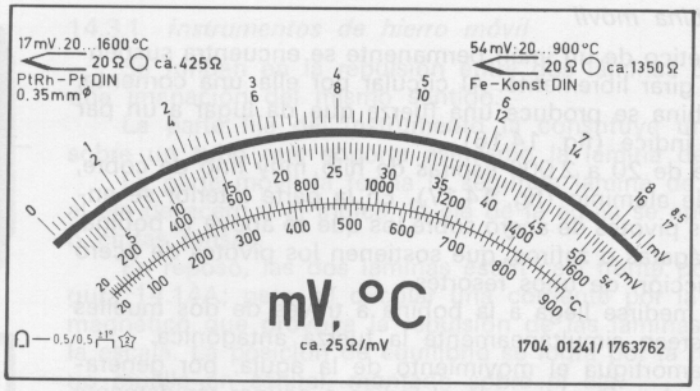


Fig. 14.19 Milivoltímetro-pirómetro de bobina móvil.

Los instrumentos electrodinámicos disponen de una bobina fija y otra móvil. Al circular una corriente por la bobina fija, producirá un campo magnético que hará desplazarse a la bobina móvil con un giro angular en busca del flujo máximo.

Las espiras de la bobina móvil se arrollan sobre un pequeño carrete de aluminio y la corriente llega a la bobina por los muelles en espiral que, a la vez, proporcionan el par antagonista (fig. 14.20).

La bobina móvil se une rígidamente al eje de la aguja indicadora que, a su vez, descansa sobre ágatas o zafiros, con fijación elástica en los contrapivotes de modo que el conjunto pueda resistir golpes bruscos.

El dispositivo de amortiguamiento es de cámara de aire o de tipo electromagnético.

La desviación de la aguja depende de la fuerza del campo magnético producido por la bobina fija y de la corriente que circule por la bobina móvil.

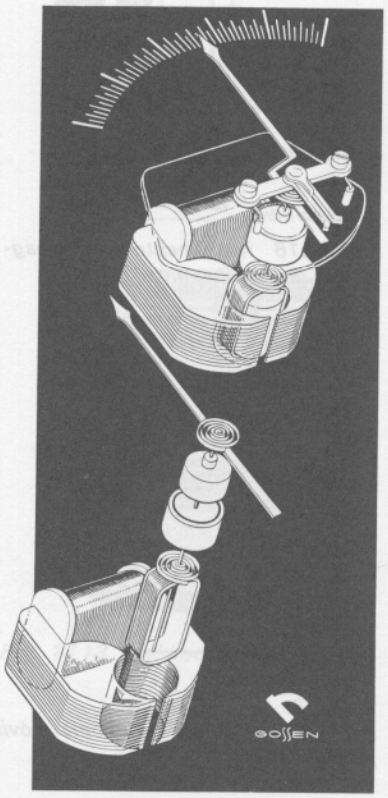


Fig. 14.20 Sistema de medida electrodinámico.

14.3.3.1 *Características más destacables*

Los aparatos electromagnéticos funcionan indistintamente con c. c. y c. a., ya que la inversión de la corriente se produce simultáneamente en las dos bobinas.

El uso normal de este aparato es como *vatímetro* (fig. 14.21); para ello se conectará la bobina fija en serie con el circuito (circuito de intensidad); y la bobina móvil, en derivación (circuito de tensión).

Con objeto de conseguir fuertes campos magnéticos, se dispone la bobina fija sobre un núcleo de chapa magnética (instrumentos ferrodinámicos), excepto en el caso de mediciones de c. a. en frecuencias superiores a 10 000 Hz, que utilizan sistemas de medida sin hierro.

La forma de la escala es uniforme en toda su extensión al funcionar como vatímetro.

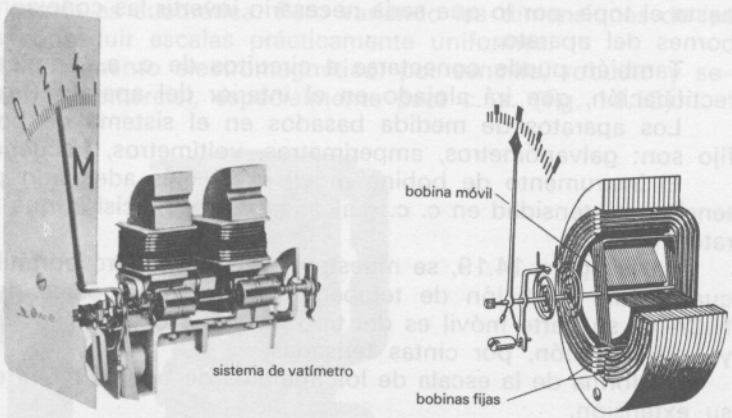


Fig. 14.21 Vatímetro electrodinámico.

14.3.4 *Instrumentos térmicos*

Basados en el efecto calorífico de la corriente eléctrica, se construyen instrumentos térmicos de alambre, de termopar y bimetálicos.

14.3.4.1 *Instrumento de alambre*

Consiste en un hilo muy fino de platino-iridio, resistente al calor y a la tracción, que se dilata por el aumento de la temperatura al ser atravesado por la corriente eléctrica.

La figura 14.22 representa este aparato. El amortiguamiento es electromagnético.

Este instrumento no es muy utilizado, debido a su lentitud, consumo, etc.

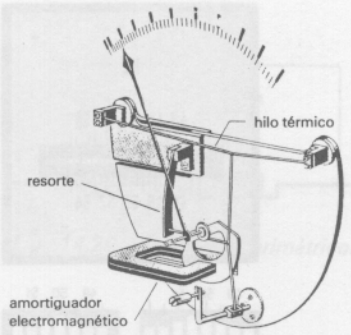
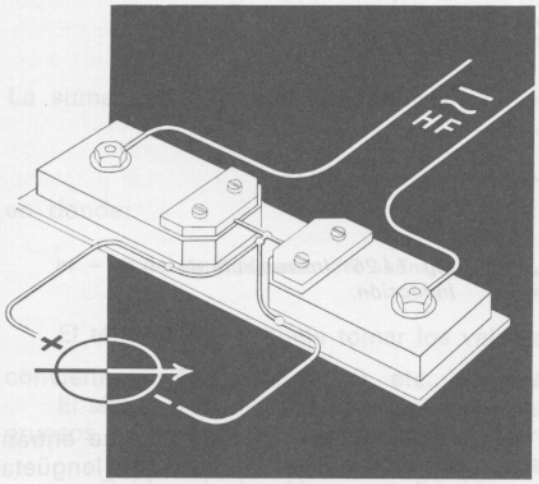


Fig. 14.22 Instrumento térmico de alambre.

14.3.4.2 *Instrumentos de par termoeléctrico*

Están basados en la producción de fuerza electromotriz en un par termoeléctrico.

Un termopar está formado por la unión de dos metales diferentes, como cobre-constantán, hierro-constantán, níquel cromo-níquel, etc., que, al ser sometidos a un aumento de temperatura, generan una tensión entre sus extremos. La medición de la tensión se hace con un milivoltímetro de bobina móvil (fig. 14.23).



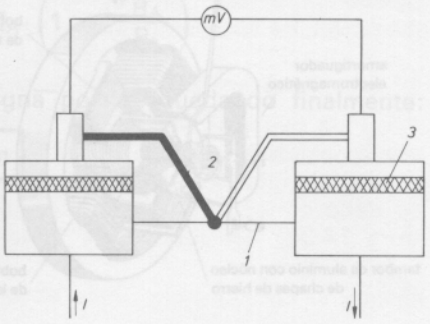


Fig. 14.23 Instrumento de medida con par termoeléctrico: 1, resistencia de caldeo; 2, termopar; 3, aislante.

La corriente que debe medirse calienta un hilo o una cinta, y ese calor se transmitirá directa o indirectamente al termopar.

La indicación de este aparato es, pues, la medida de la *intensidad de la corriente* que calienta el hilo citado anteriormente. El resultado de la medición expresa valores eficaces.

La mayor aplicación de estos aparatos se da en la fabricación de voltímetros y amperímetros, aptos para altas frecuencias.

El tipo de escala es cuadrático, ya que el calor producido es proporcional al cuadrado de la intensidad.

14.3.4.3 *Instrumentos bimetálicos*

Estos aparatos están formados por una espiral bimetálica que se calienta por los efectos de la corriente que se hace circular por ella, dilatándose a medida que va aumentando la temperatura. Esta dilatación varía con el cuadrado de la intensidad. El extremo libre de la espiral se desplaza haciendo girar la aguja sobre la escala (fig. 14.24).

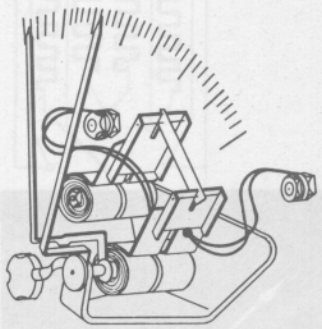


Fig. 14.24 Instrumento bimetálico.

Las mediciones se efectúan al cabo de un tiempo (8 a 15 minutos), debido a la inercia de dilatación de la espiral *bimetálica.*

En la figura 14.24, se observa que el instrumento dispone de una segunda espiral, cuya misión es la de compensar la influencia de la temperatura ambiente, factor muy a tener en cuenta en estos aparatos.

Estos aparatos son adecuados para medir valores medios de magnitudes, siendo su principal aplicación como amperímetros (indicadores de máxima), para lo cual disponen de una segunda aguja, que es arrastrada por la indicadora solamente en sentido ascendente (fig. 14.25).

La escala de estos aparatos es del tipo cuadrático.

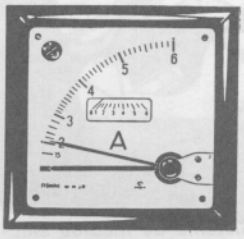
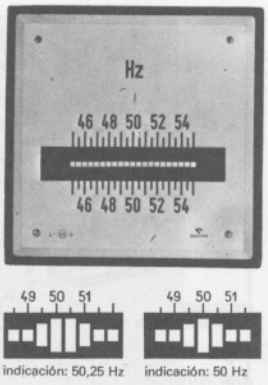


Fig. 14.25 Amperímetro de máxima.

14.3.5 *Instrumentos de inducción*

Están basados en el principio de inducción electromagnética, por lo que serán aplicables sólo a corrientes alternas.



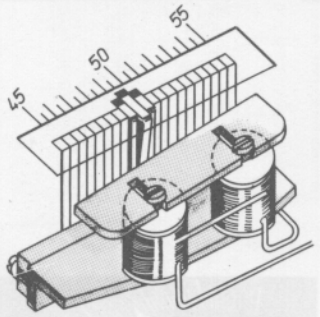


Fig. 14.27 Sistema de medida de vibración con lengüetas.

Están formados por un disco o tambor de aluminio unido a un eje apoyado en piedras duras; el eje dispone del índice y del muelle antagonista (fig. 14.26). La parte fija la constituyen varios electroimanes de chapa magnética, cuyas bobinas están conectadas en serie (bobinas de intensidad) o en derivación (bobinas de tensión) con el circuito que hay que medir.

Al conectar las bobinas al circuito, producirán un campo magnético que atravesará el tambor, induciendo unas corrientes parásitas; la existencia simultánea de un campo magnético y de corrientes en el disco da lugar a una fuerza que lo pone en movimiento, arrastrando a su vez al índice.

El amortiguamiento se logra por un imán permanente, que induce corrientes de frenado al moverse el disco.

Este tipo de instrumentos es muy adecuado para la medición de potencias (vatímetros) y principalmente para medidas de energía (contadores).

La escala de este instrumento (vatímetro) es del tipo cuadrático.

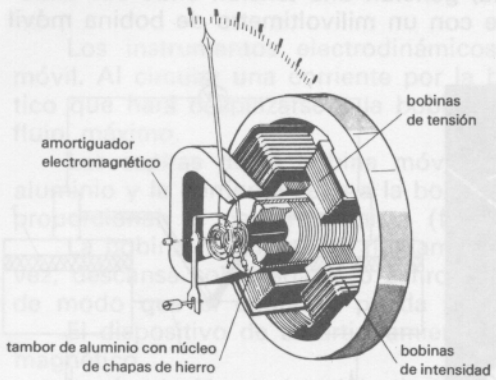


Fig. 14.26 Instrumento de inducción.

14.3.6 *Instrumentos de vibración*

En el campo de un electroimán vibran una serie de lengüetas que entran en resonancia con la c. a. que excita al electroimán. Siempre vibra una lengüeta del peine al coincidir la frecuencia propia de vibración con la frecuencia de la c. a. aplicada (fig. 14.27).

Si el peine de lengüetas muestra en su parte frontal (donde las lengüetas están dobladas y esmaltadas en blanco) una figura de vibración simétrica, ésta corresponderá a la frecuencia que se desea medir.

Las escalas se subdividen en semiperíodos o períodos enteros.

14.3.7 *Instrumentos electrostáticos*

Al igual que en un condensador variable de uno o dos partes de placas, aquí se mueven dos aletas de aluminio entre dos placas fijas, haciendo girar al mismo tiempo al eje (fig. 14.28).

El eje está suspendido elásticamente entre dos zafiros y soporta la aguja indicadora, así como la pala de freno. El eje dispone de un muelle espiral que proporciona el par antagonista.

Al aplicar una tensión, se produce una atracción entre las placas fijas y las móviles, desplazando consigo el índice.

Una ventaja muy notable en estos sistemas de medida es su consumo reducidísimo, tanto conectados a corriente alterna como a continua.

Su mayor aplicación está en el funcionamiento como voltímetro.

Los voltímetros electrostáticos se conectan directamente a la tensión que debe medirse. Según las normas internacionales, a estos aparatos se los considera sometidos a los efectos de alta tensión, por lo que ha de efectuarse la medida con las precauciones debidas, teniendo en cuenta que se conectan sin transformadores de tensión.

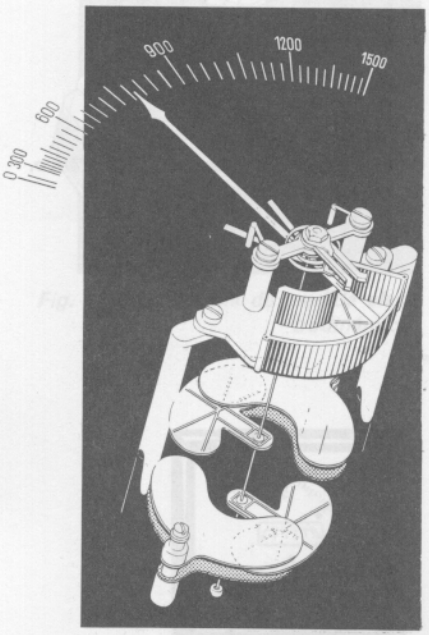


Fig. 14.28 Sistema de medida electrostático.

14.4 Medida de intensidades. Amperímetros

El aparato más adecuado para la medición de intensidades es el amperímetro, siendo su característica principal la conexión *en serie* en el circuito que ha de medirse.

Dado que los diversos tipos de instrumentos de medida admiten, por lo general, el paso de corrientes débiles, será necesario disponer de *shunts,* para desviar una parte de la corriente que hay que medir (fig. 14.29).

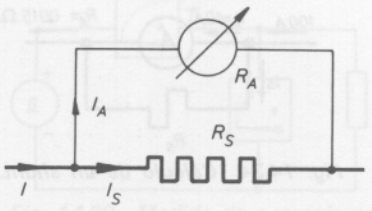


Fig. 14.29 Shunt amperimétrico.

14.4.1 *Shunt amperimétrico*

Observando la figura 14.29 y aplicando las leyes de Kirchhoff, resultará:

$$I = I_A + I_s \qquad [14.1]$$

$$R_s \cdot I_s = R_A \cdot I_A \qquad [14.2]$$

Despejando I_s en la ecuación [14.2] y sustituyéndolo en la [14.1], da:

$$I_s = \frac{R_A}{R_s} \cdot I_A$$

$$I = I_A + \frac{R_A}{R_s} \cdot I_A = I_A \left(1 + \frac{R_A}{R_s}\right)$$

La suma del interior del paréntesis se designa por *m*, quedando finalmente:

$$\boxed{I = I_A \cdot m}$$

en donde:

m = poder multiplicador del shunt.

El término $\frac{R_A}{R_s}$ suele tomar los valores de 9, 99, 999, etc., y por tanto se convierte en 10, 100, 1 000, etc., obteniéndose así lecturas sencillas.

El shunt se construye con varilla o cinta de manganina, soldadas a bloques gruesos de cobre. Las características más destacadas del shunt son:

— *Caídas de tensión normalizadas:*

60, 150, 300 mV (fig. 14.30).

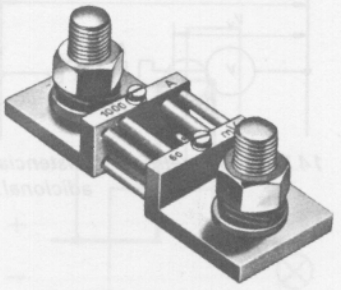


Fig. 14.30 Shunt amperimétrico de 60 mV.

— *Calibres normalizados:*

1, 1,5, 2,5, 4, 6, 10, 15, 25, 30, 40, 60, 80, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1 000, 1 500, 2 500, 3 000 A.

14.4.2 *Técnica de medición de intensidades*

Actualmente se construyen los amperímetros con distintos alcances, disponiendo varios shunts alojados en el interior del aparato (fig. 14.31).

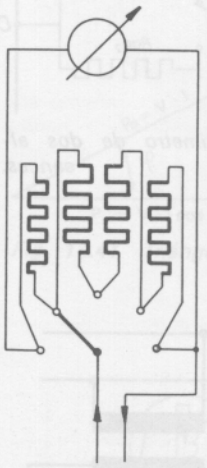


Fig. 14.31 Amperímetro de alcances múltiples.

La medición de intensidad se hará, una vez seleccionado el alcance del aparato, por aproximación a la corriente que va a circular por él, de forma que la aguja quede situada de la mitad hacia el final de la escala.

Las mediciones de intensidades elevadas en c. a. se hacen a través de transformadores de intensidad, que las reducen a valores inferiores (fig. 14.32).

Las mediciones de corrientes débiles se hacen a través de microamperímetros o galvanómetros, normalmente con escalas de cero central (fig. 14.33).

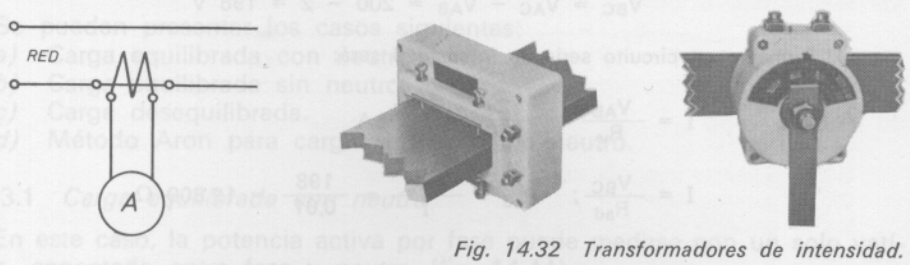


Fig. 14.32 Transformadores de intensidad.



Fig. 14.33 Galvanómetro con cero central.

Ejercicio de aplicación

Disponiendo de un amperímetro de fondo de escala de 10 A, y R_A = 0,015 Ω, ¿cómo se podría medir una intensidad de 100 A?

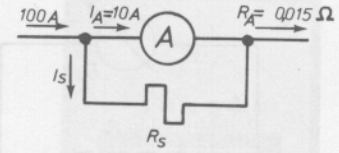


Fig. 14.34 Cálculo de un shunt.

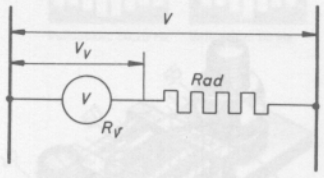


Fig. 14.35 Voltímetro y resistencia adicional.

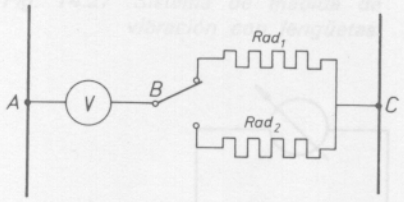


Fig. 14.36 Voltímetro de dos alcances.

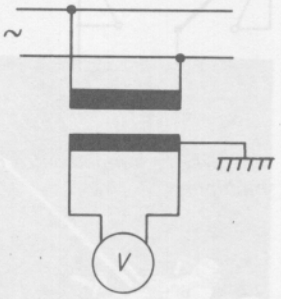


Fig. 14.37 Medición de tensión con transformador de medida.

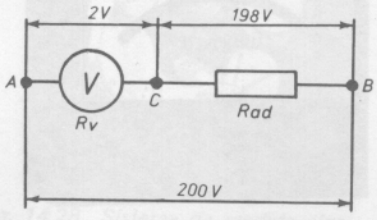


Fig. 14.38 Cálculo de una resistencia adicional de un voltímetro.

Solución:

Al circular una corriente de 100 A, las corrientes que circulan por el instrumento medidor (I_A) y por el shunt (I_s) (fig. 14.34), serán:

$$I_A = 10 \text{ A}$$
$$I_s = I - I_A = 100 - 10 = 90 \text{ A}$$

La resistencia del shunt será:

$$R_s = \frac{R_A \cdot I_A}{I_s} = \frac{0{,}015 \times 10}{90} = 0{,}00166\ \Omega$$

14.5 Medida de tensiones. Voltímetros

Las medidas de tensión de cualquier circuito se hacen a través de los *voltímetros* y se caracterizan por su conexión en *derivación* en el circuito por medir. El voltímetro más utilizado es el tipo amperimétrico, que indica la tensión por medición de una corriente.

14.5.1 *Resistencia adicional del voltímetro*

Para evitar alteraciones y errores en el circuito por medir, es necesario que sea atravesado por una corriente debilísima, consiguiéndose ésta con una gran resistencia interna. Dado que la resistencia del instrumento (R_v) es muy pequeña, se debe conectar en serie una resistencia adicional (R_{ad}) de valor elevado (figura 14.35), de forma que la tensión por medir sea:

$$V = (R_v + R_{ad}) \cdot I$$

Las resistencias adicionales se construyen de manganina, por ser prácticamente constante aunque varíe la temperatura. Observando la expresión anterior, se deduce que, al ser constante la resistencia, el valor de la tensión es proporcional a la intensidad.

14.5.2 *Técnicas de medición de tensiones*

Como sucedía en los amperímetros, también los voltímetros disponen de resistencias adicionales, que les permiten obtener varios alcances (fig. 14.36).

Las mediciones de tensiones se realizan con selección previa de escala apropiada, procurando que las medidas se tomen cuando la aguja indicadora esté hacia el final de la escala.

Cuando se haya de medir en alta tensión en c. a., es necesario hacerlo a través de un transformador de medida, que separará el circuito de *A. T.* del de *B. T.* (fig. 14.37).

Ejercicio de aplicación

Hallar el valor de la resistencia adicional que debe añadirse a un instrumento indicador, para conseguir medir tensiones hasta 200 V. El instrumento indicador tiene una resistencia de 200 Ω y fondo de escala de 2 V.

Solución:

Observando la figura 14.38, la caída de tensión en bornes de la resistencia adicional será:

$$V_{BC} = V_{AC} - V_{AB} = 200 - 2 = 198 \text{ V}$$

Al formarse un circuito serie, la intensidad será:

$$I = \frac{V_{AB}}{R_v} = \frac{2}{200} = 0{,}01 \text{ A}$$

$$I = \frac{V_{BC}}{R_{ad}}; \quad R_{ad} = \frac{V_{BC}}{I} = \frac{198}{0{,}01} = 19\,800\ \Omega$$

14.6 Medida de potencias. Vatímetros

Los receptores se conectan a dos tipos de corriente: *continua* y *alterna;* por lo que habrán de estudiarse ambos casos.

14.6.1 *Medida de potencia en corriente continua*

La potencia de un circuito eléctrico conectado a una red de c. c. (fig. 14.39) es el producto de la tensión por la intensidad:

$$P = V \cdot I$$

en donde:

V = tensión señalada por el voltímetro (V);
I = intensidad del amperímetro (A);
P = potencia consumida por el receptor (W).

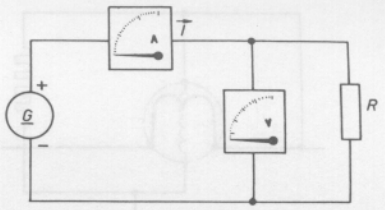


Fig. 14.39 Medida de potencia con voltímetro y amperímetro.

El voltímetro puede conectarse antes o después del amperímetro, dándose, en ambos casos, un error de medición que debe tenerse en cuenta en las medidas de cierta precisión.

En realidad, basta utilizar un solo aparato para realizar la medición de potencia, llamado *vatímetro,* normalmente del tipo electrodinámico. El aparato dispone de una bobina amperimétrica, conectada en serie con el circuito, y de una bobina voltimétrica en derivación (fig. 14.40).

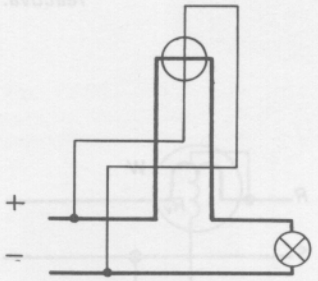


Fig. 14.40 Medida de potencia en c. c.

14.6.2 *Medida de potencia en corriente alterna monofásica*

Los receptores conectados a c. a. pueden absorber tres tipos de potencia (fig. 14.41):

— activa;
— reactiva;
— aparente.

La potencia aparente se calcula directamente como producto de la tensión por la intensidad.

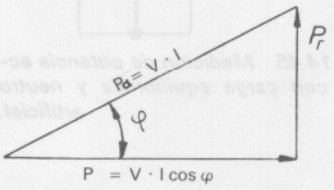


Fig. 14.41 Triángulo de potencias.

14.6.2.1 *Medición de la potencia activa en circuitos monofásicos*

La potencia activa se mide utilizando los vatímetros, bien sean electrodinámicos (los más empleados), bien de inducción.

El vatímetro electrodinámico dispone de una bobina fija, de pocas espiras, en serie con el circuito por medir, y otra móvil en derivación (voltimétrica). Este aparato debe construirse con un valor de bobina voltimétrica, totalmente resistivo, para *no producir desfase entre la tensión y la corriente* que circula por dicha bobina (fig. 14.42). En este caso, el sistema de medida indicará la potencia activa:

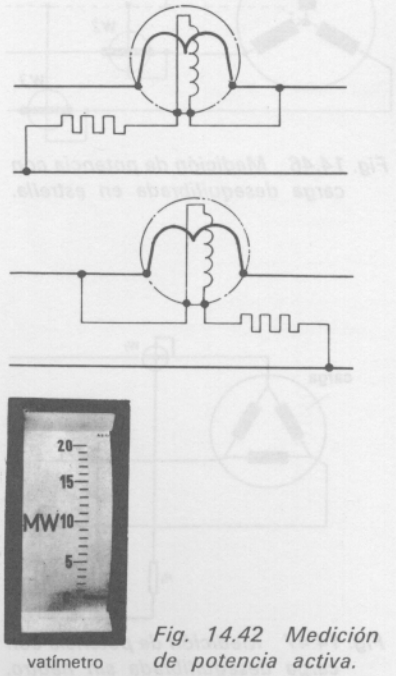
$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

14.6.2.2 *Medición de la potencia reactiva en circuitos monofásicos*

La potencia reactiva se mide utilizando un *vármetro,* formado por una bobina amperimétrica y un circuito voltimétrico.

En el circuito voltimétrico debe procurarse un desfase de 90° entre tensión y corriente voltimétrica, a diferencia del vatímetro, donde estaban en fase.

El desfase se consigue disponiendo de bobinas, resistencias o condensadores en serie o paralelo con la bobina voltimétrica (fig. 14.43).



vatímetro

Fig. 14.42 Medición de potencia activa.

14.6.3 *Medida de potencia activa en corriente alterna trifásica*

Se pueden presentar los casos siguientes:

a) Carga equilibrada con neutro.
b) Carga equilibrada sin neutro.
c) Carga desequilibrada.
d) Método Aron para cargas trifásicas sin neutro.

14.6.3.1 *Carga equilibrada con neutro*

En este caso, la potencia activa por fase puede medirse con un solo vatímetro, conectado entre fase y neutro (fig. 14.44).

La potencia activa total será la suma de las 3 potencias activas de cada fase:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 3 \cdot W$$

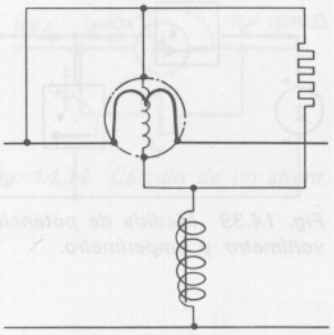


Fig. 14.43 Medición de potencia reactiva.

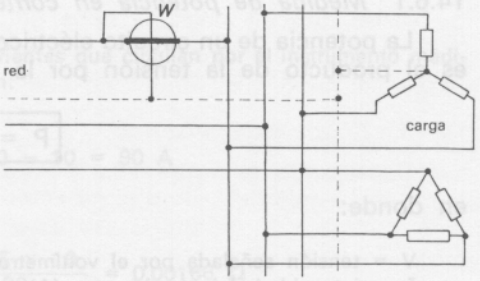


Fig. 14.44 Medición de potencia activa en carga equilibrada con neutro.

en donde:

W = potencia indicada por el vatímetro.

Teniendo en cuenta que en un sistema equilibrado en estrella se cumple que:

$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad ; \quad I_f = I_L$$

al sustituirlos en la potencia indicada por el vatímetro, quedará:

$$P_1 = V_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \cdot I_L \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

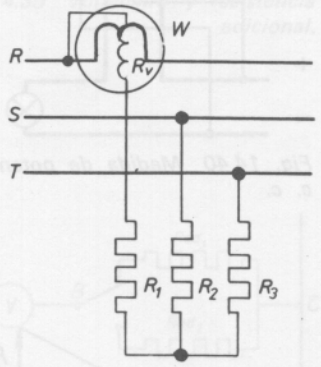


Fig. 14.45 Medición de potencia activa con carga equilibrada y neutro artificial.

Resumen

La potencia activa se calcula intercalando un vatímetro monofásico en una fase cualquiera y multiplicando por 3 el resultado obtenido.

14.6.3.2 *Carga equilibrada sin neutro*

En este caso, se debe conseguir un neutro artificial mediante tres resistencias en estrella, con la condición de que sean las tres iguales y teniendo en cuenta la resistencia de la bobina voltimétrica R_v; así, pues (fig. 14.45):

$$R_v + R_1 = R_2 = R_3$$

El cálculo de la potencia activa total es similar al caso anterior, por lo que será suficiente colocar un solo vatímetro y multiplicar por 3 su medición.

$$P = 3 \cdot W$$

en donde:

W = potencia indicada por el vatímetro.

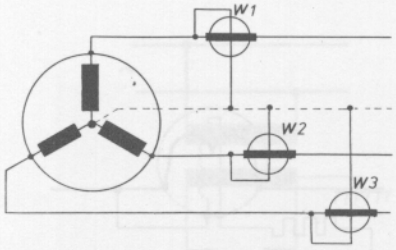


Fig. 14.46 Medición de potencia con carga desequilibrada en estrella.

14.6.3.3 *Carga desequilibrada*

En los sistemas desequilibrados, bien sea en estrella o en triángulo, la potencia activa total se puede obtener con tres vatímetros monofásicos sumando los resultados, o bien directamente con un vatímetro trifásico:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = W_1 + W_2 + W_3$$

en donde:

W_1 = potencia indicada por el 1.er vatímetro;
W_2 = potencia indicada por el 2.º vatímetro;
W_3 = potencia indicada por el 3.er vatímetro.

Si el sistema es en estrella, se conectarán a ella los extremos de las bobinas voltimétricas (fig. 14.46). Si el sistema no dispone de neutro, o es inaccesible, se obtendrá un neutro artificial, para unir las bobinas voltimétricas (figura 14.47).

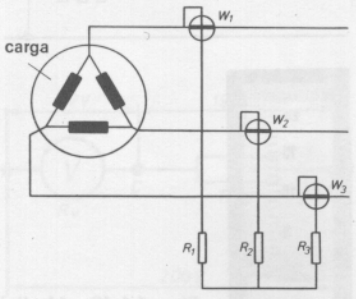


Fig. 14.47 Medición de potencia con carga desequilibrada sin neutro.

14.6.3.4 *Método Aron para cargas trifásicas sin neutro*

En un sistema trifásico, sin neutro (fig. 14.48), la suma algebraica de corrientes es nula:

$$\vec{I}_R + \vec{I}_S + \vec{I}_T = 0$$

Eligiendo un conductor cualquiera (T_T) como conductor de retorno, circulará por él una intensidad:

$$\vec{I}_T = -\vec{I}_R - \vec{I}_S$$

La potencia instantánea trifásica total es:

$$p = e_R \cdot i_R + e_S \cdot i_S + e_T \cdot i_T = e_R \cdot i_R + e_S \cdot i_S + e_T \cdot (-i_R - i_S)$$

$$= e_R \cdot i_R + e_S \cdot i_S - e_T \cdot i_R - e_T \cdot i_S = i_R (e_R - e_T) + i_S (e_S - e_T)$$

$$= i_R \cdot e_{RT} + i_S \cdot e_{ST}$$

$$\boxed{p = i_R \cdot e_{RT} + i_S \cdot e_{ST}}$$

en donde:

e_R, e_S, e_T = tensiones de fase.

Así se obtiene que la potencia total puede expresarse en función de dos potencias parciales.

Si se disponen dos vatímetros con sus bobinas amperimétricas en dos fases cualesquiera y sus bobinas voltimétricas entre las dos fases anteriores y la tercera, la suma de las lecturas corresponderá a la potencia activa total (figura 14.48).

En el circuito señalado en la figura 14.48, la potencia activa total será:

$$\boxed{P = W_1 + W_2 = i_R \cdot e_{RT} \cdot \cos \varphi_{RT} + i_S \cdot e_{ST} \cdot \cos \varphi_{ST}}$$

en donde:

φ_{RT} = desfase entre i_R y e_{RT};
φ_{ST} = desfase entre i_S y e_{ST}.

Según sea el factor de potencia de la carga, así será el signo de las potencias, pudiendo indicar en algún caso valores negativos, por lo que habrían de invertirse las conexiones.

El estudio completo sobre las indicaciones de los aparatos de medida según el tipo de carga, debe hacerse en algún texto referido a Medidas Eléctricas.

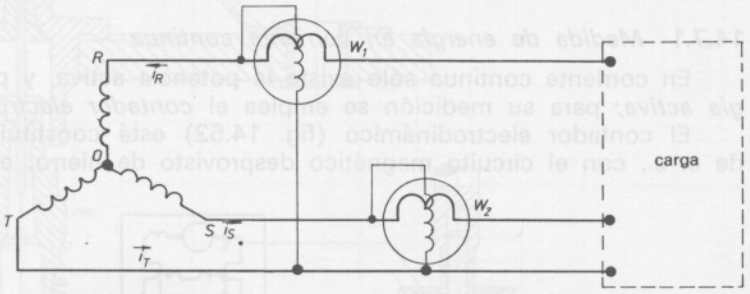


Fig. 14.48 Medida de potencia según conexión Aron.

14.6.4 *Medida de potencia reactiva en corriente alterna trifásica*

El valor de la potencia reactiva total de un sistema trifásico viene dado por la expresión:

$$\boxed{P_r = V_1 \cdot I_1 \cdot \text{sen } \varphi_1 + V_2 \cdot I_2 \cdot \text{sen } \varphi_2 + V_3 \cdot I_3 \cdot \text{sen } \varphi_3}$$

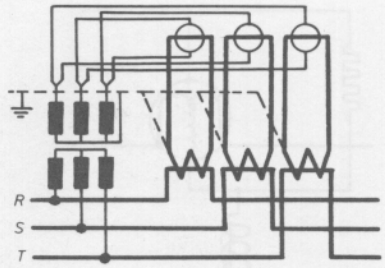


Fig. 14.49 Medida de potencia reactiva.

En la potencia reactiva, se debe distinguir entre potencia de carácter positivo o *inductiva,* y potencia de carácter negativo o *capacitiva;* ésta es la principal diferencia frente a la potencia activa, que presentaba siempre carácter positivo.

La medida de la potencia reactiva puede hacerse por medio de tres várametros, uno por fase. En la figura 14.49 se indica la medición de energía reactiva con transformadores de medida.

No obstante, dada la complejidad de la construcción del aparato, se recurre a otros métodos basados en las mediciones con vatímetros.

14.6.4.1 *Método Righi para circuitos desequilibrados*

Dispone de tres vatímetros, cuya conexión viene indicada en la figura 14.50. El cálculo de la potencia reactiva total se obtiene por la expresión:

$$P_r = \frac{W_1 - W_2 + 2\,W_3}{\sqrt{3}}$$

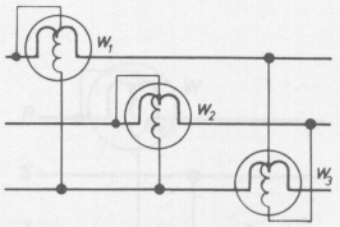


Fig. 14.50 Medida de potencia reactiva por el método de Righi.

14.6.4.2 *Método Aron para sistemas equilibrados*

También puede obtenerse la potencia reactiva con dos *vatímetros,* según la conexión Aron (fig. 14.48), aplicando la expresión:

$$P_r = \sqrt{3}\,(W_1 - W_2)$$

siendo $W_1 > W_2$ en cargas inductivas; y $W_1 < W_2$, en las cargas capacitivas.

14.7 Medida de energía. Contadores

La energía eléctrica la expresa el producto de la potencia que circula en un circuito por el tiempo que permanezca conectado dicho circuito:

$$W = P \cdot t = kW \cdot h$$

en donde:

W = energía eléctrica en kWh;
P = potencia del circuito en kW;
t = tiempo de conexión en horas.

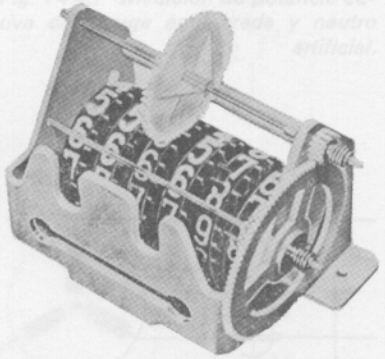


Fig. 14.51 Totalizador e integrador.

Básicamente, un contador constará de un vatímetro y un medidor de tiempo, relacionados entre sí de forma que en cada instante se indique su producto. La medida del tiempo se hace por medio de un totalizador o integrador (figura 14.51), formado por varios tambores en los que se graban las cifras del 0 al 9 y sobre los que actúan piñones de arrastre, proporcionando directamente la lectura de kilovatios-hora (kWh) consumidos.

14.7.1 *Medida de energía en corriente continua*

En corriente continua sólo existe la potencia activa, y por ello sólo *energía activa;* para su medición se emplea el *contador electrodinámico.*

El contador electrodinámico (fig. 14.52) está constituido por un motor de c. c., con el circuito magnético desprovisto de hierro; el circuito inductor

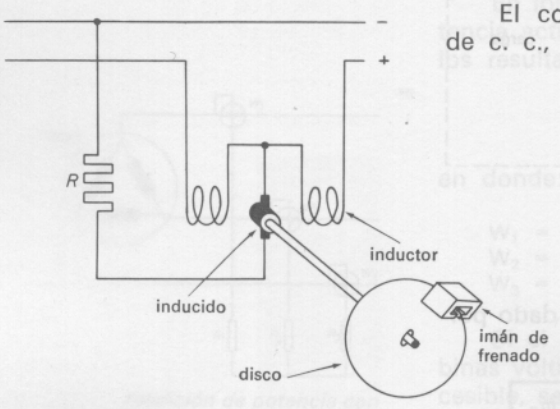


Fig. 14.52 Contador electrodinámico para c. c.

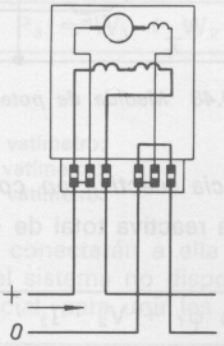


Fig. 14.53 Esquema interior de un contador de c. c.

(fijo) lo forman varias espiras en serie con el circuito por medir, y el inducido (giratorio) va en serie con una resistencia (R).

En el eje del inducido se dispone un disco de material ligero (aluminio), que girará al conectar los receptores. Por acción de un imán de frenado, se evitará que el disco alcance velocidades muy elevadas.

En un extremo del eje se dispone un piñón helicoidal, que transmite el movimiento al totalizador, el cual indicará directamente la energía consumida por el receptor, visible a través de la mirilla practicada en la tapa.

El esquema de conexiones de un contador de c. c. viene indicado en la figura 14.53. Cabe añadir la escasa importancia del contador de c. c., porque ahora la distribución de energía, prácticamente en su totalidad, es en forma de c. a.

14.7.2 *Medida de energía en corriente alterna monofásica*

En c. a. la energía se mide por medio de los *contadores de inducción,* similares a los vatímetros de inducción (párrafo 14.3.5), si bien difieren de ellos en el sistema de giro, ya que en los contadores no hay muelle antagonista con el fin de conseguir el libre movimiento del disco.

14.7.2.1 *Elementos constructivos de un contador monofásico* (fig. 14.54)

Los principales elementos que intervienen en un contador son:

Circuito magnético. Está formado por núcleos de chapa magnética (figura 14.55).

Bobina de intensidad. Formada por pocas espiras de pletina de cobre arrolladas sobre un carrete aislante (fig. 14.56).

Bobina de tensión. Formada por muchas espiras de hilo fino de cobre (fig. 14.56).

Sistema de impulsión. Conjunto de bobinas y núcleos. La fijación se efectúa por tornillos para facilitar el recambio de las bobinas. El entrehierro entre las bobinas de tensión e intensidad ha de ser uniforme para conseguir un funcionamiento normal (fig. 14.56).

Elemento móvil. Constituido por un disco de aluminio, sujeto fijamente a un eje de acero inoxidable. En el extremo superior del eje dispone de una cápsula guía, un tornillo sin fin que actúa sobre el totalizador y un ganchito que evita la marcha en vacío (fig. 14.57).

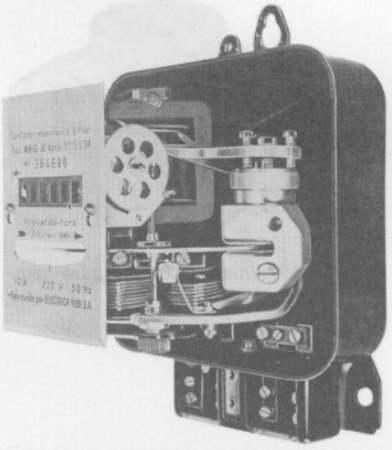


Fig. 14.54 Distribución de los elementos constructivos de un contador monofásico.

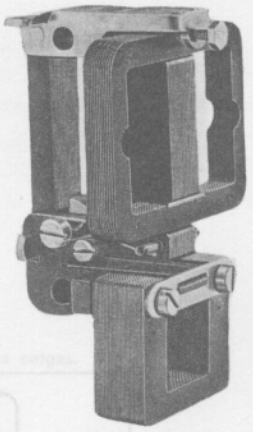


Fig. 14.55 Circuito magnético de un contador de inducción.

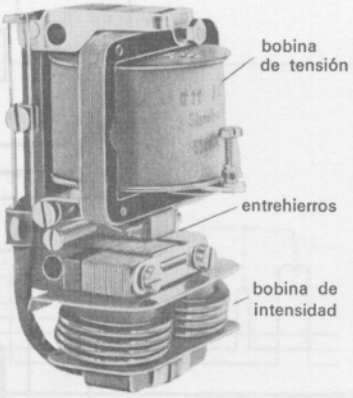


Fig. 14.56 Sistema de impulsión.

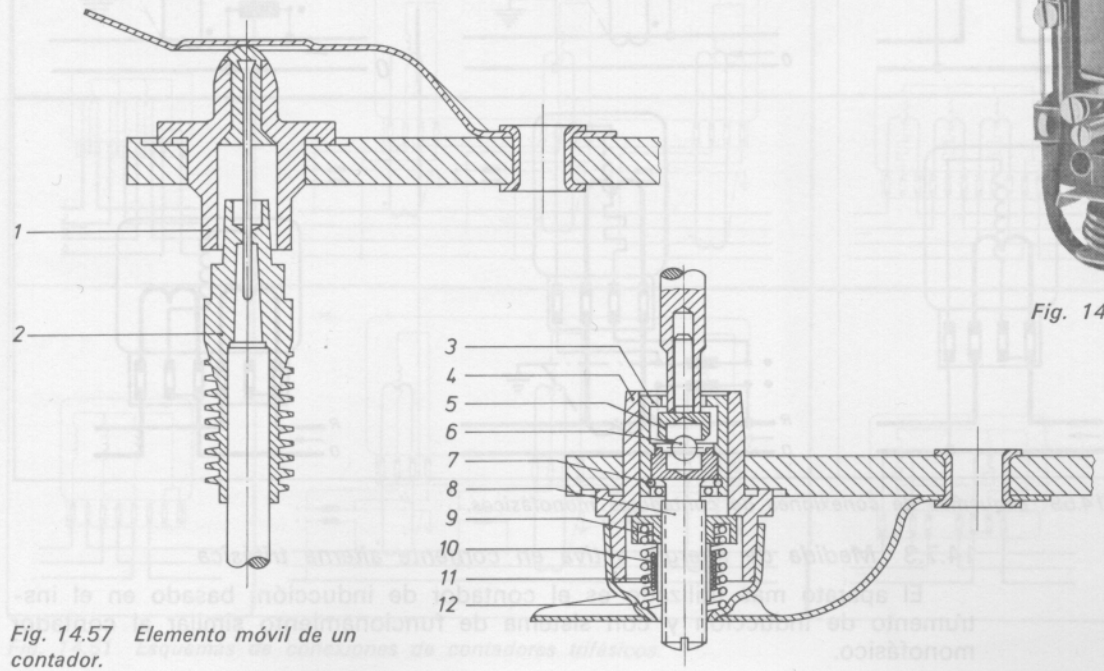


Fig. 14.57 Elemento móvil de un contador.

1. Cuerpo cojinete superior.
2. Cápsula-guía con visinfín.
3. Cámara cojinete inferior.
4. Cuerpo cojinete inferior.
5. Portazafiro superior.
6. Bolita acero diamante.
7. Muelle fijación.
8. Portazafiros inferior regulable.
9. Pieza tuerca.
10. Muelle presión.
11. Muelle compresión.
12. Caperuza.

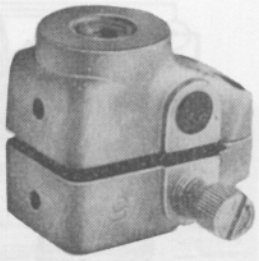


Fig. 15.48 Imán de freno para contador.

Cojinetes. El cojinete superior es una aguja de acero que entra en la cápsula guía del eje del disco (fig. 14.57).

El cojinete inferior (fijo-regulable) consta de un zafiro, sobre el que gira una bolita de acero-diamante.

Totalizador. Está constituido por 6 tambores y 5 piñones de arrastre y es similar al citado para el motor de c. c.

Imán de freno. Compuesto por una aleación (ALNICO), produce unas corrientes parásitas en el disco, motivando su frenado (fig. 14.58).

Organos de regulación. El ajuste del contador monofásico se consigue actuando sobre tornillos accesibles, que pueden modificar su marcha al actuar sobre el imán de freno, el ángulo que impide el giro en vacío, la corredera de ajuste de carga inductiva, etc.

En la figura 14.60 pueden apreciarse los órganos de regulación correspondientes a un contador trifásico, bastante similares a los del monofásico.

14.7.2.2 *Contadores monofásicos especiales*

Pueden destacarse el contador de energía reactiva y el de doble bobina amperimétrica.

El contador de *energía reactiva,* derivado del sistema de activa, se logra añadiendo una resistencia en el circuito de tensión y modificando algunos componentes del circuito magnético.

El contador de *doble bobina amperimétrica* se emplea para la medición de consumo entre dos fases activas de una red trifásica.

14.7.2.3 *Esquemas de conexiones de los contadores monofásicos*

A partir de un valor determinado de intensidad y tensión, en la conexión de los contadores, se emplean transformadores de tensión e intensidad.

En el cuadro de la figura 14.59, se indican los diferentes esquemas de conexiones correspondientes a contadores monofásicos.

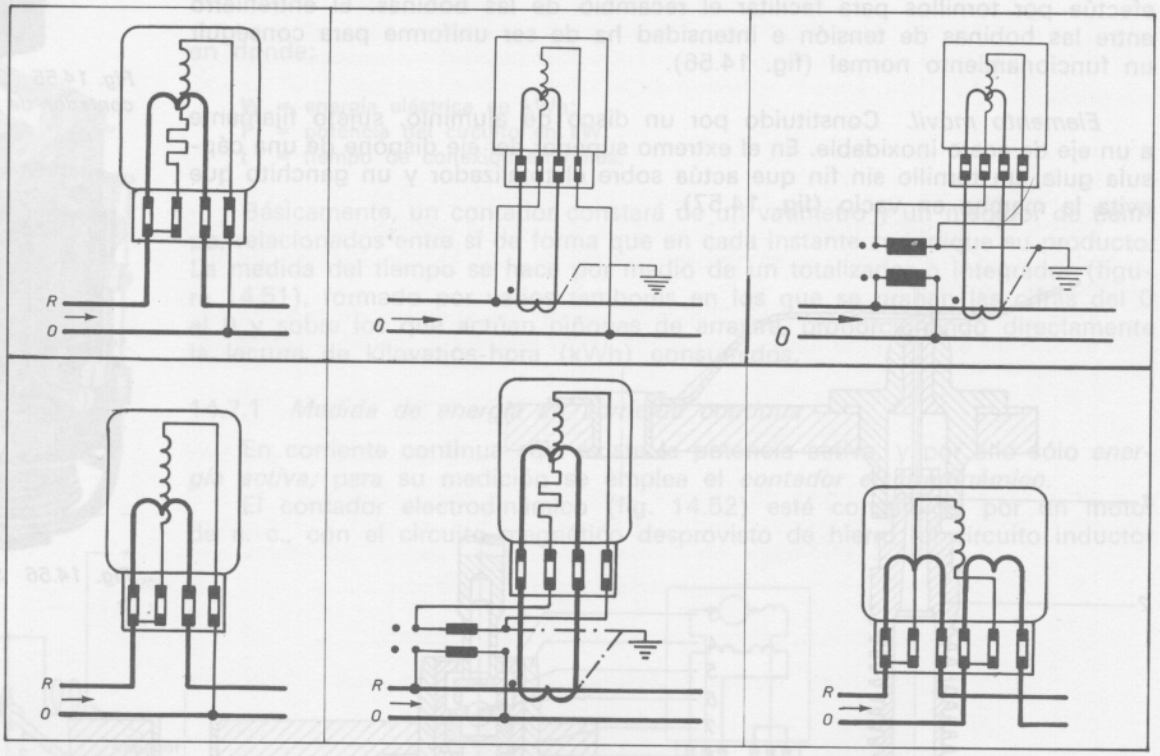


Fig. 14.59 Esquemas de conexiones de contadores monofásicos.

14.7.3 *Medida de energía activa en corriente alterna trifásica*

El aparato más utilizado es el contador de inducción, basado en el instrumento de inducción y con sistema de funcionamiento similar al contador monofásico.

14.7.3.1 *Funcionamiento*

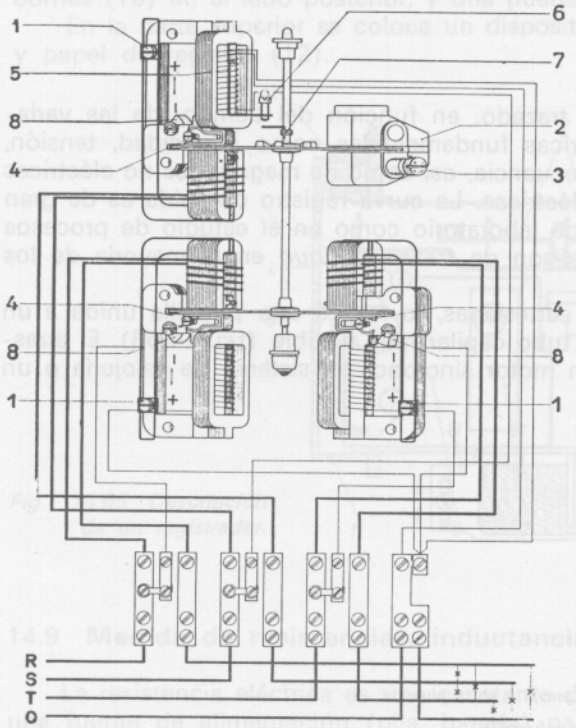
El contador trifásico está compuesto por tres sistemas impulsores y dos discos de aluminio (en algún caso, tres), solidarios a un eje de acero que, junto con los cojinetes, constituyen el elemento móvil.

Dos de los sistemas de impulsión, dispuestos diametralmente, actúan sobre el disco inferior; y el tercero, sobre el superior. El disco superior está sometido a la acción del imán de freno (fig. 14.60).

Los elementos constructivos son similares a los empleados en el contador monofásico, a excepción del elemento móvil que dispone de dos discos de aluminio solidarios al eje, y el cojinete inferior que se indica en la figura 14.57.

Los órganos de regulación se indican en la leyenda de la figura 14.60.

Los esquemas de conexiones se indican en el cuadro de la figura 14.61.



1. Resistencia y correderas regulación fase.
2. Imán de frenado.
3. Tornillo regulación micrométrica imán de freno.
4. Tornillo regulación impulso tensión y pequeñas cargas.
5. Angulo marcha en vacío.
6. Tornillo regulación marcha en vacío y arranque.
7. Ganchito freno marcha en vacío.
8. Aletas regulación cargas grandes.

Fig. 14.60 Contador trifásico a 4 hilos.

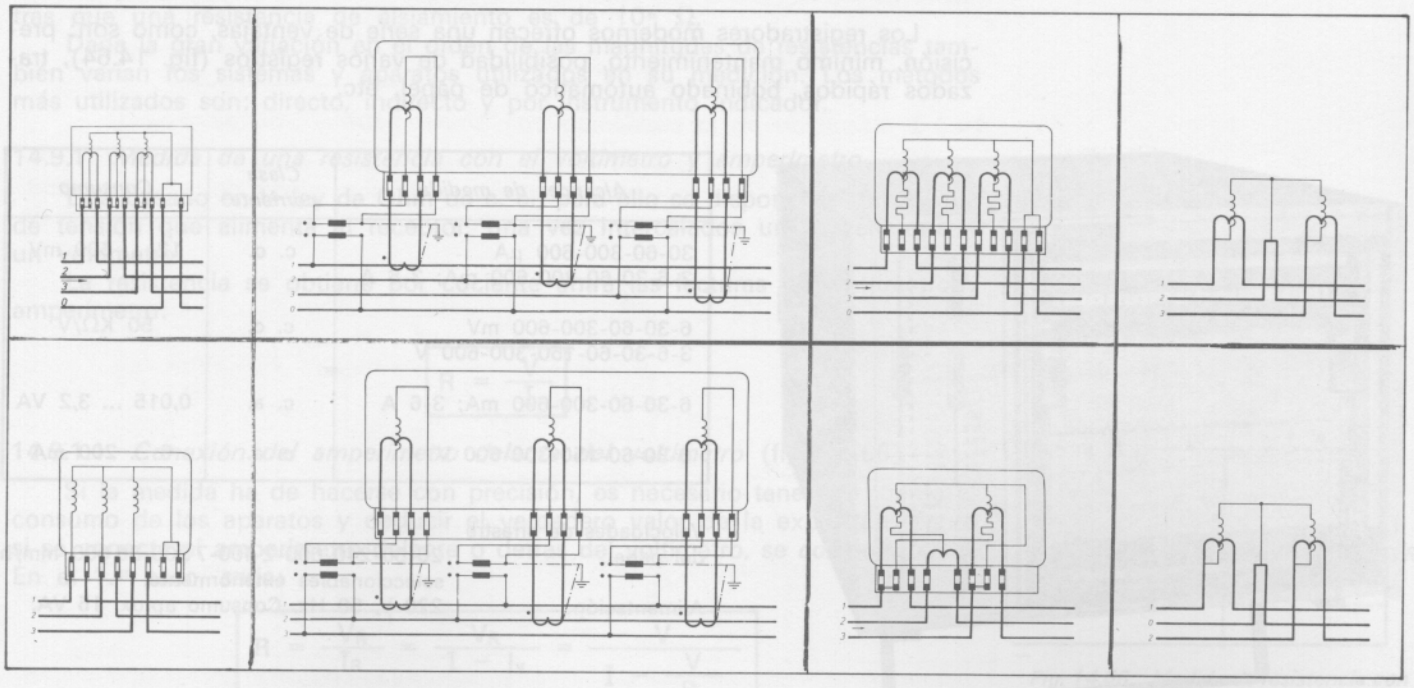


Fig. 14.61 Esquemas de conexiones de contadores trifásicos.

14.7.3.2 *Contadores trifásicos especiales*

Pertenecen a este grupo el contador de energía reactiva y el contador de conexión Aron.

En el contador de *energía reactiva,* el desfase de 90º se logra añadiendo resistencias en serie a las bobinas voltimétricas, o bien con una conexión artificiosa del interior que conserve el orden de sucesión de fases *R. S. T.* (fig. 14.61).

El contador *trifásico de conexión Aron* es similar al trifásico, con la diferencia que sobre los dos discos actúan sólo dos sistemas de medida en conexión Aron (fig. 14.61).

El contador *doble monofásico* es una variante del conexion Aron, para conectar entre dos fases activas y neutro, siendo análogo en su construcción y características (fig. 14.61).

14.8 Registradores

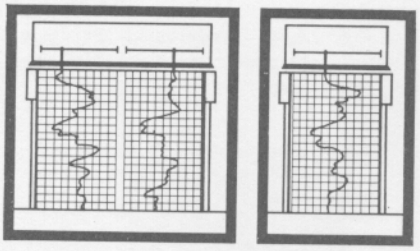
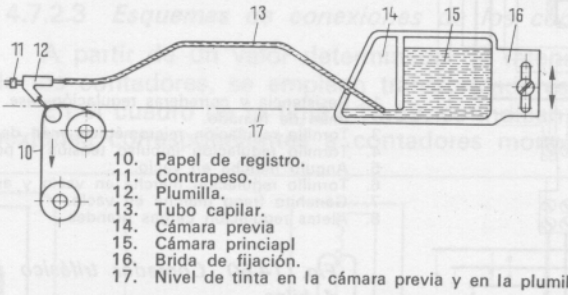


Fig. 14.62 Registradores de trazo continuo.

Son aparatos destinados al trazado, en función del tiempo, de las variaciones de las magnitudes eléctricas fundamentales como intensidad, tensión, potencia, factor de potencia y frecuencia, así como de magnitudes no eléctricas pero que sean convertibles en eléctricas. La curva-registro obtenida es de gran utilidad, tanto en experimentos de laboratorio como en el estudio de procesos de fabricación. Los registradores son de *trazo continuo* en la mayoría de los casos (fig. 14.62).

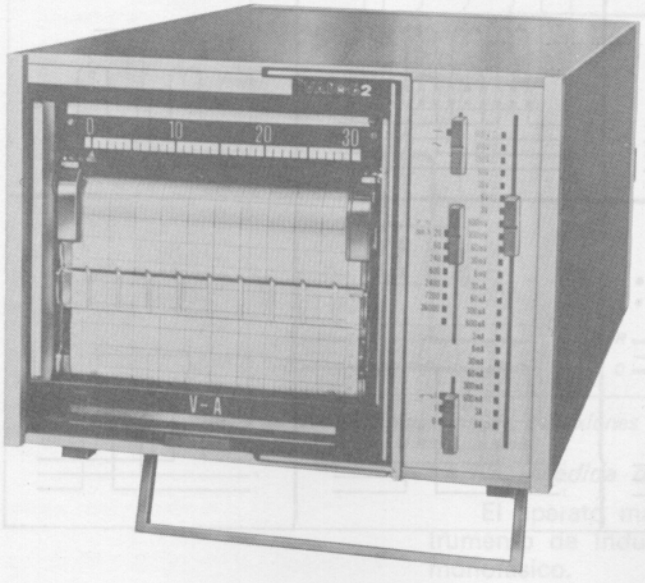
El trazado, en coordenadas cartesianas, lo realiza una plumilla unida a un depósito de tinta a través de un tubo capilar muy flexible (fig. 14.63). El arrastre del papel puede realizarlo un motor síncrono, un sistema de relojería o un motor paso a paso.



10. Papel de registro.
11. Contrapeso.
12. Plumilla.
13. Tubo capilar.
14. Cámara previa
15. Cámara princiapl
16. Brida de fijación.
17. Nivel de tinta en la cámara previa y en la plumilla.

Fig. 14.63 Dispositivo registrador de plumilla.

Los registradores modernos ofrecen una serie de ventajas, como son: precisión, mínimo mantenimiento, posibilidad de varios registros (fig. 14.64), trazados rápidos, bobinado automático de papel, etc.



Alcances de medida	*Clase corriente*	*Consumo*
30-60-300-600 μA 3-6-30-60-300-600 mA; 3-6 A	c. c.	12 ... 500 mV
6-30-60-300-600 mV 3-6-30-60-150-300-600 V	c. c.	50 KΩ/V
6-30-60-300-600 mA; 3-6 A	c. a.	0,015 ... 3,2 VA
6-30-60-150-300-600 V	c. a.	6 ... 200 mA

Velocidades de arrastre del papel: 20-60-240-600-2 400-7 200-36 000 mm/h seleccionables exteriormente.

Alimentación: 220 V, 50 Hz. Consumo aprox. 15 VA.

Fig. 14.64 Registrador múltiple voltamperimétrico.

14.8.1 *Descripción de un registrador de trazo continuo* (fig. 14.65)

El sistema de medida de los registradores es similar a los citados en aparatos de medida (de bobina móvil, electrodinámicos, etc.).

El movimiento circular del sistema (1) es transformado en rectilíneo por el dispositivo de guía (2), de modo que la aguja (3) se mueve en dirección perpendicular a la de arrastre del papel. La pluma (4), solidaria de la aguja, realiza así un registro, en coordenadas cartesianas, sobre el papel (5), que es impulsado por el mecanismo de arrastre (7).

Cuando la escala no es lineal, el registrador dispone de un impresor (8) asociado al dispositivo de bobinado, que imprime las coordenadas longitudinales correspondientes a las divisiones de la escala.

El aparato se aloja en el interior de una caja (9), y dispone de una caja de bornes (10) en el lado posterior, y una puerta abatible en el lado frontal (11).

En la parte superior se coloca un dispositivo para iluminación de la escala y papel de registro (12).

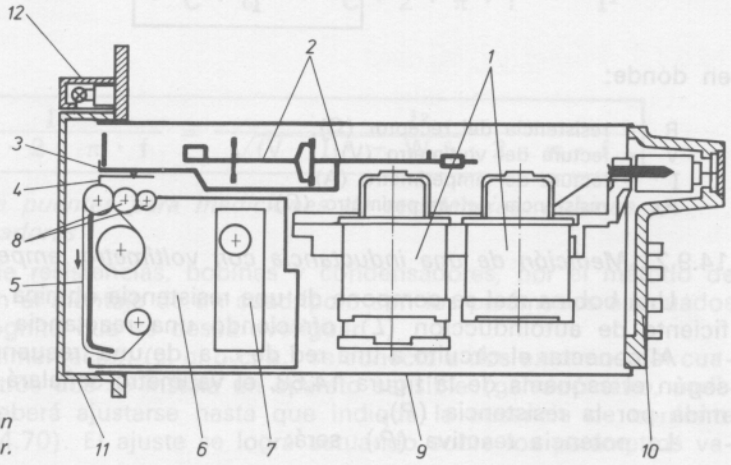


Fig. 14.65 Descripción de un registrador.

14.9 Medida de resistencias, inductancias y capacidades

La resistencia eléctrica es una constante de cada material, que necesita de una fuente de alimentación (pila, batería) para su medición. Las magnitudes de las resistencias empleadas en circuitos, máquinas o aparatos varía enormemente. Ejemplo: una resistencia interna de un amperímetro es de 0,001 Ω, mientras que una resistencia de aislamiento es de 10^6 Ω.

Dada la gran variación en el orden de las magnitudes de resistencias también varían los sistemas y aparatos utilizados en su medición. Los métodos más utilizados son: directo, indirecto y por instrumento indicador.

14.9.1 *Medida de una resistencia con el voltímetro y amperímetro*

Está basado en la ley de Ohm de c. c.; para ello se dispone de una fuente de tensión que alimenta al receptor, una vez intercalados un amperímetro y un voltímetro.

La resistencia se obtiene por cociente entre las lecturas del voltímetro y amperímetro:

$$R = \frac{V}{I}$$

14.9.1.1 *Conexión del amperímetro delante del voltímetro* (fig. 14.66)

Si la medida ha de hacerse con precisión, es necesario tener en cuenta el consumo de los aparatos y deducir el verdadero valor de la expresión. Tanto si se conecta el amperímetro delante o detrás del voltímetro, se *cometerá error.* En el 1.er caso, sería:

$$R = \frac{V_R}{I_R} = \frac{V_R}{I - I_v} = \frac{V}{I - \dfrac{V}{R_v}}$$

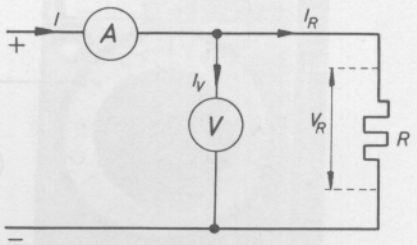


Fig. 14.66 Medida de resistencia con el voltímetro posterior al amperímetro.

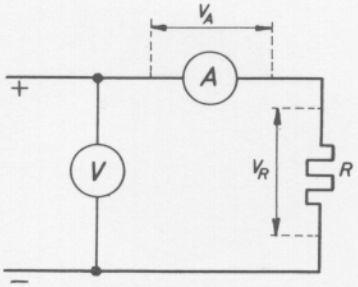


Fig. 14.67 Medida de resistencia con el voltímetro anterior al amperímetro.

en donde:

R = resistencia del receptor (Ω);
V = lectura del voltímetro (V);
I = lectura del amperímetro (A);
R_V = resistencia del voltímetro (Ω).

14.9.1.2 *Conexión del voltímetro delante del amperímetro* (fig. 14.67)

En el caso de situar el amperímetro próximo a la carga, el valor de la resistencia será:

$$R = \frac{V_R}{I_R} = \frac{V - V_A}{I} = \frac{V}{I} - \frac{V_A}{I} = \frac{V}{I} - \frac{R_A \cdot I}{I} = \frac{V}{I} - R_A$$

$$\boxed{R = \frac{V}{I} - R_A}$$

en donde:

R = resistencia del receptor (Ω);
V = lectura del voltímetro (V);
I = lectura del amperímetro (A);
R_A = resistencia del amperímetro (Ω).

14.9.2 *Medición de una inductancia con voltímetro, amperímetro y vatímetro*

Una bobina real se compone de una resistencia óhmica (R) y tiene un coeficiente de autoinducción (L), ofreciendo una reactancia inductiva (X_L).

Al conectar el circuito a una red de c. a. de una frecuencia determinada (f), según el esquema de la figura 14.68, el vatímetro señalará la potencia consumida por la resistencia (P).

La potencia reactiva (P_r), será:

$$P_r = \sqrt{P_a^2 - P^2} = \sqrt{(V \cdot I)^2 - W_1^2}$$

A su vez:

$$P_r = X_L \cdot I^2 \; ; \; X_L = L \cdot \omega = L \cdot 2\,\pi f = \frac{P_r}{I^2}$$

De donde:

$$\boxed{L = \frac{P_r}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I^2} = \frac{\sqrt{(V \cdot I)^2 - W_1^2}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I^2}}$$

14.9.3 *Medición de la capacidad con amperímetro y voltímetro*

Despreciando el efecto de la resistencia, en serie o paralelo con un condensador, su capacidad puede medirse siguiendo el esquema de la figura 14.69. Al suponer nula la resistencia, el vatímetro no marcará potencia, y el valor de la capacidad será:

$$Z = X_C = \frac{V}{I} = \frac{1}{C \cdot \omega} \; ; \; C = \frac{I}{V \cdot \omega} = \frac{I}{V \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$\boxed{C = \frac{I}{V \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}}$$

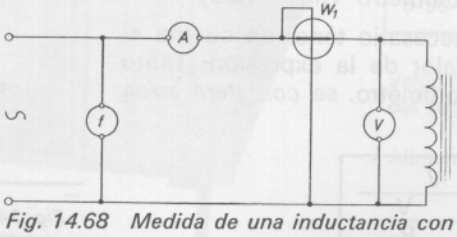


Fig. 14.68 Medida de una inductancia con voltímetro, amperímetro y vatímetro.

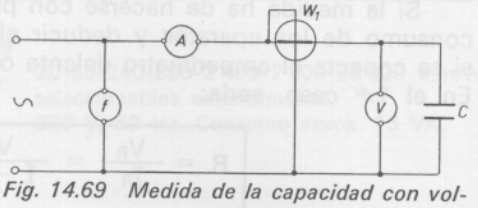


Fig. 14.69 Medida de la capacidad con voltímetro y amperímetro.

en donde:

C = capacidad del condensador (F);
V = lectura del voltímetro (V);
I = lectura del amperímetro (A);
f = frecuencia de la red (Hz).

Caso de no ser despreciable la resistencia del condensador, el vatímetro señalaría una potencia (W_1), y el cálculo de la capacidad sería ahora diferente:

$$P_r = \sqrt{P_a^2 - P^2} = \sqrt{(V \cdot I)^2 - W_1^2}$$

A su vez:

$$P_r = X_c \cdot I^2 \; ; \; X_c = \frac{1}{C \cdot \omega} = \frac{1}{C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{P_r}{I^2}$$

De donde:

$$C = \frac{I^2}{P_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{I^2}{\sqrt{(V \cdot I)^2 - W_1^2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}$$

14.9.4 *Método de puentes para mediciones de resistencias, bobinas y condensadores*

La medición de resistencias, bobinas y condensadores, por el método de puentes, se basa en el montaje de un cuadripolo con los parámetros adecuados y el elemento incógnita que se desea averiguar.

La fuente de alimentación (c. c. o c. a.) se conecta a dos extremos del cuadripolo, y en los otros dos se instala un aparato sensible (galvanómetro, audífono, etc.), que deberá ajustarse hasta que indique la ausencia de corriente en su rama (fig. 14.70). El ajuste se logra actuando sobre los parámetros variables.

El método de puentes es de los *más exactos,* por tratarse de un procedimiento de reducción a cero.

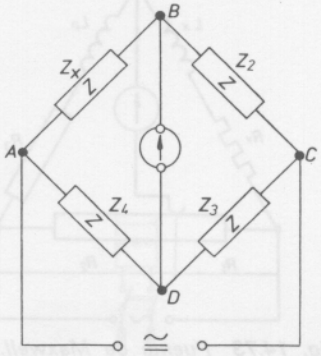


Fig. 14.70 Método general de mediciones con puentes.

14.9.4.1 *Puente de Wheatstone*

Consta de 4 resistencias que forman un cuadrilátero, una de ellas desconocida (R_x) y las otras conocidas (fig. 14.71).

El equilibrio del puente se conseguirá cuando los nudos *B* y *D* estén al mismo potencial y, por tanto, no circule corriente por el galvanómetro al pulsar *K*.

Aplicando las leyes de Kirchhoff, una vez en equilibrio, resultará:

$$I_2 = I_3 \; ; \; I_1 = I_x$$

$$R_1 \cdot I_1 = R_2 \cdot I_2 \; ; \; R_x \cdot I_x = R_3 \cdot I_3$$

Dividiendo las dos últimas expresiones:

$$\frac{R_1 \cdot I_1}{R_x \cdot I_x} = \frac{R_2 \cdot I_2}{R_3 \cdot I_3} \; ; \; \frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_3}$$

Y despejando la incógnita:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3$$

El cociente $\frac{R_1}{R_2}$ suele tomar un valor fijo (es el término *B* del aparato) y el ajustable es R_3 (término *A* del aparato). Así, en el aparato:

$$R_x = A \cdot B$$

El puente de Wheatstone es adecuado para la medición de resistencias que no sean excesivamente bajas o excesivamente altas.

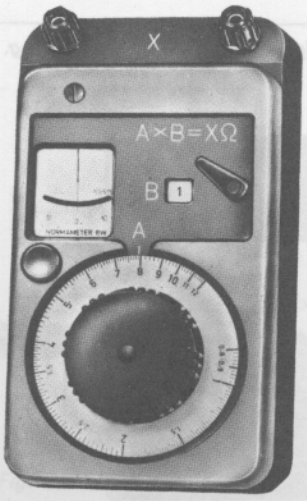


Fig. 14.71 Puente de Wheatstone.

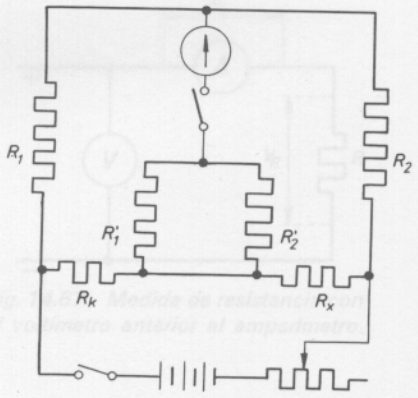


Fig. 14.72 Puente de Thomson.

14.9.4.2 *Puente de Thomson*

Consta de 4 resistencias patrón R_1, R_2, R'_1, R'_2, una resistencia calibrada R_x y un galvanómetro (fig. 14.72).

Se varían las resistencias hasta que el galvanómetro señale la ausencia de corriente, cumpliéndose entonces que:

$$R_x = R_k \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

El cociente $\frac{R_1}{R_2}$ suele tomar un valor fijo (en el aparato: 10, 1, 0,1, 0,01, 0,001), y el variable es R_k (en el aparato varía entre 0,1 y 2 Ω).

Es adecuado para medir resistencias muy bajas con gran precisión; ejemplo: arrollamientos de motores, transformadores, bobinas de circuitos amperimétricos, etc.

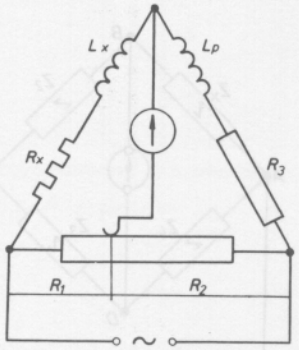


Fig. 14.73 Puente de Maxwell.

14.9.4.3 *Puente de Maxwell*

Es un instrumento muy útil para medir bobinas y está basado en la comparación entre una reactancia desconocida (X_L), de inductancia L_x y resistencia R_x, con una inductancia patrón (L_p) (fig. 14.73).

Al variar la resistencia potenciométrica $R_1 \cdot R_2$, se alcanza el equilibrio obteniéndose para la resistencia e inductancia desconocidas los valores:

$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad ; \quad L_x = L_p \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

14.9.4.4 *Puente de Shering*

Es utilizado para medición de la capacidad (C_x) de un condensador, con su resistencia en serie R_x (fig. 14.74).

El puente consta de un condensador patrón C_3, un condensador variable C_2 en paralelo con una resistencia variable R_2 y otra resistencia variable R_1.

Alcanzando el equilibrio, se cumple que:

$$C_x = C_3 \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad ; \quad R_x = R_1 \cdot \frac{C_2}{C_3}$$

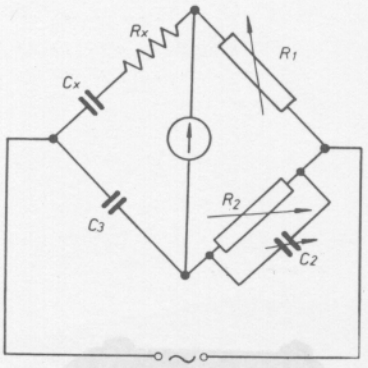


Fig. 14.74 Puente de Shering.

14.9.5 *Medición de resistencias de aislamiento. Ohmímetro*

Este tipo de resistencias tiene un valor muy elevado ya que el mínimo de una instalación con respecto a tierra ha de ser de 250 000 Ω; por ello, no pueden emplearse los métodos citados anteriormente y es necesario un tipo específico de aparato, llamado *ohmímetro* o *megger* (fig. 14.75).

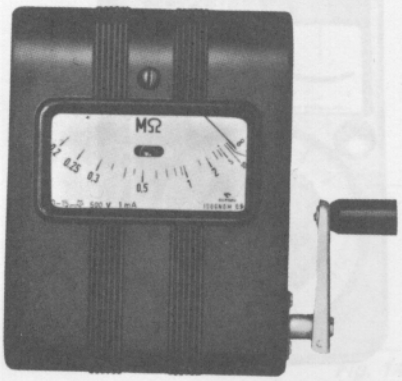


Fig. 14.75 Medida de aislamientos.

14.9.5.1 *Ohmímetro (megóhmetro)*

El ohmímetro está constituido por un imán permanente que produce un campo magnético, en cuyo interior puede girar dos bobinas unidas entre sí, formando un ángulo de 90° (fig. 14.76). Una de las dos bobinas está conectada en serie a una resistencia conocida (R) y la otra bobina está unida en serie a la resistencia desconocida (R_x).

La tensión (c. c.) la suministra un generador de manivela, aunque modernamente estos aparatos la consiguen directamente de la red, a través de rectificadores.

Recorridas por las corrientes, las bobinas se desplazarán buscando el flujo máximo, y el índice señalará directamente el valor de la resistencia desconocida sobre una escala graduada de 0 (derecha) a infinito (izquierda). Este aparato carece de muelle antagonista y por ello, en reposo, la aguja ocupará cualquier posición.

La resistencia R_x es independiente del valor que tome la tensión generada.

En la figura 14.77 se indica el esquema empleado en la medición de la resistencia de aislamiento de una línea bifilar con respecto a tierra.

14.9.6 *Medida de la resistencia de tierra*

La determinación de la resistencia del suelo y de las tomas de tierra tiene notable importancia en el campo de las instalaciones eléctricas, por motivos

de seguridad, según las vigentes normas del Reglamento Electrotécnico de B. T. del 20 de septiembre de 1973 y las Instrucciones Técnicas Complementarias del 31 de octubre de 1973.

En las redes de transporte y distribución de energía eléctrica, y en las protecciones contra descargas atmosféricas (fig. 14.78), interesa obtener el más bajo nivel posible de las resistencias de toma de tierra, permitiéndose como máximo 10 Ω.

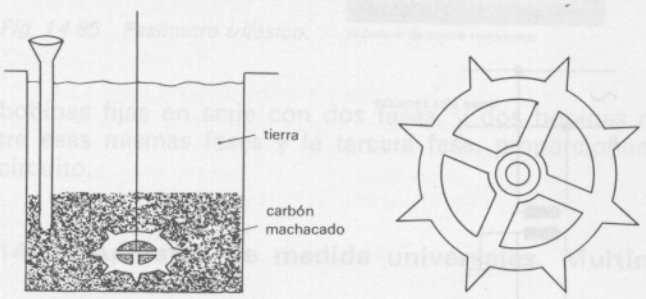


Fig. 14.78 Toma de tierra de pararrayos.

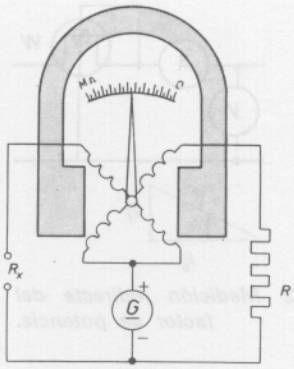


Fig. 14.76 Ohmímetro de bobinas cruzadas.

14.9.6.1 *Método para la determinación de la resistencia de tierra*

Las mediciones de resistencia de tierra han de hacerse con c. a. para evitar la polarización, y están basadas en el puente de Behrend, que permite la lectura directa.

Observando el esquema (fig. 14.79), la resistencia por medir es R_g; para ello se colocan una sonda (S) y una toma de tierra auxiliar (HE); un generador de c. a. (G) genera la tensión necesaria para hacer circular una corriente por el potenciómetro P y la toma E; el regreso al generador se hace por tierra a través de R_H.

La corriente origina en P una caída de tensión U_p, en el primario del transformador T_r (de relación de transformación igual a 1), invirtiendo la tensión en el secundario ($-U_p$).

El galvanómetro N indicará cero cuando se consiga que $U_E = U_p$, ya que entonces $R_E \cdot I = R_p \cdot I$ y, por tanto, $R_E = R_p$, que se medirá sobre el potenciómetro P.

En la figura 14.80 puede observarse un medidor de tierra y su modo de empleo.

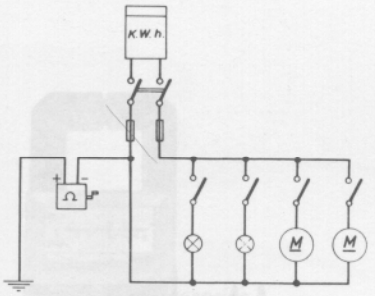
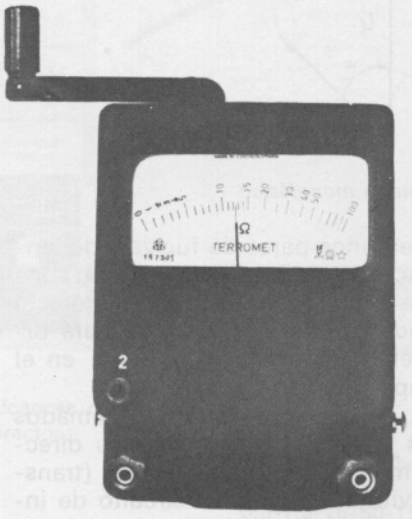


Fig. 14.77 Medida de aislamiento de una línea con respecto a tierra.



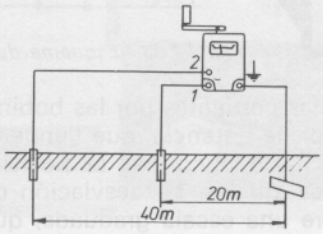


Fig. 14.80 Medidor de resistencia de tierra.

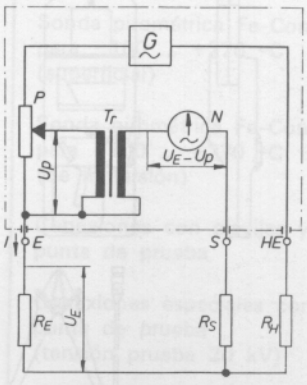


Fig. 14.79 Esquema de un medidor de tierras.

14.10 **Medida de frecuencias y factores de potencia**

Tanto la frecuencia como el factor de potencia son magnitudes eléctricas propias de la corriente alterna, que es necesario conocer.

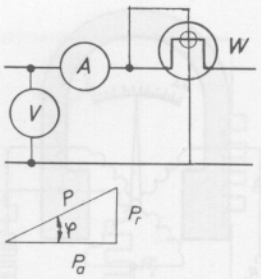


Fig. 14.82 Medición indirecta del factor de potencia.

14.10.1 *Medición de frecuencia*

El instrumento más usual para la medida de frecuencias es el *frecuencímetro de láminas,* descrito en el apartado 14.3.6, conectado en derivación a la red (fig. 14.81).

También se utiliza el *frecuencímetro de aguja,* constituido por una bobina fija y una bobina móvil con dos arrollamientos conectados en serie con un condensador y una inductancia respectivamente. Para la frecuencia de resonancia, circula una intensidad que desplaza a la aguja, señalando el valor de la medición sobre la escala.

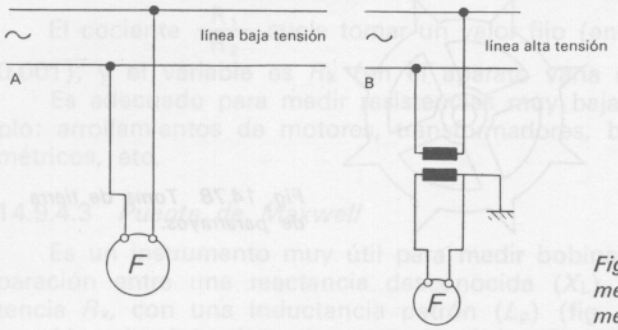


Fig. 14.81 Conexión de frecuencímetros: A, *a la línea;* B, *a la línea mediante transformador de tensión.*

14.10.2 *Medición del factor de potencia*

En circuitos monofásicos puede determinarse, indirectamente, a partir de las potencias activa y total (fig. 14.82), en donde el factor de potencia será:

$$\cos \varphi = \frac{P}{P_a} = \frac{W}{V \cdot A}$$

14.10.2.1 *Fasímetro monofásico*

También puede medirse directamente por medio del *fasímetro,* cuyo sistema de medida es el de bobinas cruzadas (fig. 14.83). La bobina fija se conecta en serie en el circuito y produce el campo magnético, mientras que la parte móvil la forman dos bobinas voltimétricas que pueden girar libremente en el campo magnético.

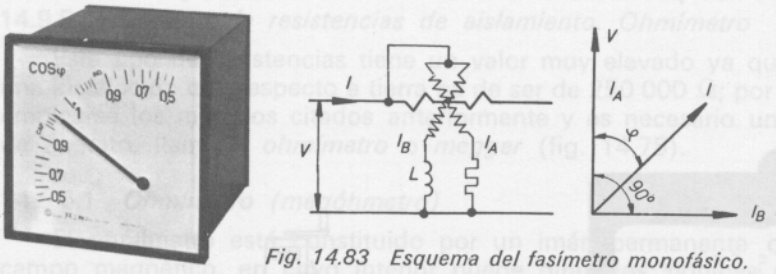
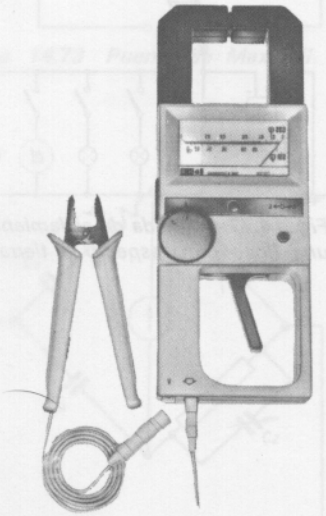


Fig. 14.83 Esquema del fasímetro monofásico.

El paso de las corrientes por las bobinas crea unos pares de fuerzas, dependientes del factor de potencia, que tienden a hacer girar el órgano móvil en sentidos opuestos hasta encontrar la posición de equilibrio, lo que sucederá al ser los dos pares iguales. La desviación depende del desfase y se señalará directamente sobre una escala graduada, que suele disponer de cos $\varphi = 1$ en el centro, y el factor de potencia inductivo o capacitivo en cada extremo.

Modernamente se dispone, en el mercado, de aparatos portátiles, llamados *tenazas fasimétricas,* que pueden medir el cos φ de redes monofásicas directamente (fig. 14.84). El aparato consta de un circuito amperimétrico (transformador de intensidad) del tipo tenaza, que evita interrumpir el circuito de intensidad, y de un circuito de tensión que se capta a través de dos conexiones enchufables por medio de pinzas.



tenazas fasimétricas, tipo PK — 230

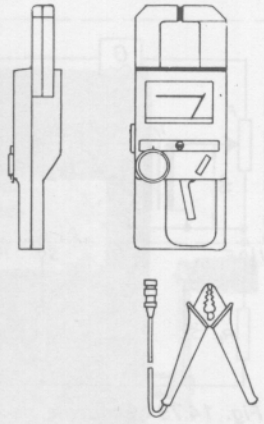


Fig. 14.84 Tenaza fasimétrica.

14.10.2.2 *Fasímetro trifásico*

Sustituye ventajosamente al empleo de tres fasímetros monofásicos, que proporcionarían los desfases φ_1, φ_2 y φ_3, entre tensión-intensidad por fase.

El fasímetro para sistemas desequilibrados (fig. 14.85) dispone de dos



fasímetro de cuatro cuadrantes

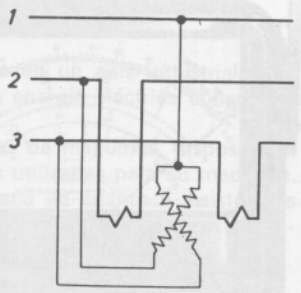


Fig. 14.85 Fasímetro trifásico.

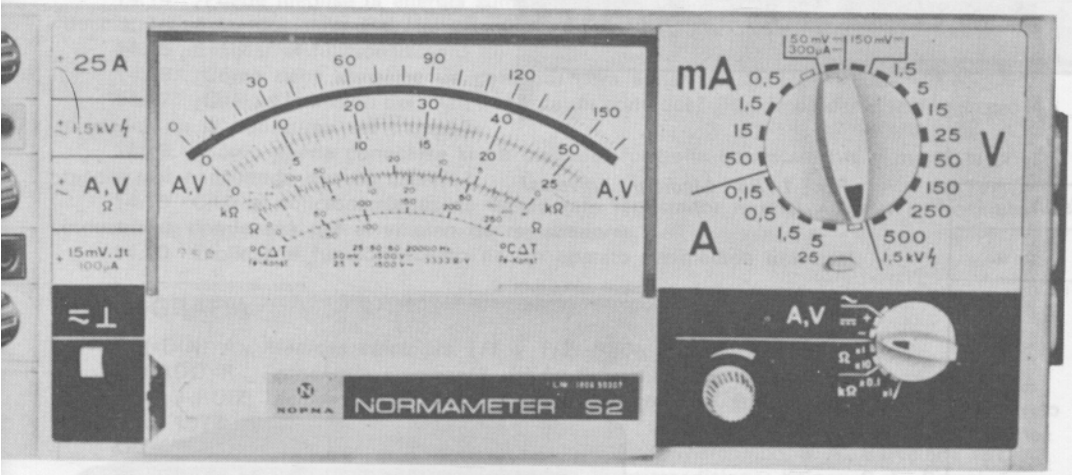
bobinas fijas en serie con dos fases, y dos bobinas móviles (voltimétricas) entre esas mismas fases y la tercera fase, proporcionando un cos φ único en el circuito.

14.11 Aparatos de medida universales. Multímetros

Los avances tecnológicos de los últimos tiempos también están presentes en el campo de los instrumentos de medida eléctrica; un ejemplo lo constituyen los aparatos de medida *universal,* que con un solo instrumento permiten las mediciones directas de las principales magnitudes eléctricas, como intensidad, tensión, resistencia, capacidad, etc.

En la figura 14.86, se presenta un medidor universal que permite realizar las lecturas en cualquier posición (horizontal o vertical) y dispone de escala de espejo, protección contra sobrecargas, etc. Este aparato es muy adecuado como instrumento de trabajo para mediciones de intensidad, tensión, temperatura, resistencia y capacidad en usos industriales como fábricas, montajes, servicio, máquinas, transformadores, calefactores, lámparas, etc. Además, dispone de una tabla de accesorios que lo convierten en un aparato muy completo.

En la figura 14.87 se puede observar un aparato universal portátil (polímetro), que permite realizar mediciones, tanto en c. c. como en c. a. de las principales magnitudes eléctricas.



Alcances de medida directos:
15-50-150 mV c. c.
1,5-5-15-25-50-150-250-500-1 500 V c. c. y c. a.
300 μA c. c.
0,5-1,5-15-50-150-500 mA c. c. y c. a.
1,5-5-25 A c. c. y c. a.
0,2 ... 200 Ω, 2 Ω ... 2 kΩ
100 Ω ... 200 kΩ, 1kΩ ... 2 MΩ
0 ... 270 °C, 0 ... −100 °C

Resistencia interna: 3,33 kΩ/V en c. c. y c. a.

Fig. 14.86 Medidor universal.

Accesorios

Shunt 100 mV para 100-50 A

Shunt 60 mV para 500-150 A

Tenaza 2 000:1 ($\varepsilon < 3$ %) para 300-100-30- A

Tenaza 10 000:1 ($\varepsilon < 1$ %) para 500-150-50 A

Resistencia voltimétrica para 5 kV c. c. y c. a. (16,66 MΩ)

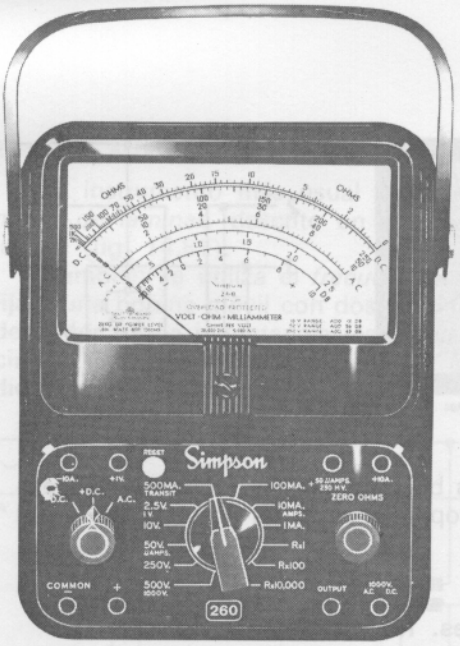
Sonda pirométrica Fe-Const. para −100 ... +270 °C (superficial)

Sonda pirométrica Fe-Const. para −100 ... +270 °C (de inmersión)

Conexiones con clavijas y punta de prueba

Conexiones especiales con punta de prueba (tensión prueba 20 kV)

Estuche de pronto uso



Escalas de medida

1. *Corriente continua:*
   a) Tensión: 250 mV/1/2,5/10/50/250/1 000 V.
   Precisión: ± 2 % del valor a fondo de escala.
   Sensibilidad: 20 000 Ohms/V.
   b) Intensidad: 50 µA/1/10/100/500 mA/10 A.

2. *Corriente alterna:*
   a) Tensión: 2,5/10/50/250/500/1 000 V.
   Precisión: ± 3 % del valor a fondo de escala.
   Sensibilidad: 5 000 Ohms/V.

3. *Resistencia:*
   R · 1. 0-2 000 Ω (12 Ω central).
   R · 100. 0-200 KΩ (1 200 Ω central).
   R · 10 K. 0-20 MΩ (120 KΩ central).

4. *Medidas de nivel:*
   −20 dB a +50 dB en cuatro escalas.

Fig. 14.87 Polímetro.

En la figura 14.88 se muestra un multímetro analógico-digital moderno, que permite la lectura directa por medio de unas cifras (dígitos) que aparecen en la pantalla. La construcción de estos aparatos pertenece al campo de la Electrónica. En la figura 14.89, se puede observar un frecuencímetro digital.

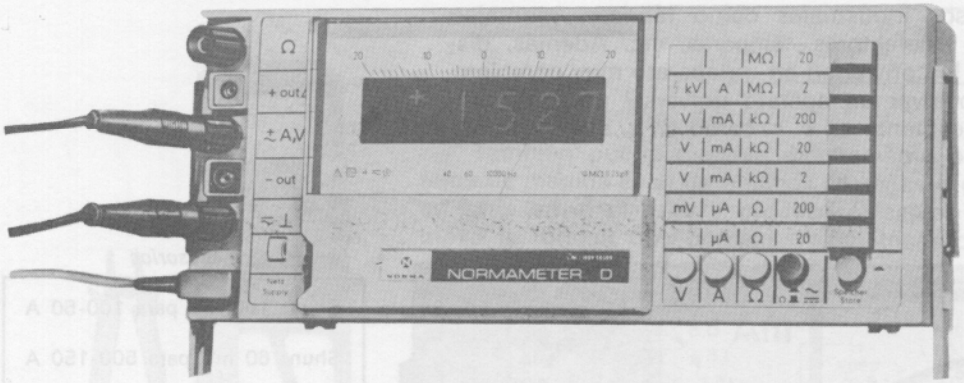


Fig. 14.88 Medidor universal digital.

Alcances	*Discriminación*	*Precisión*	
		c. c.	*c. a.*
200 mV	100 µV		
2 V	1 mV		
20 V	10 mV	±0,2 %	
200 V	100 mV		±1 % con onda senoidal
1 kV	1 V		
20 µV	10 µA	±0,3 %	
200 A	100 µA	±0,2 %	40 Hz ...
2 mA	1 µA	±0,2 %	... 10 kHz
20 mA	10 µA	±0,2 %	
200 mA	100 µA	±0,3 %	
2 A	1 mA	±0,5 %	
20 Ω	10 mΩ	±2 %	
200 Ω	100 mΩ	±1 %	
2 kΩ	1 Ω	±1 %	
20 kΩ	10 Ω	±1 %	
200 kΩ	100 Ω	±1 %	
2 MΩ	1 kΩ	±1 %	
20 MΩ	10 kΩ	±3 %	

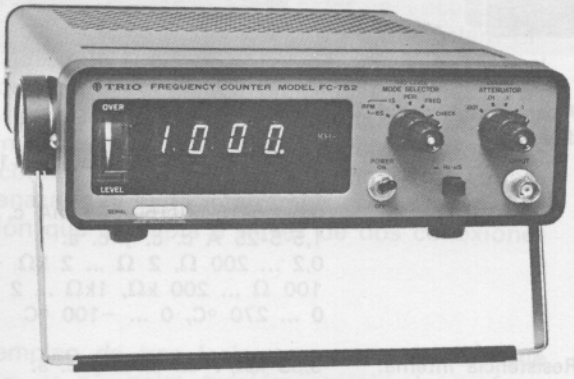


Fig. 14.89 Frecuencímetro digital.

TEMAS QUE DEBE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Hacer un estudio sobre el consumo de energía eléctrica en un país industrializado, en las distintas estaciones del año. Explicar la forma de medir la energía eléctrica consumida por una fábrica moderna.

— Construir una tabla en la que se indiquen las resistencias de máquinas, dispositivos, aparatos, líneas, etc., relacionados con electricidad; y las técnicas utilizadas para su medición.

— Recopilar información sobre las normas vigentes en España en cuanto a resistencias de aislamiento de las instalaciones eléctricas. Dibujar los esquemas correspondientes a mediciones de aislamiento en instalaciones de interiores y en motores eléctricos.

CUESTIONARIO

14.1 ¿Qué técnicas de medida y aparatos han de emplearse para localizar defectos en os cables? ¿Y en la localización de defectos en líneas aéreas de alta tensión (A. T.)?

14.2 Diferenciar las mediciones eléctricas industriales de las de gran precisión, indicando los aparatos necesarios para cada caso.

14.3 ¿Qué inconvenientes presentará un aparato con un dispositivo de amortiguamiento de gran fuerza de frenado?

14.4 Definir, según normas UNE, los siguientes conceptos: aparato de medida indicador, aparato registrador, aparato integrador, aparato electromagnético, aparato de pantalla electromagnética, vármetro, ohmímetro, fasímetro, escala y transformador de medida.

14.5 Diferenciar los instrumentos de medida, atendiendo a su principio de funcionamiento.

14.6 ¿Qué condiciones han de reunir los materiales empleados en la construcción de aparatos de medida?

14.7 Citar los aparatos de medida utilizados por un instalador-montador, indicando su principio de funcionamiento.

14.8 ¿Cómo se halla la constante de un aparato que dispone de varias escalas? Aplicación a un voltímetro con 100 divisiones y fondos de escala: 3, 30, 150, 300 V.

14.9 ¿En qué orden de magnitudes está comprendida la resistencia interna de un amperímetro? ¿Y la de un voltímetro? Razonar las respuestas.

14.10 ¿Por qué motivo el disco de un instrumento de inducción es de un material ligero? Si se trata de un contador, ¿es necesario el muelle antagonista?

14.11 ¿Qué aplicación tienen los instrumentos electrostáticos? ¿Es necesario tomar alguna medida especial de precaución al utilizarlos?

14.12 Citar, al menos, dos técnicas de medida de la intensidad absorbida por una lámpara incandescente.

14.13 ¿Es correcto decir que un voltímetro mide la intensidad entre los puntos donde se haya conectado? ¿Qué diferencia hay entre un voltímetro y un amperímetro, en cuanto a su funcionamiento y aspecto interior?

14.14 ¿Puede medirse la energía suministrada por una dinamo con un contador de inducción? Señalar dos métodos que permitan realizar la medición.

14.15 Explicar el funcionamiento de un contador de energía reactiva trifásica.

14.16 ¿Cómo debe ajustarse un contador para evitar que gire en vacio?

14.17 ¿Cuál es la misión del imán freno de un contador? ¿Puede perder el imán sus propiedades en el transcurso del tiempo?

14.18 ¿Cómo puede conocerse si un contador funciona correctamente y marca la potencia real consumida por un usuario?

14.19 Citar el funcionamiento de un aparato registrador normal. Señalar aplicaciones industriales donde sea útil el empleo de registradores.

14.20 Explicar el funcionamiento de un aparato de medida universal.

BIBLIOGRAFIA

BANDINI A., *Medidas eléctricas 1/1 y 1/2,* Rede, Barcelona 1967.

CASADO R., *Tecnología Eléctrica/2,* Bruño-Ediciones Don Bosco, Barcelona 1977.

RUBIO-RUIZ, *Técnicas de Expresión Gráfica/2. Electricidad,* Bruño-Ediciones Don Bosco, Barcelona 1977.

KARCZ A., *Fundamentos de Metrología Eléctrica. I y II,* Marcombo, S. A., Barcelona 1975.

Información Técnica sobre aparatos de medida, Electromediciones Kainos, S. A., Barcelona.

Información Técnica de Ataio Ingenieros, S. A., Madrid.

Catálogos de casas comerciales (Gossen, Norma, SACI, AEG, Condisa, Pirelli, Siemens, Mathias, Marchesi, etc.).

Tema 15. Instalaciones de baja tensión

OBJETIVOS

— *Conocer los diferentes grados de electrificación en viviendas.*
— *Diferenciar las distribuciones eléctricas de uso doméstico y de talleres.*
— *Familiarizarse con los diferentes elementos utilizados en estas instalaciones.*
— *Iniciación al cálculo de secciones y presupuestos de pequeñas instalaciones.*

GUION

— Instalaciones domésticas.
— Instalaciones de talleres.
— Distribución de las instalaciones domésticas.
— Distribución de las instalaciones en talleres.
— Conductores.
— Cálculo y presupuesto para instalaciones sencillas.
— Aparatos de registro y energía.

PUNTOS CLAVE

— Grados de electrificación en las instalaciones de viviendas.
— División de las instalaciones de talleres por potencia media específica por metro cuadrado.
— Distribución de las instalaciones de viviendas y talleres.
— Conductores utilizados.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Simbología normalizada para instalaciones domésticas.

EXPOSICION DEL TEMA

15.1 Instalaciones domésticas

Independientemente de la capacidad de acometidas y líneas repartidoras, para las instalaciones de enlace con las redes de distribución, las viviendas únicamente podrán clasificarse como pertenecientes a uno de los grados de electrificación señalados a continuación.

15.1.1 *Electrificación mínima*

La instalación de las viviendas deberá comprender, como mínimo, los siguientes circuitos:

— Un circuito destinado a puntos fijos de luz y a las tomas de corriente para alumbrado.
— Un circuito para las tomas de corriente destinadas a otras aplicaciones.

Se deberán establecer, como mínimo, los siguientes puntos de utilización:

Cuarto de estar. Un punto de luz y una toma de corriente de 6 A por cada 6 m^2.

Dormitorio. Un punto de luz y dos tomas de corriente de 6 A.

Cocina. Un punto de luz, toma de corriente de 10 A, con contacto de puesta a tierra.

Vestíbulo. Un punto de luz y una toma de corriente de 6 A.

Pasillos. Un punto de luz.

Potencia que se debe instalar: 3 000 W.

15.1.2 *Electrificación media*

La instalación interior de la vivienda deberá comprender, como mínimo, los siguientes circuitos:

— Un circuito destinado a puntos fijos de luz y a tomas de corriente para alumbrado.

— Un circuito para las tomas de corriente destinadas a otras aplicaciones.

Se deberán establecer, como mínimo, los siguientes puntos de utilización:

Cuarto de estar. Un punto de luz, una toma de corriente por cada 6 m² de superficie; de ellas, una como mínimo será de 10 A.

Dormitorio. Un punto de luz, una o dos tomas de corriente de 6 A y otra de 10 A.

Cocina. Uno o dos puntos fijos de luz, según la capacidad y disposición de la cocina. Dos tomas de corriente de 6 A, provistas de contacto de puesta a tierra, destinadas a frigoríficos y pequeños aparatos. Si está prevista en la cocina la instalación de máquina de lavar o secadora, se establecerán sendas tomas de corriente de 16 A, provistas de contacto de puesta a tierra. Para la alimentación del calentador de agua, cuando su instalación está prevista en la cocina, se instalará un interruptor de corte bipolar de 10 A. Una toma de corriente tripolar de 32 A con contacto de tierra para cocina eléctrica.

Baños y aseos. Un punto de luz. Una toma de corriente de 6 A con contacto de puesta a tierra. En caso de estar prevista la instalación de máquinas de lavar en alguno de estos cuartos, se instalará una toma de corriente de 16 A con contacto de puesta a tierra.

Vestíbulo. Un punto de luz y una toma de corriente de 6 A por cada 12 m² de superficie.

Pasillos. Un punto de luz por cada 5 m de longitud.

La potencia que hay que instalar es de 5 000 W.

15.1.3 *Electrificación elevada*

La instalación interior de las viviendas deberá comprender, como mínimo, los siguientes circuitos;

— Dos circuitos destinados a puntos fijos de luz y a las tomas de corriente para alumbrado. Un circuito destinado a máquina de lavar, calentador de agua y secadora.

— Un circuito destinado a cocina.

— Dos circuitos para tomas de corriente destinados a otras aplicaciones.

Estos circuitos, cualquiera que sea el grado de electrificación, tendrán su origen en el cuadro general de distribución del cliente, donde se instalarán los dispositivos de protección de cada uno de ellos. La potencia que se debe instalar será de 8 000 W.

15.1.4 *Electrificación especial*

Corresponde a las viviendas dotadas de gran número de aparatos electrodomésticos, o de potencias unitarias elevadas o de un sistema de calefacción eléctrica y de acondicionamiento de aire de gran consumo.

15.1.5 *Cálculo de cada circuito*

El cálculo de cada circuito se realizará tomando como base los valores de la tabla 15.1 (Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, MI BT 022):

Tabla 15.1 Potencia de los circuitos según el grado de electrificación de la vivienda

Circuito	*Potencia*	*Grado de electrificación de la vivienda*
Alumbrado	66 % de la que resulte al considerar todos los puntos de utilización previstos a razón de 60 W cada uno	Mínima Media Elevada
	2 200 W en una de las tomas	Mínima
Tomas de corriente	2 200 W en dos de las tomas	Media
	2 200 W en dos de las tomas de cada circuito	Elevada
Cocina	4 400 W en la toma para la cocina	Media Elevada
Máquina de lavar, calentador de agua y secador	3 500 W en la toma de la máquina de lavar y de la secadora y 2 200 W en la toma del calentador	Media Elevada

15.2 Instalaciones de talleres

La constitución de la red de abastecimiento de energía eléctrica y la elección de todo el equipo eléctrico dependerán del tipo de fabricación.

Las máquinas con cargas elevadas intermitentes producirán caídas de tensión en las líneas, con sus perjuicios correspondientes, por lo que habrá que tener muy en cuenta el tipo de equipo que gobierna dichas máquinas y la sección de las redes, a fin de no sobrepasar la caída de tensión máxima admitida para este tipo de instalaciones, que está fijada en un 3 % de la tensión nominal para alumbrado y del 5 % para los demás usos. Esta caída de tensión se calculará considerando alimentados todos los aparatos de utilización susceptibles de funcionar simultáneamente.

15.2.1 *Carga superficial específica media*

Según el consumo y tipo de los receptores industriales se pueden hacer tres grupos, resultando para cada uno de ellos una potencia específica media en vatios por metro cuadrado de superficie.

Grupo 1. Carga superficial específica media entre 50 y 100 W/m², para servicio de pequeños y grandes receptores uniformemente distribuidos con cargas constantes. Por ejemplo: talleres de reparaciones, tornos automáticos, hilanderías, etc.

Grupo 2. Carga superficial específica media entre 70 y 300 W/m², para servicio de receptores con grandes diferencias de potencia y crestas de carga variables. Por ejemplo: fabricación de herramientas, prensas, soldadura, etc., en orden creciente respectivamente.

Grupo 3. Carga superficial específica media entre 200 y 500 W/m², para servicio de receptores de gran potencia, como hornos o grandes máquinas, donde la potencia de los pequeños receptores es despreciable frente a la carga total. Por ejemplo: talleres de temple, siderúrgicas, de laminación, etc.

15.3 Distribución de las instalaciones domésticas

Lo más cerca posible del punto de entrada de cada derivación individual en el local o vivienda del abonado, se instalará un interruptor automático con accionamiento manual, que esté dotado de dispositivos de protección contra las sobrecargas y cortocircuitos.

Los interruptores diferenciales sirven también como dispositivos de mando y protección y son medida de seguridad contra los contactos indirectos cuando llevan incorporados dispositivos de protección contra sobrecargas y cortocircuitos. La utilización de este tipo de interruptores automáticos constituye la solución más recomendable porque con ellos se tiene accionamiento manual, protección contra cortocircuitos, contra sobrecargas y contra contactos indirectos.

Asimismo, se protegerán los distintos circuitos de la vivienda con pequeños interruptores automáticos o fusibles.

En la figura 15.2A y B se muestran circuitos de principio de instalación interior.

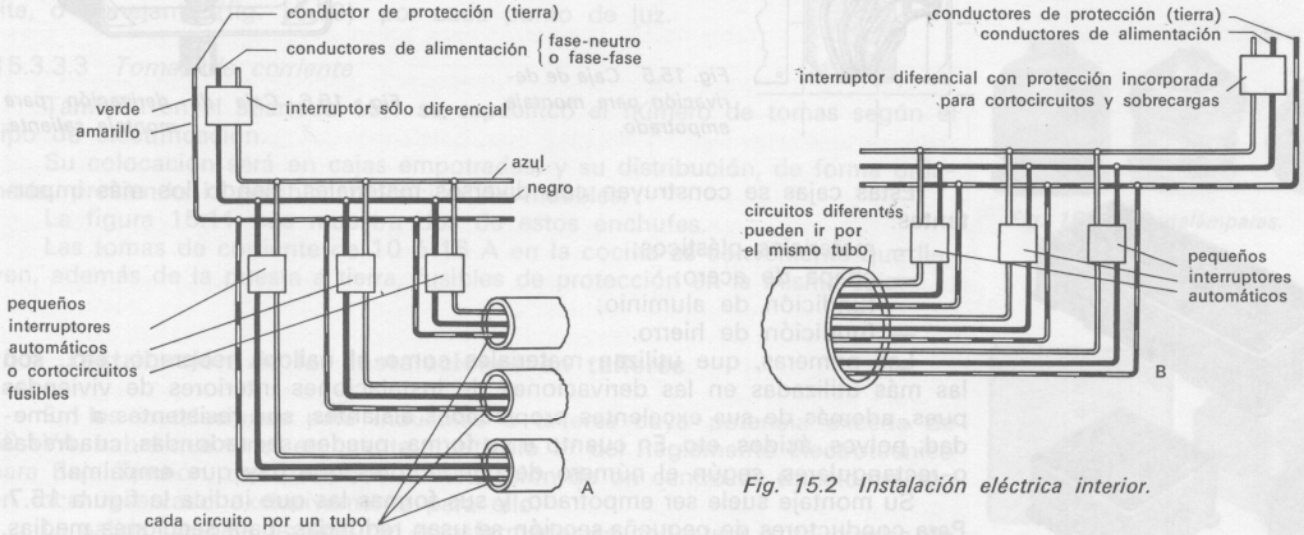


Fig. 15.2 Instalación eléctrica interior.

15.3.1 *Características principales del interruptor general*

Los interruptores automáticos serán de corte omnipolar, tendrán los polos protegidos que correspondan tanto al número de fases de la instalación como al conductor neutro cuando sea necesaria la protección de éste.

Si la intensidad de cortocircuito en un punto de la instalación fuese superior al poder de corte del interruptor automático, será preciso instalar un cortacircuito de acompañamiento, adecuado y debidamente combinado con el interruptor.

La tabla 15.3 da la intensidad del disyuntor, según la potencia que se ha dado contratar. La tarifa A 1 corresponde a potencias de hasta 1,5 kW y la A 2, a potencias mayores de 1,5 kW.

Hay que distinguir tres tipos de interruptores automáticos: *H*, para usos domésticos; *L*, para protección de líneas y *G*, para protecciones de aparatos. Sus principales ventajas son:

— Disponibilidad constante para el servicio sin cambios ni repuestos.
— Protección segura contra tensión de contacto demasiado alta.
— Dos órganos de desenganche distintos: uno bimetálico, que tiene una característica de desenganche diferida y que, en caso de una descarga en servicio, evita innecesarios disparos prematuros; otro, electromagnético, de desenganche rápido, que tiene por encima de sus límites de reacción unos tiempos de disparo muy cortos, de unos pocos milisegundos. De esta manera se consigue una desconexión extraordinariamente rápida del circuito averiado, no sólo en caso de cortocircuito, sino también de contacto a tierra.

Esto es válido principalmente para automáticos *H* con sus bajos límites magnéticos de reacción.

Tabla 15.3 Intensidad del disyuntor según la potencia que debe instalarse

Disyuntor Intensidad nominal en amperios	*Potencia que debe contratarse en kW*
	Tarifas A1 y A2
	220 V (II y I N)
3	0,6
5	1
7,5	1,5
10	2
15	3
20	4
25	5
30	6
40	7
45	8
50	9



Fig. 15.4 Interruptor diferencial.

En la figura 15.4 se puede observar uno de estos interruptores diferenciales.

La sensibilidad de los interruptores diferenciales depende del valor de la resistencia de la tierra de protección; sus valores normales son de 500, 300 y 30 miliamperios.

15.3.2 *Cajas de derivación*

Reglamentariamente está prohibido realizar empalmes y derivaciones en el interior de los tubos protectores para conductores eléctricos, por lo que son de uso imprescindible las cajas de derivación para dicho fin.

Tanto en montajes empotrados como en salientes deben usarse dichas cajas. Las figuras 15.5 y 15.6 nos muestran dos cajas de estos tipos.

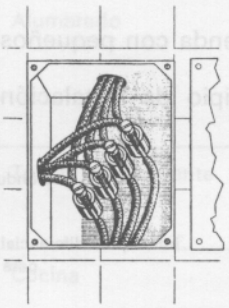


Fig. 15.5 Caja de derivación para montaje empotrado.

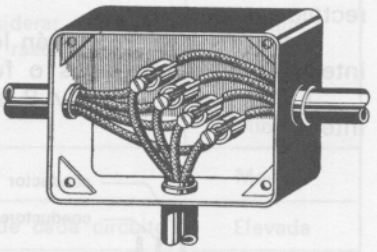


Fig. 15.6 Caja de derivación para montaje saliente.

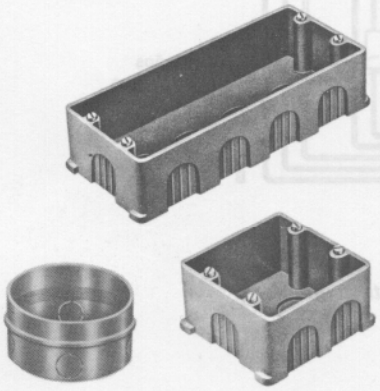


Fig. 15.7 Cajas de derivación para instalaciones generalmente de uso doméstico empotradas.

Estas cajas se construyen con diversos materiales, siendo los más importantes:

— materiales plásticos;
— chapa de acero;
— fundición de aluminio;
— fundición de hierro.

Las primeras, que utilizan materiales como el nailon, neopreno, etc., son las más utilizadas en las derivaciones de instalaciones interiores de viviendas pues, además de sus excelentes propiedades aislantes, son resistentes a humedad, polvos, ácidos, etc. En cuanto a su forma, pueden ser redondas, cuadradas o rectangulares, según el número de conductores que hay que empalmar.

Su montaje suele ser empotrado, y sus formas las que indica la figura 15.7. Para conductores de pequeña sección se usan redondas; para secciones medias, cuadradas; y para grandes secciones, rectangulares.

La ordenación de estas cajas en el interior de la vivienda se puede apreciar en la figura 15.8.

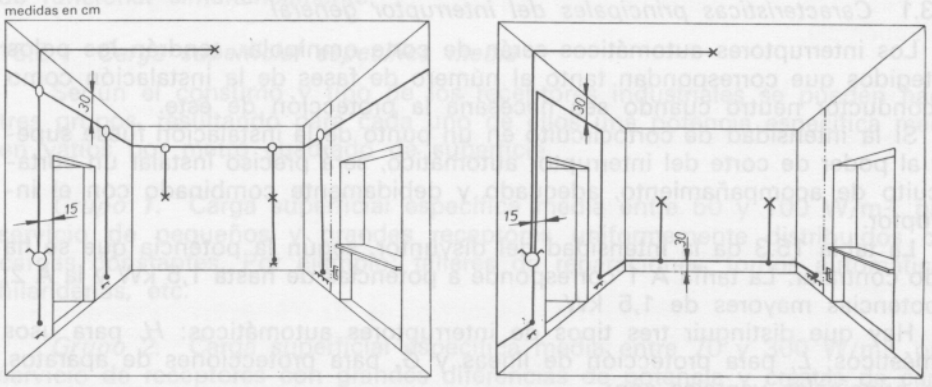


Fig. 15.8 Vista de un montaje eléctrico con cajas de derivación, enchufes, lámparas e interruptores.

15.3.3 *Otros componentes*

Los demás elementos que integran las instalaciones domésticas se pueden clasificar principalmente en:

a) interruptores;
b) puntos de luz;
c) tomas de corriente (enchufes).

Su constitución y características se exponen brevemente a continuación.

15.3.3.1 *Interruptores*

La distribución de estos elementos será lo más cercano a las puertas y en lugares de fácil localización.

El número dependerá de si la luz es conmutada o luz simple. En el primer caso, serán necesarios dos conmutadores por punto de luz; y en el segundo, un solo elemento que pueda gobernar uno o más puntos de luz en derivación.

Su colocación es generalmente en cajas empotradas, de características semejantes a las de derivación, aunque de formas diferentes, pudiendo colocarse uno o varios dispositivos en cada caja. La figura 15.9 muestra cada una de las partes de que consta este elemento.

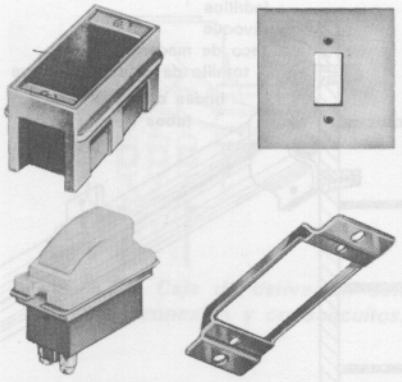


Fig. 15.9 Interruptor y accesorios.

15.3.3.2 *Puntos de luz*

Su número depende del grado de electrificación de la vivienda, como se detalló en el párrafo 15.1; ahora bien en favor de la estética de la vivienda se suelen disponer también enchufes gobernados por interruptores para posible colocación de aparatos de luz decorativos.

La instalación debe quedar terminada con un portalámparas, tipo baquelita, o semejante (fig. 15.10) por cada punto de luz.

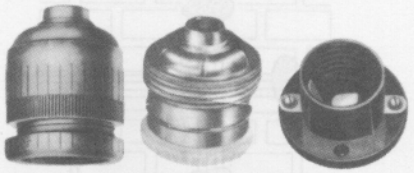


Fig. 15.10 Portalámparas.

15.3.3.3 *Tomas de corriente*

También en el apartado 15.1 se especificó el número de tomas según el tipo de electrificación.

Su colocación será en cajas empotradas, y su distribución, de forma ordenada, previendo la posible colocación de muebles.

La figura 15.11 nos muestra dos de estos enchufes.

Las tomas de corriente de 10 ó 16 A en la cocina es conveniente que lleven, además de la puesta a tierra, fusibles de protección en la misma caja.

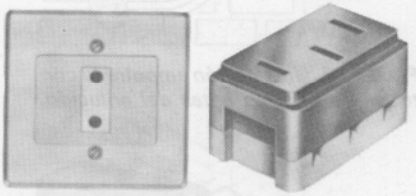


Fig. 15.11 Enchufes para toma de corriente.

15.4 **Distribución de las instalaciones en talleres**

En las instalaciones para industrias o talleres cuya potencia exceda de 50 kVA, habrá que tener en cuenta el artículo 17 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, que prescribe la instalación de un centro de transformación en local reservado exclusivamente para ello.

La salida de baja tensión del transformador se conectará a un cuadro de maniobras y distribución, en el que se instalarán todos los aparatos de medida y protección necesarios.

De este cuadro partirán todas las derivaciones necesarias para las redes de distribución. Es conveniente dejar una o dos líneas de reserva para posibles ampliaciones.

La figura 15.12 muestra una instalación de este tipo en forma unifilar, y en la 15.13 se ve el transformador y el cuadro de maniobras.

El cuadro de maniobras puede ser el de la figura 15.14.

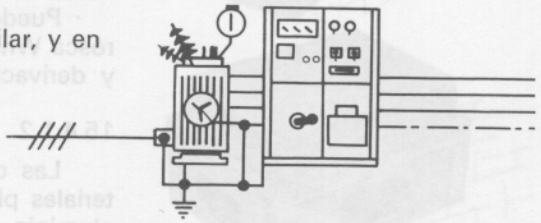


Fig. 15.13 Llegada de una línea de alta tensión al transformador y salida al cuadro de maniobras de baja tensión.

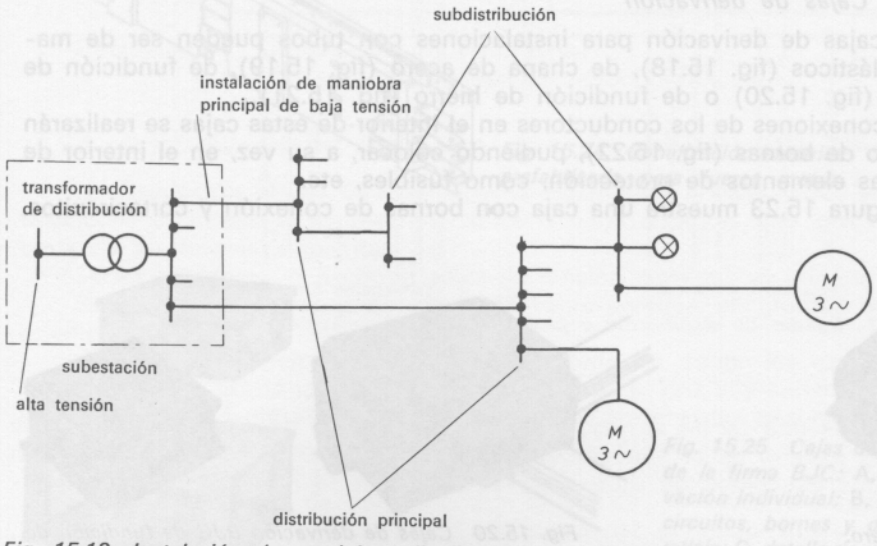


Fig. 15.12 Instalación de maniobra, distribución y subdistribución en una red de baja tensión.

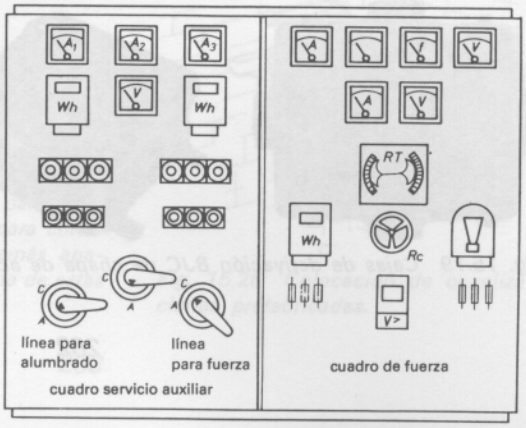


Fig. 15.14 Cuadro de maniobras.

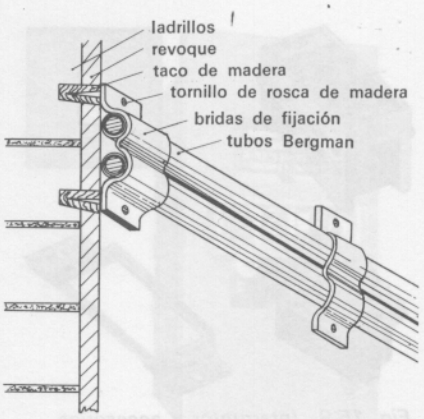


Fig. 15.16 Fijación de tubos Bergmann.

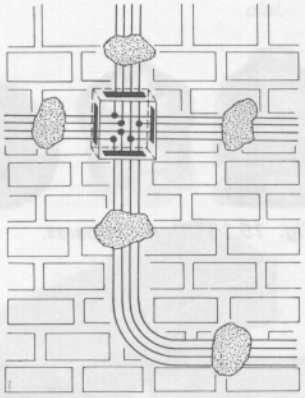


Fig. 15.17 Instalación empotrada con tubos de plástico antes del enlucido.

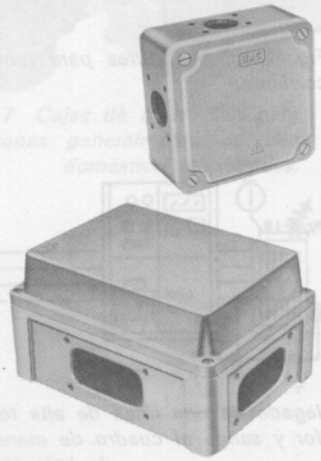


Fig. 15.18 Cajas de derivación BJC de material plástico.

15.4.1 *Formas de distribución*

La conducción de conductores puede hacerse de dos formas principalmente.

a) Con tubos de acero, plástico o Bergmann.

b) Con canalizaciones prefabricadas.

15.4.1.1 *Canalizaciones con tubos*

Los tres tipos de tubos más empleados en estas instalaciones son:

1.º tubo Bergmann;

2.º tubo de plástico;

3.º tubo de acero.

1.º *Tubo Bergmann.* Son tubos de chapa de hierro con aislamiento interior constituido por tiras de papel impregnado y endurecido con sustancias aislantes (alquitrán, brea, etc.,).

Se suministran en tiras de 3 m de longitud y los diámetros son los expresados en la tabla 15.15.

Tabla 15.15 Diámetros para tubos Bergmann

Diámetro interior en mm	9	11	13	16	23	29	36	48
Diámetro exterior en mm	13	16	19	21	29	35	43	55

La unión se realiza por medio de *manguitos* de chapa de hierro de unos 50 mm de longitud.

La sujeción, por medio de bridas, llamadas también *grapas,* que se fijan a la pared (fig. 15.16).

2.º *Tubos de plástico.* Son tubos de resinas sintéticas que están sustituyendo en gran medida al tubo Bergmann.

Generalmente, están hechos con policloruro de vinilo (normalmente en tubos corrugados) o de polietileno (habitualmente para tubos lisos); ambos pueden usarse tanto empotrados (fig. 15.17) como en montaje saliente, al igual que con tubos Bergmann.

3.º *Tubos de acero.* Se emplean tanto en montaje saliente como empotrados, sobre todo en instalaciones industriales.

Las ventajas que presentan son: resistencia al fuego y a la intemperie y gran resistencia mecánica.

Pueden llevar, o no, aislamiento interior y los hay de rosca métrica o de rosca Whitworth. Se da por supuesto que las uniones entre tubos o entre tubos y derivaciones son roscadas.

15.4.1.2 *Cajas de derivación*

Las cajas de derivación para instalaciones con tubos pueden ser de materiales plásticos (fig. 15.18), de chapa de acero (fig. 15.19), de fundición de aluminio (fig. 15.20) o de fundición de hierro (fig. 15.21).

Las conexiones de los conductores en el interior de estas cajas se realizarán por medio de bornas (fig. 15.22), pudiendo colocar, a su vez, en el interior de estas cajas elementos de protección, como fusibles, etc.

La figura 15.23 muestra una caja con bornas de conexión y cortacircuitos.

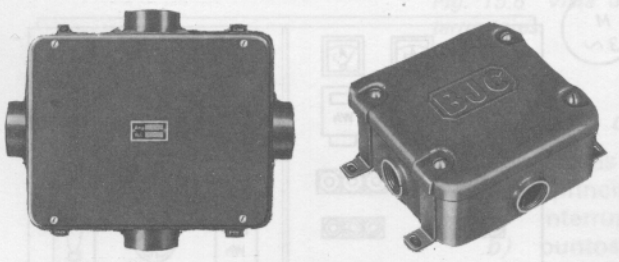


Fig. 15.19 Cajas de derivación BJC de chapa de acero.

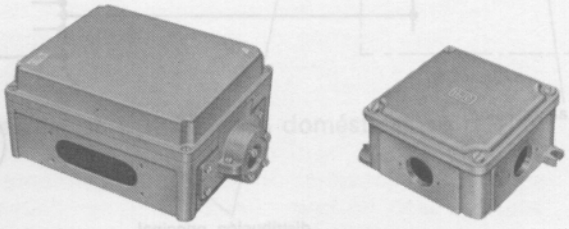


Fig. 15.20 Cajas de derivación BJC de fundición de aluminio.



Fig. 15.21 Cajas de derivación BJC de fundición de hierro.

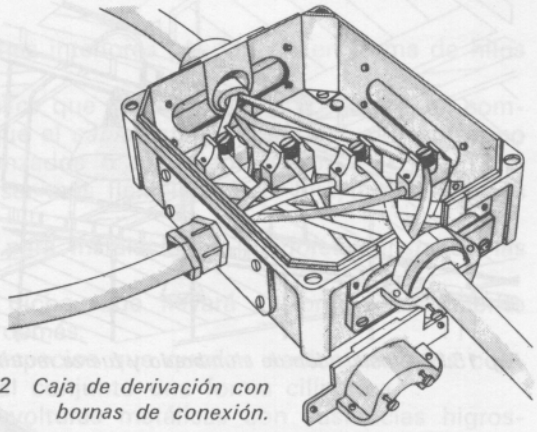


Fig. 15.22 Caja de derivación con bornas de conexión.

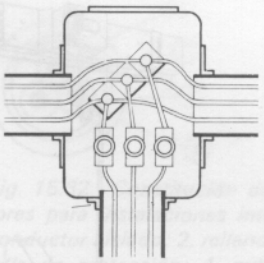


Fig. 15.23 Caja de derivación con bornas de conexión y cortacircuitos.

15.4.1.3 *Canalizaciones eléctricas prefabricadas*

Actualmente se fabrican numerosos modelos para empleo sobre todo en instalaciones industriales.

Las distribuciones con canalizaciones prefabricadas, instaladas de forma descentralizada, cubren cualquier necesidad de derivación, actual o futura. Cuando se desee, se puede modificar el número de derivaciones así como el trazado, variando el número y disposición de los elementos que constituyen la canalización, con sencillas operaciones y poca pérdida de materiales.

Otra particularidad importante es la alimentación de galerías, cuadros de distribución, etc., con una utilización más racional del espacio disponible.

Estas canalizaciones se fabrican con elementos desde 50 cm a 5 m de longitud (fig. 15.24). Las derivaciones se efectúan por medio de cajas especiales con dispositivos de protección o sin ellos (fig. 15.25).

La colocación puede ser en el techo, sobre paredes, sobre columnas metálicas, etc. (fig. 15.26).

En la figura 15.27 puede verse una forma de toma de corriente para las máquinas; y en la figura 15.28 una instalación para alumbrado y fuerza motriz.

En las canalizaciones prefabricadas la conducción puede ser por cables (fig. 15.29) o por barras de cobre o aluminio desnudos, bajo envolventes protectoras metálicas (fig. 15.30).

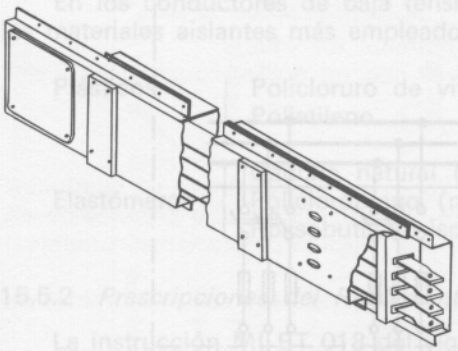


Fig. 15.24 Canalización eléctrica prefabricada para fuerza motriz.

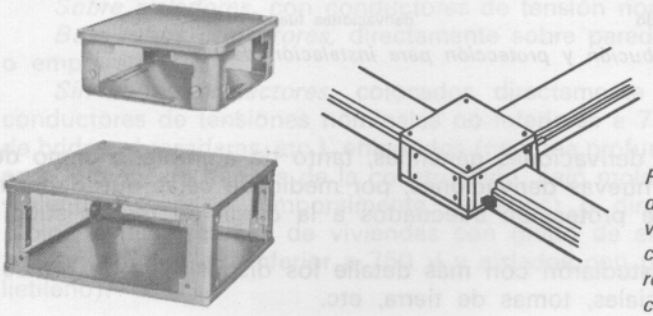


Fig. 15.25 Cajas de derivación de la firma BJC: A, para derivación individual; B, para cortacircuitos, bornes y demás aparellaje; C, detalle de una de estas cajas colocada.

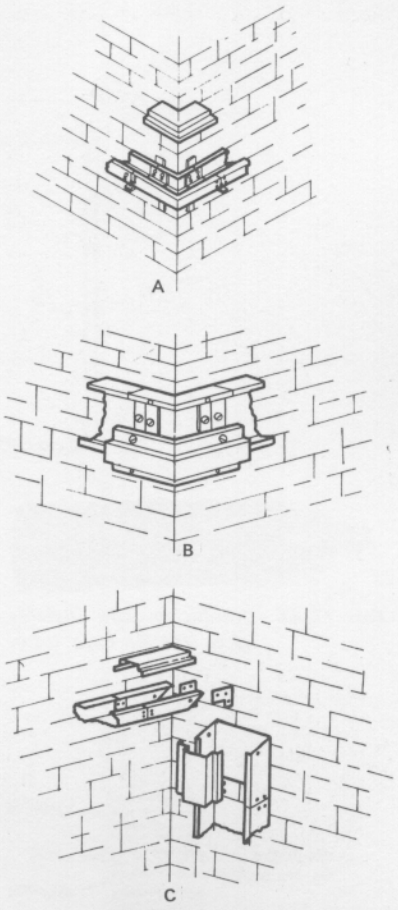


Fig. 15.26 Colocación de canalizaciones prefabricadas.

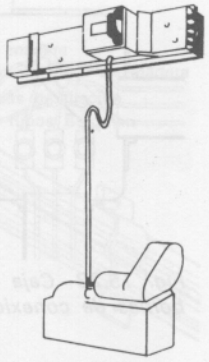


Fig. 15.27 Toma de corriente a pie de máquina.

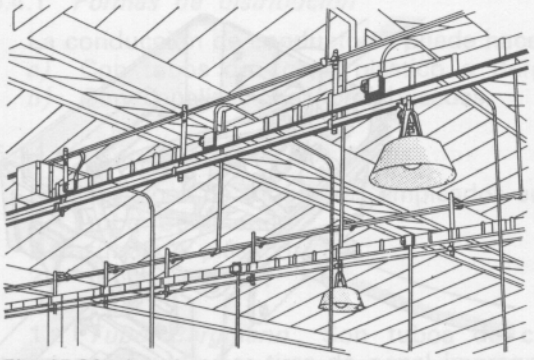


Fig. 15.28 Instalación de alumbrado y fuerza motriz.

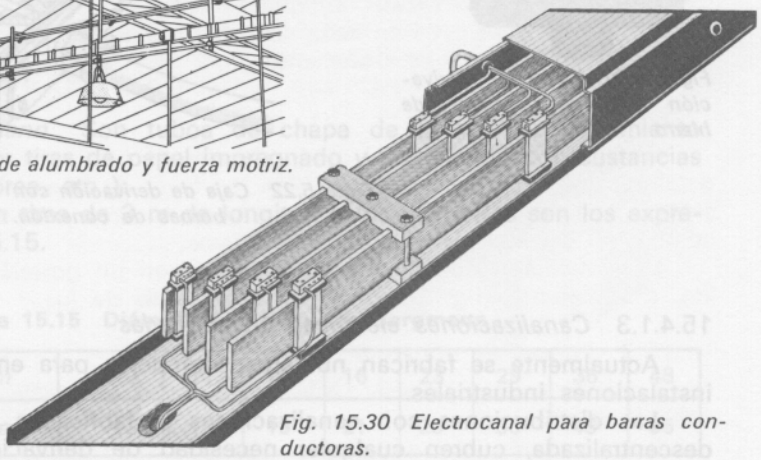


Fig. 15.30 Electrocanal para barras conductoras.

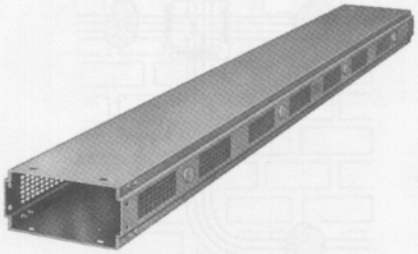


Fig. 15.29 Electrocanal para cables.

15.4.2 *Elementos de protección*

Según indica el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, todas las instalaciones interiores deben estar protegidas por cortacircuitos fusibles o por disyuntores de máxima intensidad que aseguren la interrupción de la corriente en caso de sobreintensidad o cortocircuito, sin que se formen arcos entre los bornes de dichos aparatos antes ni después de la interrupción.

En la figura 15.31 se ve el cuadro de distribución con los elementos mínimos recomendados de corte y protección.

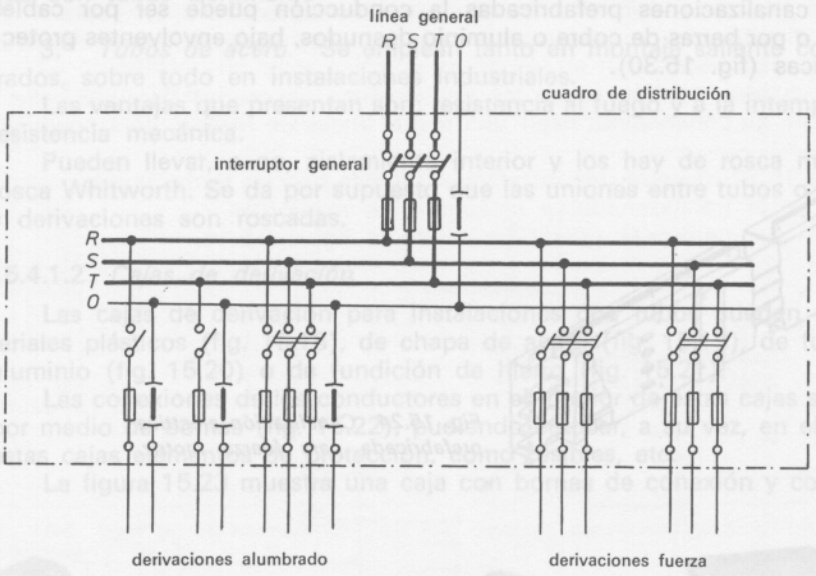


Fig. 15.31 Cuadro de distribución y protección para instalación de elevada potencia.

De cada una de las derivaciones generales, tanto de alumbrado como de fuerza, se pueden hacer nuevas derivaciones, por medio de cajas que deberán llevar otros elementos de protección adecuados a la carga de dichas subdivisiones.

En el Tema 10 se estudiaron con más detalle los dispositivos de protección como relés diferenciales, tomas de tierra, etc.

15.5 Conductores

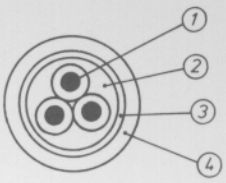


Fig. 15.32 Constitución de conductores para instalaciones interiores: 1, conductor aislado; 2, rellenos; 3, pantalla de protección; 4, cubierta.

Los conductores para instalaciones interiores pueden ser en forma de hilos o bien de cables.

Se denomina *hilo* la varilla metálica que tiene una longitud grande en comparación con su sección. Mientras que el *cable* estará constituido por un grupo de hilos, que normalmente irán trenzados o retorcidos juntos.

El cable tiene la propiedad de ser más flexible que el hilo, por lo que es más fácil de trabajar e instalar.

Estructuralmente un conductor para instalaciones interiores consta de las siguientes partes (fig. 15.32):

a) El conductor propiamente dicho, que llevará su propio aislamiento para aislarlo eléctricamente de los demás.

b) Un relleno, que ocupa los espacios que quedan vacíos entre los conductores cableados y que confiere al conjunto una forma cilíndrica.

c) Pantallas de protección, envolturas metálicas con sustancias higroscópicas, destinadas a evitar el paso de la humedad, además de proteger el hilo o cable contra acciones mecánicas exteriores. En instalaciones interiores los cables provistos de armaduras metálicas (3) se emplean solamente en casos especiales.

d) Cubierta, que recubre exteriormente el cable y está formada por materiales textiles, derivados del caucho, materiales termoplásticos, etc.

Según las normas UNE, los hilos o cables pueden ser de 1, 2, 3, 4 ó más conductores iguales, o de 3 conductores iguales y uno de sección más reducida para el conductor neutro. La sección nominal del conductor neutro se indica en la tabla 15.33, en función de la sección de los conductores activos o de fase.

Tabla 15.33 Sección nominal del conductor neutro

Sección nominal de los conductores activos (mm²)	1	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95
Sección nominal del conductor neutro (mm²)	1	1,5	1,5	2,5	4	6	10	16	16	25	35	50

15.5.1 *Materiales aislantes*

En los conductores de baja tensión empleados en instalaciones interiores, los materiales aislantes más empleados son los que se indican a continuación:

Plásticos
- Policloruro de vinilo
- Polietileno

Elastómeros
- Caucho natural (goma)
- Policloropreno (neopreno)
- Polisobutileno-isopreno (caucho butílico)

15.5.2 *Prescripciones del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión*

La instrucción MI BT 018 del vigente reglamento prescribe que en las instalaciones interiores se emplearán cables o hilos aislados, que puedan instalarse de las formas siguientes:

Sobre aisladores, con conductores de tensión nominal no inferior a 250 V.

Bajo tubos protectores, directamente sobre paredes, en montaje superficial o empotrada.

Sin tubos protectores, colocados directamente sobre las paredes (con conductores de tensiones nominales no inferiores a 750 V y sujetos por medio de bridas, abrazaderas, etc.), enterrados (con una profundidad mínima de 0,60 m). en el interior de huecos de la construcción, bajo molduras (sólo en locales polvorientos, secos o temporalmente húmedos) o directamente sobre enlucido (sólo en instalaciones de viviendas con grado de electrificación mínimo, con tensión nominal no inferior a 750 V y aislados con policloruro de vinilo o polietileno).

15.5.3 *Designación de conductores*

Para que puedan identificarse fácilmente, las Normas UNE establecen una designación por medio de siglas, que indican:

a) Tipo constructivo del cable o hilo.

b) Número de conductores, sección nominal, naturaleza y forma de los conductores.

c) Tensión nominal en voltios (V).

d) Otras indicaciones.

El tipo constructivo se indica por un grupo de letras. La primera indica el tipo de aislamiento:

P: papel impregnado.
V: policloruro de vinilo.
E: polietileno.
G: caucho natural vulcanizado (goma).
B: caucho butílico.

La segunda letra indica la forma en que están dispuestos los conductores; y se emplean:

Sin indicación: conductores cilíndricos.
K: conductores concéntricos.
D: conductores situados en un mismo plano.

La letra siguiente indica la naturaleza de la envoltura que rodea los aislamientos de los conductores, siendo los empleados:

P: tubo continuo de plomo.
Al: tubo continuo de aluminio.

Las demás letras se refieren a protecciones mecánicas, químicas, etc.; y son para armaduras:

F: flejes de hierro o acero.
M: alambres de hierro o acero.
Q: pletinas de hierro o acero.

Las cubiertas se indican con:

J: fibras textiles impregnadas.
V: policloruro de vinilo.
G: caucho natural vulcanizado.
N: policloropreno (neopreno o equivalente).
X: cubierta común a varios conductores.

En cuanto a indicaciones relativas a conductores, se expresan:

1.º la cifra que corresponde al número de conductores, seguido por una *X*.
2.º sección nominal de un conductor, en mm^2.
3.º el material constituyente de los conductores:
Sin indicación: cobre.
Al: aluminio.

A continuación se indica la tensión nominal en voltios.

Por último, y separadas de las anteriores con un guión, características especiales de los conductores:

F: conductor flexible.
E: conductor estañado.

Por ejemplo, *GFGN*, 3 × 16 + 1 × 10, 250 – FE indica que es un conductor de cobre tripolar con neutro y estañado, de 16 mm^2, con doble aislamiento de goma, armadura de flejes de acero, cubierta de neopreno, para tensión nominal de 250 V.

En la figura 15.34 se muestra un tipo de conductor con denominación UNE: VV750.



Fig. 15.34 Conductor para instalación interior bajo tubo.

15.5.4 *Colores distintivos*

El conductor de protección se distinguirá siempre por los colores *amarillo-verde*, pudiendo ser de una de las formas de la figura 15.35.

El conductor neutro, cuando haya en la instalación, se distinguirá siempre por el color *azul claro.*

Los conductores de fase se distinguirán por los colores *marrón* o *negro.*

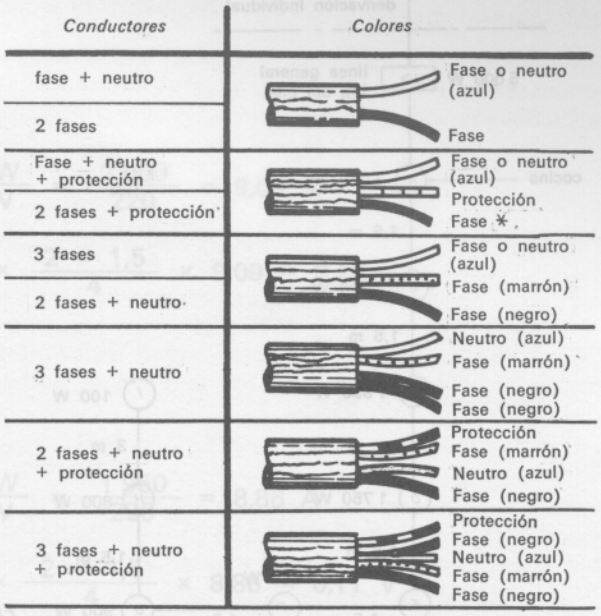
Un ejemplo de lo expuesto se puede ver en la figura 15.36.



Fig. 15.35 Conductor de protección.

15.6 Cálculo y presupuesto para instalaciones sencillas

En este apartado se hace un estudio del cálculo de la sección de los conductores y el presupuesto de una instalación interior para vivienda.



* negro para cables rígidos; marrón para cables flexibles

Fig. 15.36 Identificación de conductores.

15.6.1 *Vivienda familiar*

La figura 15.37 muestra la vista en planta y el esquema unifilar de una vivienda.

Se indican también el número de conductores y sección de los mismos en cada tramo.

La potencia total que se debe instalar en la vivienda será de 5 000 W con una tensión de 220 V.

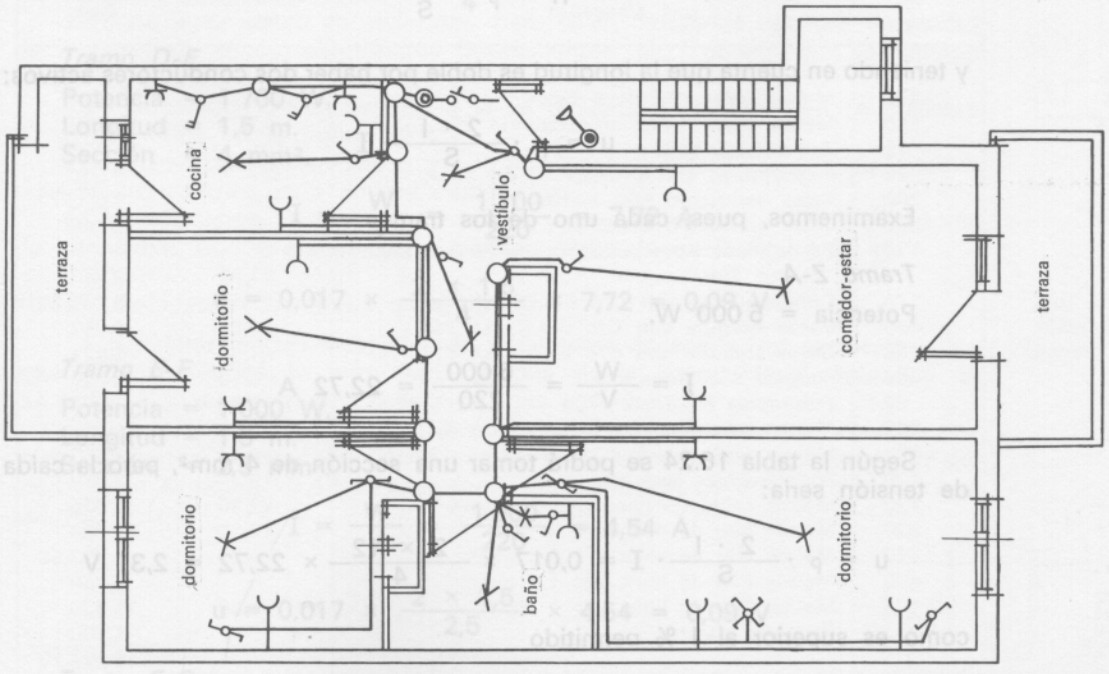


Fig. 15.37 Vista en planta e instalación unifilar de una vivienda.

La figura 15.38 ofrece una representación esquemática unifilar de la instalación, con objeto de facilitar el cálculo.

Las secciones se calculan teniendo en cuenta las caídas de tensión; éstas no deben pasar del 1 % para la derivación individual y del 3 % para la instalación interior, tomando esta caída de tensión entre el origen de la instalación y cualquier punto de utilización.

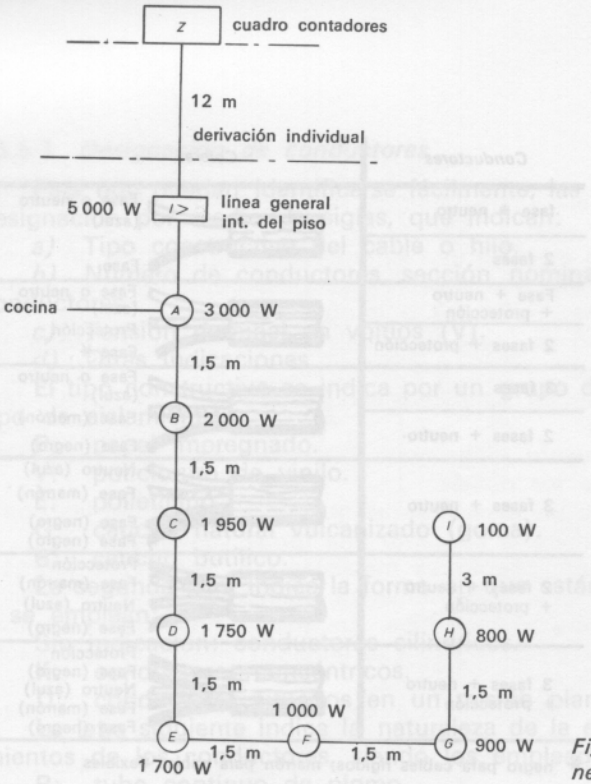


Fig. 15.38 Instalación general interior del piso.

La caída de tensión será:

$$u = R \cdot I$$

Pero siendo:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

y teniendo en cuenta que la longitud es doble por haber dos conductores activos:

$$u = \rho \cdot \frac{2 \cdot l}{S} \cdot I$$

Examinemos, pues, cada uno de los tramos:

Tramo Z-A

Potencia = 5 000 W.

$$I = \frac{W}{V} = \frac{5\,000}{220} = 22{,}72 \text{ A}$$

Según la tabla 16.24 se podrá tomar una sección de 4 mm², pero la caída de tensión sería:

$$u = \rho \cdot \frac{2 \cdot l}{S} \cdot I = 0{,}017 \times \frac{2 \times 12}{4} \times 22{,}72 = 2{,}31 \text{ V}$$

como es superior al 1 % permitido

$$\left(u = \frac{1 \times 220}{100} = 2{,}2 \text{ V}\right)$$

se escogerá la inmediatamente superior, que es 6 mm², ya que entonces:

$$u = 0{,}017 \times \frac{2 \times 12}{6} \times 22{,}72 = 1{,}54 \text{ V}$$

inferior a la máxima permitida.

Tramo A-B

Potencia = 2 000 W.
Longitud = 1,5 m.
Sección = 4 mm².

$$I = \frac{W}{V} = \frac{2\,000}{220} = 9{,}09 \text{ A}$$

$$u = 0{,}017 \times \frac{2 \times 1{,}5}{4} \times 9{,}09 = 0{,}11 \text{ V}$$

Tramo B-C

Potencia = 1 950 W.
Longitud = 1,5 m.
Sección = 4 mm².

$$I = \frac{W}{V} = \frac{1\,950}{220} = 8{,}86 \text{ A}$$

$$u = 0{,}017 \times \frac{2 \times 1{,}5}{4} \times 8{,}86 = 0{,}11 \text{ V}$$

Tramo C-D

Potencia = 1 750 W.
Longitud = 1,5 m.
Sección = 4 mm².

$$I = \frac{W}{V} = \frac{1\,750}{220} = 7{,}95 \text{ A}$$

$$u = 0{,}017 \times \frac{2 \times 1{,}5}{4} \times 7{,}95 = 0{,}10 \text{ V}$$

Tramo D-E

Potencia = 1 700 W.
Longitud = 1,5 m.
Sección = 4 mm².

$$I = \frac{W}{V} = \frac{1\,700}{220} = 7{,}72 \text{ A}$$

$$u = 0{,}017 \times \frac{2 \times 1{,}5}{4} \times 7{,}72 = 0{,}09 \text{ V}$$

Tramo E-F

Potencia = 1 000 W.
Longitud = 1,5 m.
Sección = 2,5 mm².

$$I = \frac{W}{V} = \frac{1\,000}{220} = 4{,}54 \text{ A}$$

$$u = 0{,}017 \times \frac{2 \times 1{,}5}{2{,}5} \times 4{,}54 = 0{,}09 \text{ V}$$

Tramo F-G

Potencia = 900 W.
Longitud = 1,5 m.
Sección = 2,5 mm².

$$I = \frac{W}{V} = \frac{900}{220} = 4{,}09 \text{ A}$$

$$u = 0{,}017 \times \frac{2 \times 1{,}5}{2{,}5} \times 4{,}09 = 0{,}08 \text{ V}$$

Tramo G-H

Potencia = 800 W.
Longitud = 1,5 m.
Sección = 2,5 mm².

$$I = \frac{W}{V} = \frac{800}{220} = 3{,}63 \text{ A}$$

$$u = 0{,}017 \times \frac{2 \times 1{,}5}{2{,}5} \times 3{,}63 = 0{,}07 \text{ V}$$

Tramo H-I

Potencia = 100 W.
Longitud = 3 m.
Sección = 1 mm².

$$I = \frac{W}{V} = \frac{100}{220} = 0{,}22 \text{ A}$$

$$u = 0{,}017 \times \frac{2 \times 3}{1} \times 0{,}22 = 0{,}02 \text{ V}$$

La caída de tensión total será:

1,54 + 0,11 + 0,11 + 0,10 + 0,09 + 0,09 + 0,08 + 0,07 + 0,02 = 2,21 V

inferior a la permitida por el Reglamento.

15.6.2 *Presupuesto*

Suponiendo que la instalación es para 20 viviendas iguales a la descrita, se tendrá:

Número de Unidades	*Concepto*	*Precio Unitario Ptas.*	*Total Ptas.*
20	Interruptores automáticos diferenciales, 0,3 A	2 200	44 000
270	Metros cable d/c de 6 mm²	22,30	6 021
140	Metros tubo P.V.C. articulado ∅ 23	12,20	1 708
20	Zumbadores timbre	101	2 020
20	Interruptores con C/c A.P. II de 25 A	327	6 540
200	Cajas derivación 100 × 100 mm	14	2 800
520	Cajas derivación B.J.C. n.º 742	8	4 160
130	Bases enchufe con cortacircuito calibrado B.J.C. n.º 769	71,90	9 347
116	Conmutadores con C/c B.J.C. n.º 766	77,10	8 943,60
130	Bases enchufe con C/c B.J.C. n.º 768	68,90	8 957
130	Bases enchufe con C/c B.J.C. n.º 711	41,70	5 421
350	Fusibles calibrados B.J.C. n.º 498	6,40	2 240
20	Pulsadores B.J.C. n.º 708	42,20	844
180	Metros tubo *Emaplax* articulado ∅ 16	7,40	1 332
1 870	Metros tubo *Emaplax* articulado ∅ 13,5	6,10	11 407
170	Portalámparas baquelita	12	2 040
120	Metros cable de línea d/c de 6 mm²	22,30	2 676
820	Metros hilo de línea d/c 4 mm²	14,30	11 726
770	Metros hilo de línea d/c 2,5 mm²	9,25	8 972,50
490	Metros hilo de línea d/c 1,5 mm²	6	2 940
3 100	Metros hilo de línea d/c 1 mm²	4,30	13 330
	Pequeño material		1 200
	SUMA		158 625,10
	Mano de obra de la instalación		39 500
	Imprevistos, 2 %		3 172,50
	3 %, derechos de ejecución y visado del proyecto		6 038,92
	SUMA		207 336,52
	Beneficio industrial, 6 %		12 440,19
	SUMA		219 776,71
	2,7 % I.T.E. A.P.		5 933,97
	SUMA TOTAL		225 710,68

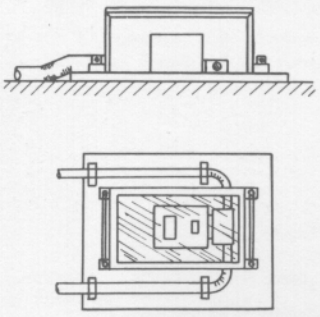


Fig. 15.39 Colocación de un contador individual.

Asciende este presupuesto a la expresada cantidad de DOSCIENTAS VEINTICINCO MIL SETECIENTAS DIEZ PESETAS CON 68 CENTIMOS.

15.7 Aparatos de registro de energía eléctrica

Los aparatos de registro de energía eléctrica, llamados *contadores eléctricos,* con sus indicaciones nos dan la base para el cálculo que harán la compañía suministradora y el consumidor en lo que a consumo de energía eléctrica se refiere.

15.7.1 *Condiciones generales*

Con independencia de las protecciones correspondientes a la instalación interior del local del abonado, se colocarán fusibles de seguridad. Estos fusibles se colocarán en cada uno de los hilos polares o de fase que van al contador y estarán precintados por la empresa suministradora.

Los contadores se instalarán sobre bases constituidas por materiales adecuados y no inflamables, y podrán disponerse en forma individual o en forma concentrada.

15.7.2 *Colocación en forma individual*

Dentro o fuera del local del abonado se colocarán el contador o contadores correspondientes, en sitio inmediato a la puerta de entrada y a una altura comprendida entre 1,5 y 1,80 m, y de forma que sea accesible por todos sus lados (fig. 15.39).

Los contadores se fijarán sobre la pared, nunca sobre tabique. Sobre sus bases podrán colocarse los fusibles de seguridad.

Para instalaciones de contadores con transformadores de intensidad, el conjunto de estos aparatos y sus conexiones se colocarán en armarios precintables. A la salida de éste, el cuadro con interruptor y cortacircuitos y otros aparatos que puedan ser intervenidos por el usuario (fig. 15.40). El contador debe estar separado unos 50 cm del transformador más próximo.

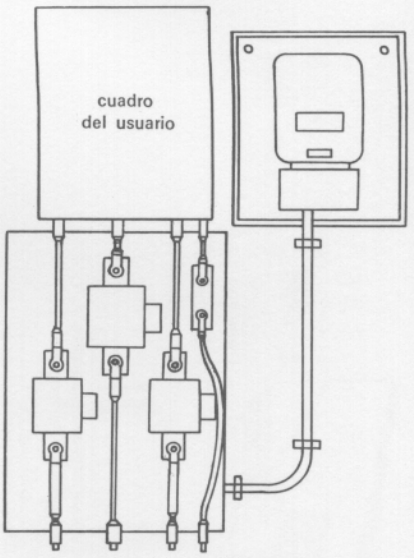


Fig. 15.40 Instalación de contador con transformadores de intensidad.

15.7.3 *Contadores de energía reactiva*

En locales cuyo consumo de energía reactiva sea elevado, deberá instalarse un contador de energía reactiva.

Esto no suele darse en viviendas, pero sí en industrias con gran cantidad de motores eléctricos, alumbrados fluorescentes, etc., puesto que la energía reactiva que necesitan estos aparatos es elevada.

La colocación será semejante a la ya descrita, y la conexión se realizará como se indica en la figura 15.41.

En el caso de ser necesarios transformadores de intensidad y/o de tensión, servirán los mismos para ambos contadores.

Si la instalación se realiza con barras y se desea instalar transformadores de intensidad, puede ejecutarse el montaje indicado en la figura 15.42.

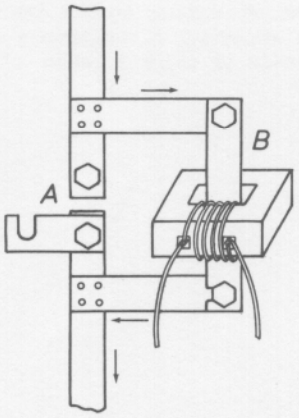


Fig. 15.42 Transformador de intensidad en instalación por medio de barras.

15.7.4 *Colocación en forma concentrada*

Se instalarán en un local cerrado, fácilmente accesible, no expuesto a los agentes atmosféricos, lo más cerca posible de la acometida y separados de las instalaciones de agua, calefacción, gas y teléfono.

Se instalarán en baterías lo más cerca posible de los cortacircuitos de entrada, partiendo desde cada contador una línea independiente al domicilio del usuario. En la figura 15.43 se representa la instalación de una batería de contadores.

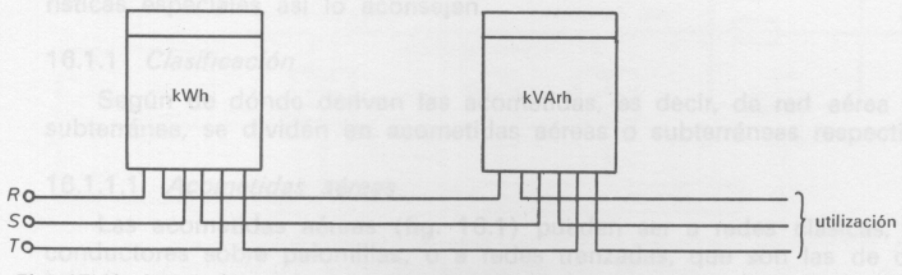


Fig. 15.41 Instalación de contadores de activa y reactiva.

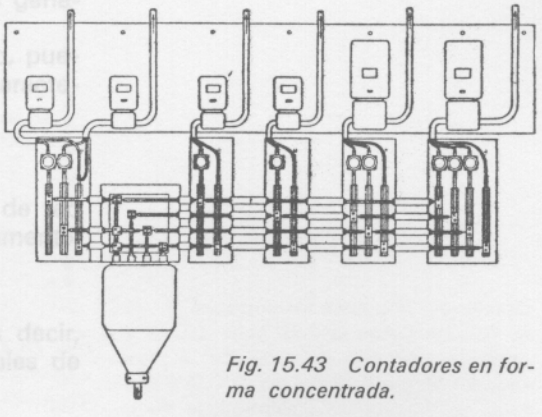


Fig. 15.43 Contadores en forma concentrada.

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Sobre el plano de una vivienda, realícese la distribución de los circuitos correspondientes a una electrificación media.

— De la instalación antes proyectada, hágase un cálculo y presupuesto económico.

— Recopílense catálogos comerciales de los materiales utilizados en instalaciones de viviendas.

CUESTIONARIO

15.1 En una vivienda con calefacción eléctrica, ¿qué grado de electrificación es necesario?

15.2 En las instalaciones de talleres hay que tener en cuenta el tipo de equipo que gobierna las máquinas, ¿en cuanto a qué?

15.3 Un interruptor diferencial usado como dispositivo de mando y protección en una vivienda, ¿qué protecciones debe incluir?

15.4 Cuántos y cuáles son los órganos de desenganche en un interruptor automático.

15.5 Cuáles son los grados normales de sensibilidad en los interruptores diferenciales.

15.6 ¿Se pueden instalar enchufes gobernados por interruptores? En caso afirmativo, indicar en qué ocasiones.

15.7 Qué aparatos colocarías en un cuadro de maniobras y distribución.

15.8 Cuáles son los tipos de tubo más empleados en instalaciones eléctricas y cuáles son sus características principales.

15.9 Qué indican las siglas VV750 del conductor de la figura 15.33.

15.10 En un conductor de 2 fases más neutro y protección, ¿qué colores nos indicarán cada uno?

15.11 Realiza el esquema multifilar de la figura 15.41 con transformadores de intensidad y tensión.

BIBLIOGRAFIA

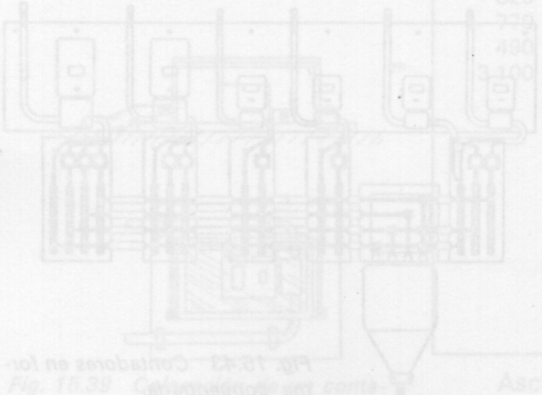
ASOCIACION ELECTROTECNICA ESPAÑOLA, *Recomendaciones para Instalaciones de Baja Tensión,* Barcelona 1958.

SPITTA, *Instalaciones eléctricas,* Dossat, Madrid 1975.

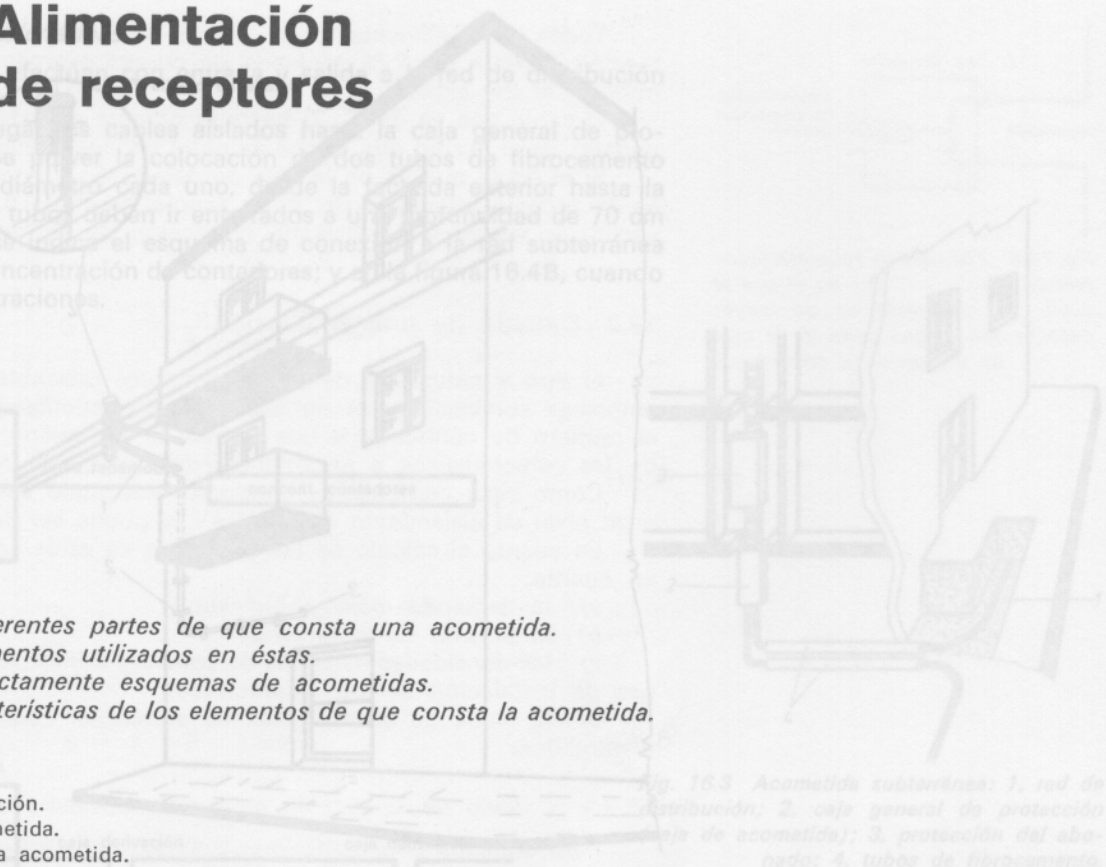
Instalaciones de Baja Tensión. Cálculo de líneas eléctricas, Enciclopedia CEAC de Electricidad, Ediciones CEAC, S. A., Barcelona 1974.

Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, Madrid 1973.

Tratado de Electrotecnia práctica, Manual AEG, Paraninfo, Madrid 1972.



Tema 16. Alimentación de receptores



OBJETIVOS

— *Distinguir las diferentes partes de que consta una acometida.*
— *Conocer los elementos utilizados en éstas.*
— *Representar correctamente esquemas de acometidas.*
— *Conocer las características de los elementos de que consta la acometida.*

GUION

— Acometidas. Clasificación.
— Cálculo de una acometida.
— Forma de realizar una acometida.
— Cajas de acometida.
— Línea repartidora.
— Derivaciones individuales.
— Contadores.
— Conductores.
— Presupuesto de una acometida sencilla.

PUNTOS CLAVE

— Acometidas. Realización y cálculo.
— Línea repartidora.
— Contadores.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

— Simbología normalizada para instalaciones eléctricas.

EXPOSICION DEL TEMA

16.1 Acometidas

Se denomina acometida a la parte de instalación comprendida entre la red de distribución pública o centro de transformación y la caja o cajas generales de protección.

En general, se dispone una sola acometida por edificio; sin embargo, pueden establecerse acometidas independientes para suministros cuyas características especiales así lo aconsejen.

16.1.1 *Clasificación*

Según de dónde derivan las acometidas, es decir, de red aérea o de red subterránea, se dividen en acometidas aéreas o subterráneas respectivamente.

16.1.1.1 *Acometidas aéreas*

Las acometidas aéreas (fig. 16.1) pueden ser a redes clásicas, es decir, conductores sobre palomillas; o a redes trenzadas, que son las de cables de haces.

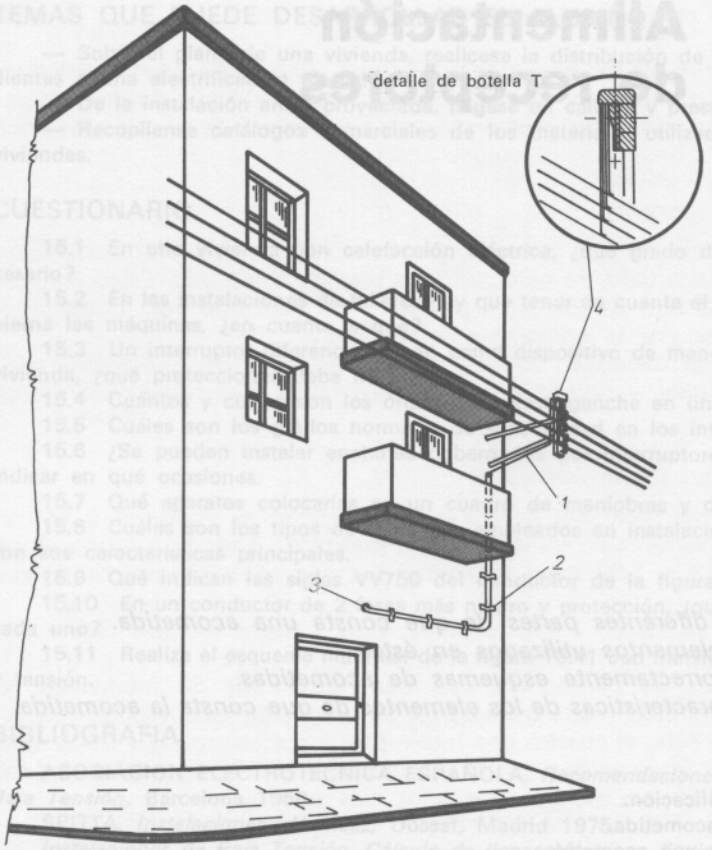


Fig. 16.1 Acometida aérea: 1. palomilla; 2, grapas que separan el tubo de la pared; 3, pasamuros de hierro galvanizados o de plomo; 4, botella terminal.

En la figura 16.2A puede verse la forma de conexión en el caso de un edificio con una concentración de contadores; y en la figura 16.2B, con dos o más concentraciones de contadores.

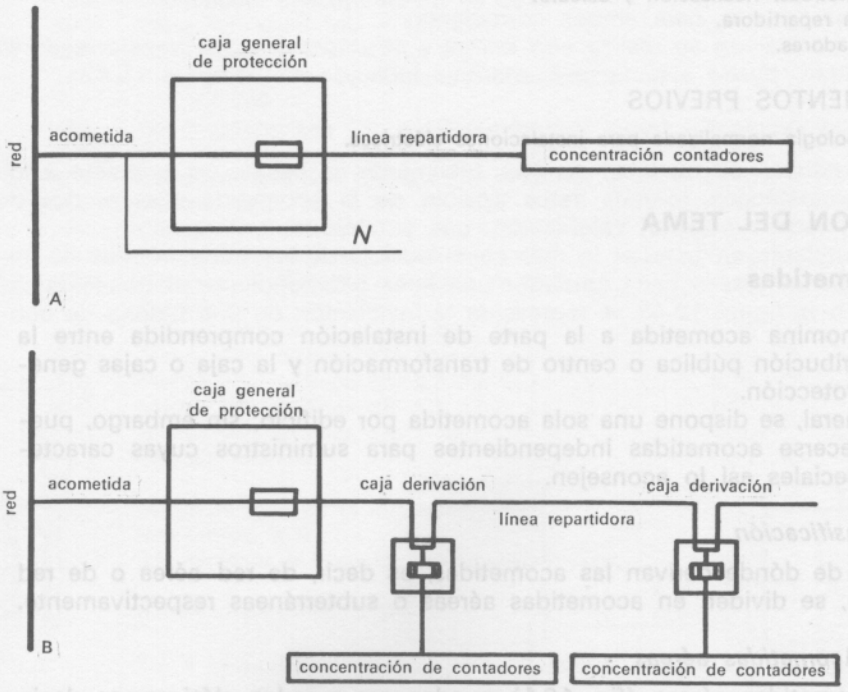


Fig. 16.2 A, *esquema de conexiones (red aérea), casa de una concentración de contadores;* B, *esquema de conexiones (red aérea), casa de dos o más concentraciones de contadores.*

16.1.1.2 *Acometidas subterráneas*

Estas acometidas se efectúan con entrada y salida a la red de distribución (fig. 16.3).

Para que puedan llegar los cables aislados hasta la caja general de protección, el abonado debe prever la colocación de dos tubos de fibrocemento o similar, de 12 cm de diámetro cada uno, desde la fachada exterior hasta la caja de protección. Estos tubos deben ir enterrados a una profundidad de 70 cm

En la figura 16.4A se indica el esquema de conexión a la red subterránea de un edificio con una concentración de contadores; y en la figura 16.4B, cuando hay dos o más concentraciones.

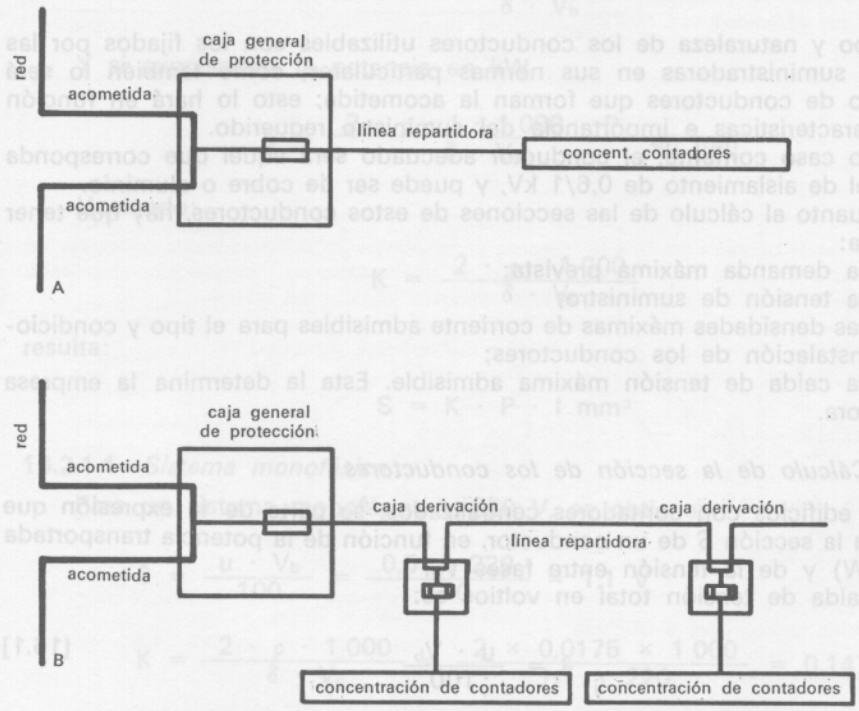


Fig. 16.4 A, *esquema de conexión (red subterránea), casa de una concentración de contadores;* B, *esquema de conexión (red subterránea), casa de dos o más concentraciones de contadores.*

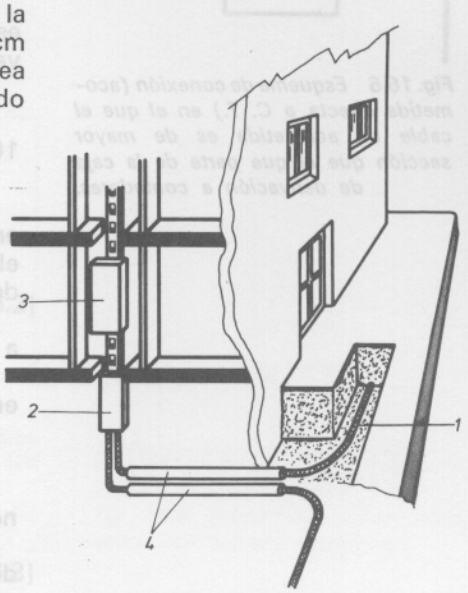


Fig. 16.3 Acometida subterránea: 1, red de distribución; 2, caja general de protección (caja de acometida); 3, protección del abonado; 4, tubos de fibrocemento.

16.1.1.3 *Acometidas directas a C. T. (Centro de Transformación)*

En algunas ocasiones, cuando la potencia que se debe instalar es elevada, es preciso realizar un entronque (conexión) directamente a un Centro de Transformación. En las figuras 16.5A y 16.5B se indican los esquemas de conexiones de este tipo de acometidas.

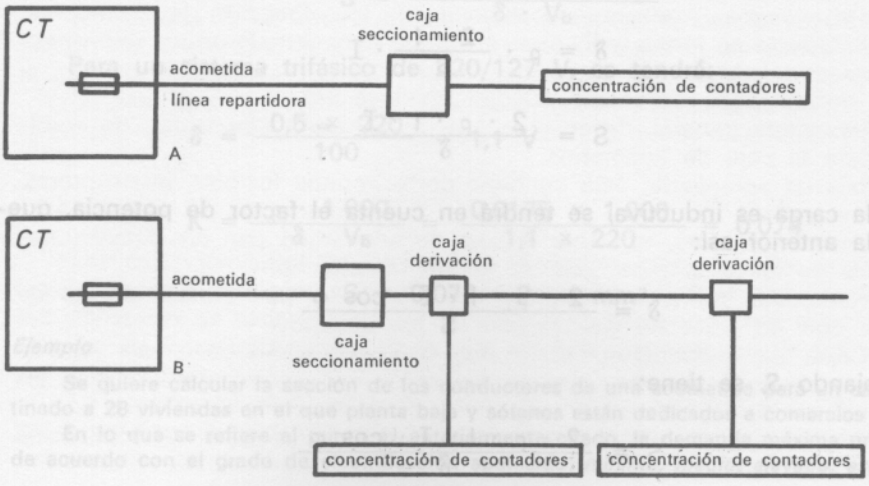


Fig. 16.5 A, *esquema de conexión (acometida directa a C. T.), casa de una concentración de contadores;* B, *esquema de conexión (acometida directa a C. T.), casa de dos o más concentraciones de contadores.*

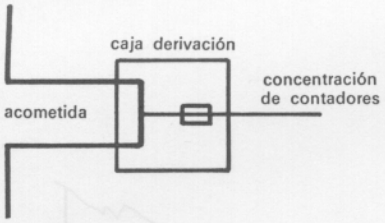


Fig. 16.6 Esquema de conexión (acometida directa a C. T.) en el que el cable de acometida es de mayor sección que el que parte de la caja de derivación a contadores.

Todas estas alimentaciones directas se deben calcular con una caída de tensión máxima del 2 %, teniendo en cuenta además la densidad máxima admisible de los cables.

El cable que va del C. T. hasta la primera caja de derivación, como norma general, es el mismo que el que va entre las dos o más cajas de derivación.

Si el cable que va de la caja de derivación a concentración de contadores es de sección inferior al del de la acometida (fig. 16.6), en las cajas de derivación se disponen fusibles de protección de dicho cable.

16.2 Cálculo de una acometida

El tipo y naturaleza de los conductores utilizables son los fijados por las empresas suministradoras en sus normas particulares, como también lo será el número de conductores que forman la acometida; esto lo hará en función de las características e importancia del suministro requerido.

Como caso corriente, el conductor adecuado será aquél que corresponda a un nivel de aislamiento de 0,6/1 kV, y puede ser de cobre o aluminio.

En cuanto al cálculo de las secciones de estos conductores, hay que tener en cuenta:

a) la demanda máxima prevista;

b) la tensión de suministro;

c) las densidades máximas de corriente admisibles para el tipo y condiciones de instalación de los conductores;

d) la caída de tensión máxima admisible. Esta la determina la empresa distribuidora.

16.2.1 *Cálculo de la sección de los conductores*

Para edificios con contadores centralizados, se parte de la expresión que determina la sección S de un conductor, en función de la potencia transportada P (en kW) y de la tensión entre fases V_b.

La caída de tensión total en voltios es:

$$\delta = \frac{u \cdot V_b}{100} \qquad [16.1]$$

siendo u la caída porcentual de tensión; (en el caso de contadores centralizados, ésta es 0,5 %).

Para un sistema monofásico, resulta

$$\delta = R \cdot I \; ; \; R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

donde:

ρ = resistividad del material empleado (para el cobre, 0,0175).

Teniendo en cuenta que la longitud será doble:

$$\delta = \rho \cdot \frac{2 \cdot l}{S} \cdot I$$

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot l \cdot I}{\delta}$$

Si la carga es inductiva, se tendrá en cuenta el factor de potencia, quedando la anterior así:

$$\delta = \frac{2 \cdot \rho \cdot l \cdot I \cdot \cos \varphi}{S}$$

y despejando S, se tiene:

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot l \cdot I \cdot \cos \varphi}{\delta}$$

sustituyendo I por su valor:

$$I = \frac{P}{V_b \cdot \cos \varphi}$$

queda:

$$\delta = \frac{2 \cdot \rho \cdot l \cdot P}{S \cdot V_b}$$

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot l \cdot P}{\delta \cdot V_b}$$

Y si expresamos la potencia en kW,

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot l \cdot 1\,000 \cdot P}{\delta \cdot V_b} \text{ en mm}^2 \qquad [16.2]$$

Haciendo:

$$K = \frac{2 \cdot \rho \cdot 1\,000}{\delta \cdot V_b}$$

resulta:

$$S = K \cdot P \cdot l \text{ mm}^2 \qquad [16.3]$$

16.2.1.1 *Sistema monofásico*

Para un sistema monofásico a 220 V, se obtiene:

$$\delta = \frac{u \cdot V_b}{100} = \frac{0{,}5 \times 220}{100} = 1{,}1 \text{ V}$$

$$K = \frac{2 \cdot \rho \cdot 1\,000}{\delta \cdot V_b} = \frac{2 \times 0{,}0175 \times 1\,000}{1{,}1 \times 220} = 0{,}147$$

luego la sección será:

$$S = 0{,}147 \cdot P \cdot l \text{ mm}^2 \qquad [16.4]$$

16.2.1.2 *Sistema trifásico*

Teniendo en cuenta que en los sistemas trifásicos se calcula la sección de uno de los conductores, con un estudio similar al anterior, se obtendrá:

$$\delta = \frac{\rho \cdot l \cdot 1\,000 \cdot P}{S \cdot V_b}$$

$$S = \frac{\rho \cdot l \cdot 1\,000 \cdot P}{\delta \cdot V_b}$$

Para un sistema trifásico de 220/127 V, se tendrá:

$$\delta = \frac{0{,}5 \times 220}{100} = 1{,}1 \text{ V}$$

$$K = \frac{\rho \cdot 1\,000}{\delta \cdot V_b} = \frac{0{,}0175 \times 1\,000}{1{,}1 \times 220} = 0{,}074$$

$$S = 0{,}074 \cdot P \cdot l \text{ mm}^2 \qquad [16.5]$$

Ejemplo

Se quiere calcular la sección de los conductores de una acometida para un edificio destinado a 28 viviendas en el que planta baja y sótanos están dedicados a comercios y oficinas.

En lo que se refiere al punto *a)* anteriormente citado, la demanda máxima prevista será de acuerdo con el grado de electrificación apetecido: *mínimo, medio, elevado, especial.*

En este ejemplo, para las viviendas se escoge una electrificación *media,* que permite la utilización de alumbrado, cocina eléctrica, cualquier tipo de lavadora, calentador eléctrico de agua, nevera, radio, televisor y otros aparatos electrodomésticos. Previsión de demanda máxima total: 5 000 vatios.

La carga correspondiente al conjunto de viviendas se obtendrá multiplicando el número de ellas por la demanda máxima prevista por vivienda. Este valor vendrá afectado por el coeficiente de simultaneidad que corresponde aplicar por la no coincidencia de las demandas máximas de cada vivienda (tabla 16.7).

Tabla 16.7 Coeficiente de simultaneidad según el número de abonados

Número de abonados	*Coeficiente de simultaneidad*	
	Electrificación mínima y media	*Electrificación elevada y especial*
2 a 4	1	0,8
5 a 15	0,8	0,7
15 a 25	0,6	0,5
> 25	0,5	0,4

Hay que tener también en cuenta la carga correspondiente a los servicios generales de edificio, que será la suma de la potencia instalada en ascensores, montacargas, alumbrado del portal, caja de escalera y en todo servicio eléctrico general del edificio.

En cuanto a la carga de edificios comerciales y oficinas, se tomará una potencia de 100 W por metro cuadrado y por planta, con un mínimo por abonado de 5 000 W.

La potencia total demandada por el edificio será:

— Viviendas:

1-4	4 × 5 × 1	=	20	kW
5-15	11 × 0,8 × 5	=	44	kW
16-25	10 × 0,6 × 5	=	30	kW
26-28	2 × 0,5 × 5	=	5	kW

— Servicios generales:

1.	ascensor	=	4,5	kW
2.	resto servicios	=	2,5	kW

— Edificios comerciales y oficinas:

1.	planta baja 90 m² × 0,1 kW/m²	=	9	kW
2.	planta sótano 220 m² × 0,1 W/m²	=	22	kW
	TOTAL		137	kW

En cuanto a la tensión de suministro, se supone que es trifásica a 220/127 V; por lo que se empleará para calcular la sección, la fórmula [16.5].

Y considerando una longitud de acometida de 8 m, se tiene:

$$S = K \cdot P \cdot I = 0{,}074 \times 108 \times 8 = 63{,}93 \text{ mm}^2$$

Debido a que no es comercial esta sección, se elegirá la comercial más próxima por exceso, la de 70 mm².

16.3 Forma de realizar una acometida

Las instalaciones de enlace entre la red de distribución pública y las instalaciones interiores se realizarán dependiendo de la colocación de contadores; esto es, contadores en forma individual, en forma concentrada en un solo punto o en forma concentrada por plantas.

Estas instalaciones de enlace pueden dividirse en:

a) Acometida general, desde el punto de conexión con la red de distribución hasta la caja de acometida.

b) Caja de acometida; ésta contiene cortacircuitos fusibles, interruptores, piezas de empalme, etc.

c) Línea repartidora, que une la caja de acometida con las derivaciones individuales de los abonados. Esta se divide también en:

1.º Acometida primaria o circuito de acometida, que enlaza la caja de acometida con las cajas de distribución de los usuarios.

2.º Cajas de distribución, destinadas a derivaciones de líneas repartidoras, que a través de nuevas cajas de derivación o directamente alimentan las instalaciones de los usuarios.

3.º Acometidas secundarias, líneas que parten de las cajas de distribución hasta los cuadros de contadores de los abonados.

16.3.1 *Acometida general*

Como se ha dicho en el primer apartado de este tema, puede ser aérea o subterránea; a continuación, se exponen algunas recomendaciones y normas para la realización de ambos tipos.

16.3.1.1 *Acometidas aéreas*

Se tenderá una derivación aérea desde la red aérea suministradora más próxima, con apoyos de palomilla o postes, si es preciso, hasta la caja de acometida.

La caja de acometida estará situada en el interior del edificio.

En la figura 16.1 puede verse una realización práctica de este tipo de acometida; la instalación posterior a la fachada puede ser la de la figura 16.8 en que se ve un recinto para acometida con la entrada a través de la pared, la caja de acometida y la acometida primaria que llegará hasta las cajas de distribución.

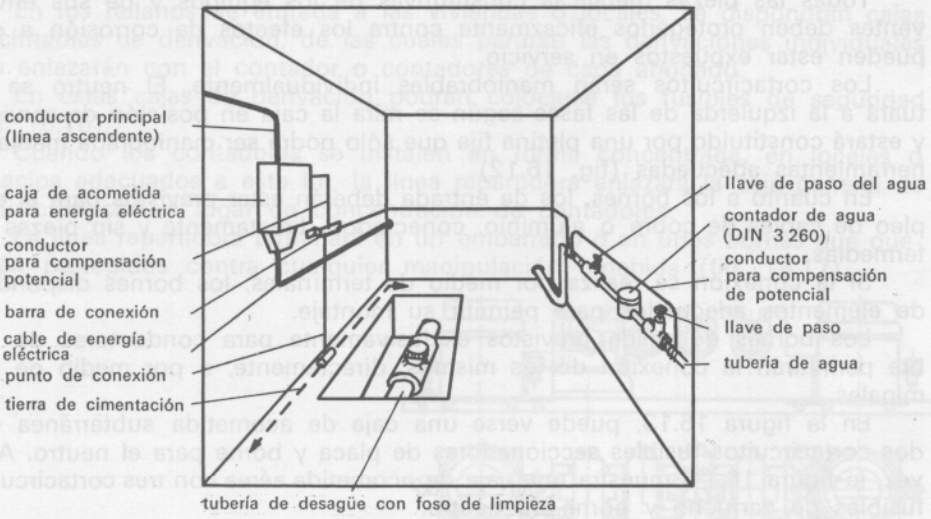


Fig. 16.8 Recinto de acometida.

Además de este tipo de acometida aérea con entrada aérea en el interior del edificio, existe otra disposición, que es la acometida aérea con entrada subterránea en el interior (fig. 16.9).

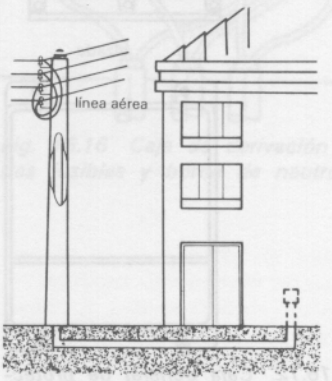


Fig. 16.9 Instalación de acometida aérea con entrada subterránea.

En la figura 16.10 se puede ver una terminal para el cambio de línea aérea a cable subterráneo, que se coloca junto con la palomilla de la red distribuidora o en el poste, según la forma de conducción de la red distribuidora pública. Debido a que esta caja irá colocada a la intemperie, su construcción debe ser adecuada para este tipo de instalación.

En las acometidas aéreas las cajas de acometida pueden ser colocadas tanto en la fachada del edificio como en el interior.

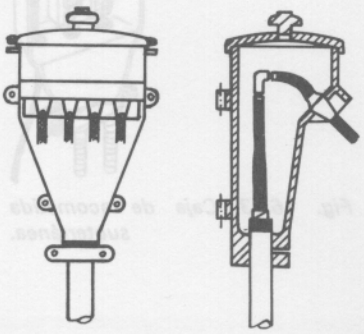


Fig. 16.10 Caja terminal para el cambio de línea.

16.3.1.2 *Acometidas subterráneas*

Una vista general de este tipo de acometidas se puede ver en la figura 16.3.

La mayoría de las veces, en estos casos, los cables de distribución son propiedad de la empresa suministradora, así como también las derivaciones hasta la caja de acometida (también llamada caja general de protección) incluida.

En este tipo de acometidas, la caja general de protección se instalará preferentemente en el interior del edificio, próxima a la puerta de entrada (fig. 16.11).

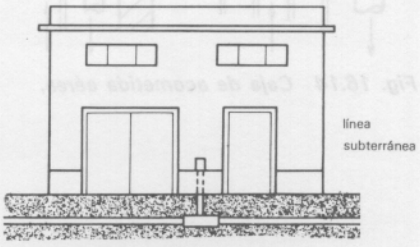
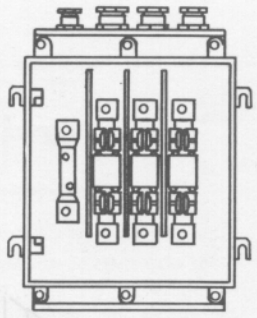


Fig. 16.11 Caja de acometida subterránea en el interior del edificio.

16.4 Cajas de acometidas

Las cajas generales de protección alojan los elementos de protección de las líneas repartidoras en el caso de acometidas a redes de distribución, o bien los elementos de seccionamiento en el caso de alimentaciones directas a C. T. (Centro de Transformación), dado que en éste disponen ya de los elementos de protección.

La colocación será, en cada caso, de común acuerdo entre el constructor, propietario o abonado y la empresa distribuidora. Estos puntos serán siempre elegidos en un lugar de tránsito general y de fácil y libre acceso.



alzado

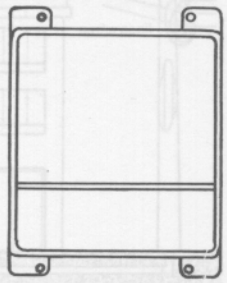


Fig. 16.12 Caja general de protección.

Se procurará que la situación elegida sea lo más próxima posible a la red general de distribución o C. T. y que quede alejada de otras instalaciones, tales como de agua, gas, teléfono, etc., pudiendo colocarse sobre la fachada del inmueble.

Se dispondrá una caja por cada línea repartidora.

Cuando haya varias líneas repartidoras, cada línea estará protegida por una caja general de protección.

16.4.1 *Tipos y características técnicas*

Las cajas responderán a lo dispuesto en la recomendación UNESA 1 403 A, que a continuación se detalla.

16.4.1.1 *Características mecánicas*

Las cajas serán de material aislante y autoextinguible, doble aislamiento.

Todas las piezas metálicas constitutivas de los equipos y de sus envolventes deben protegerlos eficazmente contra los efectos de corrosión a que pueden estar expuestos en servicio.

Los cortacircuitos serán maniobrables individualmente. El neutro se situará a la izquierda de las fases según se mira la caja en posición de servicio, y estará constituido por una pletina fija que sólo podrá ser maniobrada mediante herramientas adecuadas (fig. 16.12).

En cuanto a los bornes, los de entrada deberán estar previstos para el empleo de cables de cobre o aluminio, conectados directamente y sin piezas intermedias.

Si la conexión se realiza por medio de terminales, los bornes dispondrán de elementos adecuados para permitir su montaje.

Los bornes de salida previstos exclusivamente para conductores de cobre permitirán la conexión de los mismos, directamente, o por medio de terminales.

En la figura 16.13, puede verse una caja de acometida subterránea con dos cortacircuitos fusibles seccionadores de placa y borne para el neutro. A su vez, la figura 16.14, muestra una caja de acometida aérea con tres cortacircuitos fusibles de cartucho y borne de neutro.

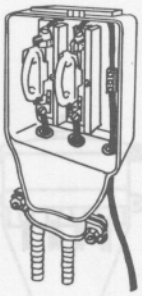


Fig. 16.13 Caja de acometida subterránea.

16.4.1.2 *Características eléctricas*

1.º *Maniobra de carga.* Las cajas deberán permitir la maniobra en carga de los cortacircuitos.

2.º *Cierre sobre cortacircuito.* Las cajas deberán satisfacer el ensayo de cierre de cortacircuito, según norma *UNE 21 090.*

3.º *Posibilidad de trabajos en tensión.* La disposición interior de las cajas permitirá, en todos los casos, la conexión y desconexión de los cables de salida con tensión.

4.º *Rigidez dieléctrica.* Las cajas deberán satisfacer los ensayos de rigidez dieléctrica que se describen en los apartados correspondientes de la norma UNE *21 015*, con unas tensiones mínimas de 3 kV y 4,5 kV, respectivamente.

Además, todas las cajas deberán satisfacer un ensayo de choque, con onda, 1,2/50 μs, de 8 V, tensión que se aplicará entre partes activas y masas.

En la figura 16.15 se ven dos secciones de una caja general de protección colocada.

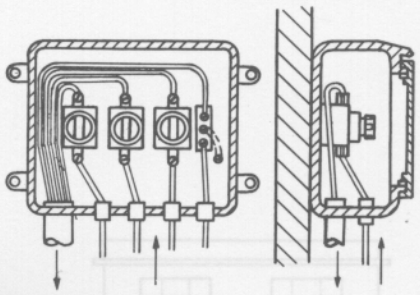


Fig. 16.14 Caja de acometida aérea.

16.5 Línea repartidora

Es la parte de la instalación que une la caja de acometida con las cajas de distribución de los usuarios.

La instalación de esta línea dependerá de la colocación de contadores.

16.5.1 *Edificios destinados a viviendas. Edificios comerciales, de oficinas o destinados a una concentración de industrias*

Cuando los contadores se coloquen de forma individual o se prevea su concentración por plantas, la línea repartidora se instalará siguiendo la caja

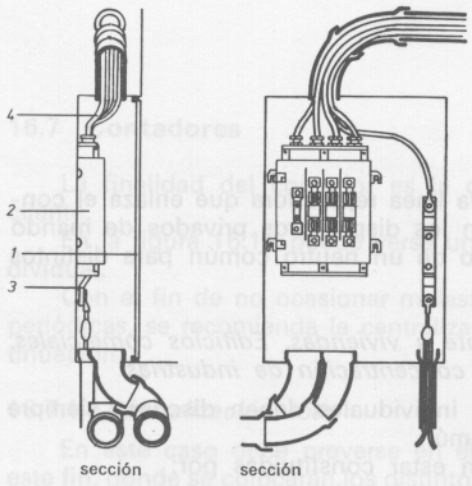


Fig. 16.15 Caja general de protección colocada: 1, puerta para nicho mural; 2, caja general de protección; 3, punto de puesta a tierra; 4, conductor aislado.

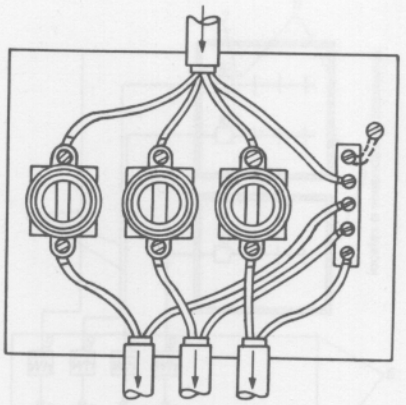


Fig. 16.16 Caja de derivación con tres fusibles y borne de neutro.

de escalera, utilizando preferentemente para ello las correspondientes a las escaleras de servicio.

En los rellanos de entrada a las viviendas o locales, se dispondrán cajas precintables de derivación, de las cuales partirán las derivaciones individuales que enlazarán con el contador o contadores de cada abonado.

En estas cajas de derivación podrán colocarse los fusibles de seguridad (fig. 16.16).

Cuando los contadores se instalen en forma concentrada, en locales o espacios adecuados a este fin, la línea repartidora enlazará la caja general de protección con el lugar de concentración de contadores.

La línea repartidora terminará en un embarrado o en unos bornes que quedarán protegidos contra cualquier manipulación indebida (fig. 16.17).

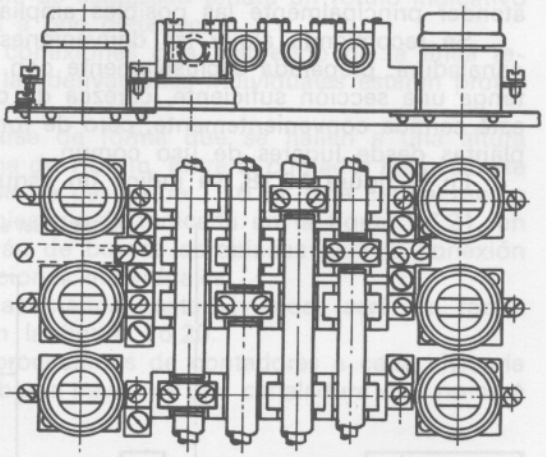


Fig. 16.17 Caja de distribución, embarrado de conexiones.

De este embarrado o estos bornes partirán las conexiones a los fusibles de seguridad de cada derivación individual. Cada derivación individual será totalmente independiente de las demás, no admitiéndose, en un mismo tubo ni en cajas de paso o derivación, circuitos correspondientes a distintos abonados.

En todos los casos, las líneas repartidoras deberán discurrir, siempre que sea posible, por lugares de uso común.

Las líneas repartidoras podrán estar constituidas por:

1.º Conductores aislados en el interior de tubos empotrados.
2.º Conductores aislados en el interior de tubos de montaje superficial.
3.º Canalizaciones prefabricadas.

Los tubos que se destinen a contener los conductores de una línea repartidora deberán ser de un diámetro nominal que permita ampliar en un cien por cien la sección de los conductores inicialmente instalados.

En el caso de líneas ascendentes, se recomienda alojar las líneas repartidoras en el interior de una canaladura, preparada exclusivamente con ese fin en la caja de escalera, que tenga una sección de 30 × 30 cm, carezca de cambios de dirección o rotación y esté cerrada convenientemente, pero de forma que sea practicable en todas las plantas desde lugares de uso común.

16.5.2 *Edificios destinados a un solo abonado*

En el caso de suministro a un solo abonado, como edificios públicos destinados a una industria específica, no existen líneas repartidoras; la caja general de protección enlazará directamente con el contador o contadores del abonado.

Cada contador enlazará con el conveniente dispositivo de mando y protección.

16.6 Derivaciones individuales

Derivación individual es la parte de la línea repartidora que enlaza el contador o contadores de cada abonado con los dispositivos privados de mando y protección, no permitiéndose el empleo de un neutro común para distintos abonados.

16.6.1 *Edificios destinados principalmente a viviendas. Edificios comerciales, de oficinas o destinados a una concentración de industrias*

En todos los casos las derivaciones individuales deben discurrir, siempre que sea posible, por lugares de uso común.

Las derivaciones individuales pueden estar constituidas por:

1.º Conductores aislados en el interior de tubos empotrados.
2.º Conductores aislados en el interior de tubos de montaje superficial.
3.º Canalizaciones prefabricadas.

Los tubos que se destinen a contener los conductores de una derivación individual deberán ser de un diámetro nominal que permita ampliar en un 50 % la sección de los conductores inicialmente instalados.

En las mencionadas condiciones de instalación, los diámetros nominales mínimos de los tubos en derivaciones individuales será de 23 mm, en el caso de edificios destinados principalmente a viviendas. En el caso de edificios comerciales destinados a una concentración de industrias, se instalarán dos tubos por abonado, que deberán ser como mínimo de 29 mm de diámetro.

En cualquier caso, es recomendable disponer de algún tubo de reserva desde la concentración de contadores hasta las viviendas o locales, para poder atender principalmente las posibles ampliaciones.

Se recomienda alojar las derivaciones individuales en el interior de una canaladura, preparada exclusivamente con este fin en la caja de escalera, que tenga una sección suficiente, carezca de cambios de dirección o rotaciones y esté cerrada convenientemente, pero de forma que sea practicable en todas las plantas desde lugares de uso común.

En la figura 16.18, se indica un esquema de derivación individual.

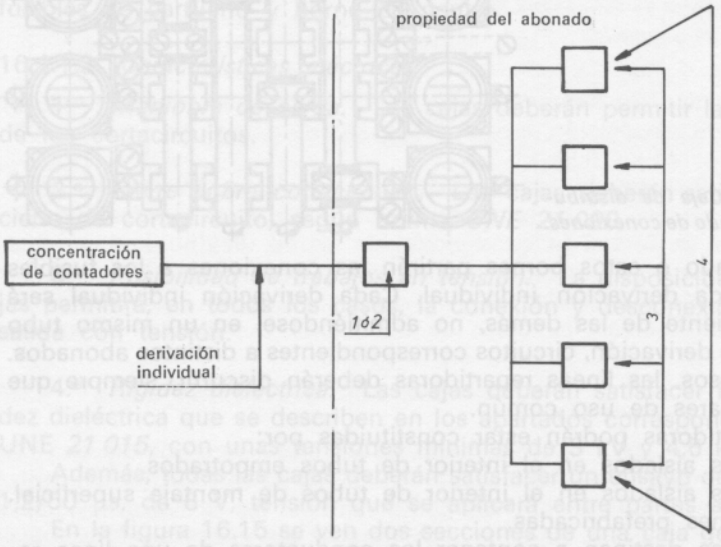


Fig. 16.18 Esquema de derivación individual: 1, interruptor control de potencia; 2, interruptor diferencial; 3, protección individual del abonado; 4, número de circuitos.

16.6.2 *Edificios destinados a un solo abonado*

En el caso de suministro a un solo abonado, como edificios públicos o destinados a una industria específica, no existen derivaciones individuales; la caja general de protección enlazará directamente con el contador o contadores del abonado.

Cada contador enlazará con el correspondiente dispositivo privado de mando y protección.

En viviendas unifamiliares se recomienda la instalación del contador en la caja de protección general.

16.7 Contadores

La finalidad del contador es la de registrar la energía consumida por el cliente.

En la figura 16.19 puede verse una instalación de contadores en forma individual.

Con el fin de no ocasionar molestias a los abonados y facilitar las lecturas periódicas, se recomienda la centralización de contadores que se detalla a continuación.

16.7.1 *Centralización total*

En este caso debe preverse en el edificio un local o espacio adecuado a este fin, donde se colocarán los distintos elementos necesarios para su instalación. En este local se colocarán los contadores correspondientes a las viviendas, a los servicios generales del edificio y a los locales comerciales.

El local utilizado será de fácil y libre acceso, como portal, recinto del portero o un departamento o habitación especialmente dedicado a ello, pero nunca en cuartos de calderas de calefacción, de concentración de contadores de agua, de maquinaria de ascensores o de otros servicios.

El local será de dimensiones suficientes para trabajar en él con garantía y comodidad.

En la figura 16.20 puede verse la instalación de contadores en forma concentrada en un solo punto.

Los contadores estarán protegidos por dispositivos que impidan toda manipulación en ellos y dispuestos en forma que se puedan leer sus indicaciones con facilidad; cada contador y fusible de seguridad tendrá un rótulo indicativo del abonado o derivación individual a que pertenece.

En esta forma de montaje las conexiones que, partiendo de la línea repartidora, alimentan a cada una de las derivaciones individuales estarán protegidas contra toda manipulación.

Los contadores deberán colocarse de forma que se hallen a una altura mínima del suelo de 0,50 m y máxima de 1,80 m. Entre el contador más saliente y la pared opuesta, deberá respetarse un pasillo de 1,10 m. Una centralización de este tipo con módulos precintables queda indicada en la figura 16.21, en la que los módulos 1 y 2 dispondrán de bornas apropiadas para la conexión de entradas y salidas de las derivaciones individuales.

La instalación eléctrica desde acometida hasta viviendas será, en forma esquemática, tal como se indica en la figura 16.20.

La subida de los conductores procedentes de contadores a cada vivienda o local se realizará por medio de tubos a través de una canaladura que no será utilizada por otros servicios.

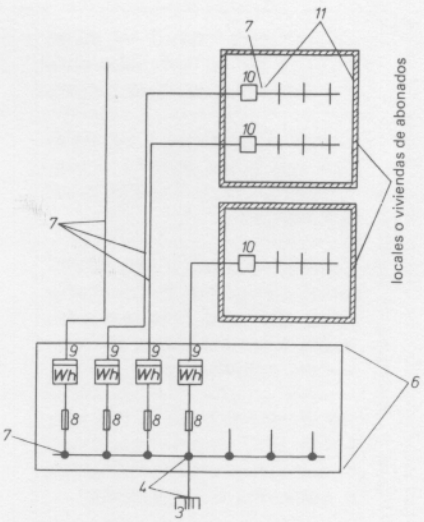


Fig. 16.20 Colocación de contadores en forma concentrada en un solo punto: 3, caja general de protección de la línea repartidora; 4, línea repartidora; 6, centralización de contadores; 7, derivación individual; 8, fusible de seguridad; 9, contador; 10, interruptor automático; 11, instalaciones interiores.

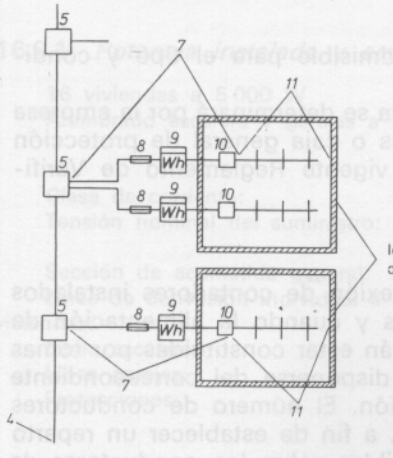


Fig. 16.19 Colocación de contadores en forma individual: 4, línea repartidora; 5, caja derivación; 7, derivación individual; 8, fusible de seguridad; 9, contador; 10, interruptor automático; 11, instalaciones interiores.

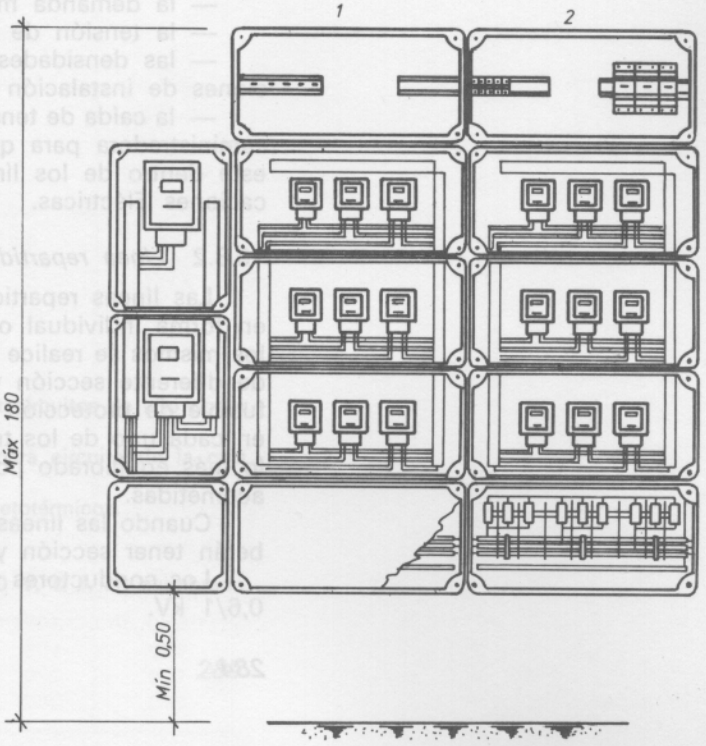
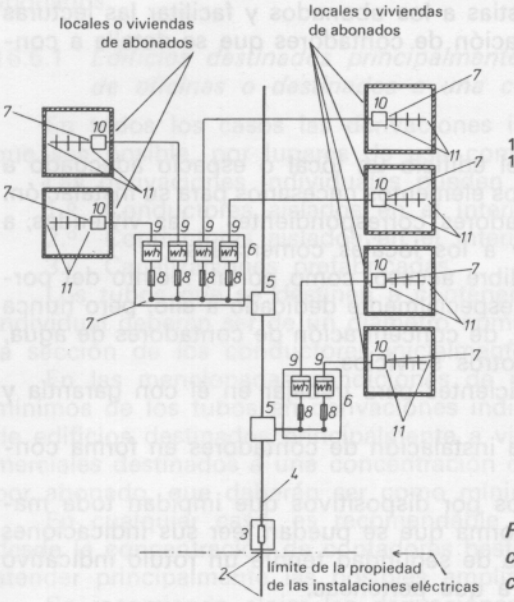


Fig. 16.21 Centralización total de contadores con módulos precintables.

16.7.2 *Centralización por plantas*

Según las viviendas del edificio, la centralización se podrá realizar por plantas, siguiendo todas las normas anteriormente indicadas.

En la figura 16.22 se puede ver la instalación eléctrica desde acometida hasta viviendas, en forma esquemática.



2 Acometida
3 Caja general de protección de la línea repartidora
4 Línea repartidora
5 Caja derivación
6 Centralización de contadores
7 Derivación individual
8 Fusible de seguridad
9 Contador
10 Interruptor automático
11 Instalaciones interiores

Fig. 16.22 Colocación de contadores en forma concentrada por plantas.

En este caso, los armarios con las unidades de embarrado y medida (contadores) estarán situados en los rellanos de cada planta. Dichos armarios serán precintables y por su interior deberá poder pasar la línea repartidora.

16.8 **Conductores**

Los tipos y características de los conductores empleados son:

16.8.1 *Acometidas*

El tipo y naturaleza de los conductores que deben emplearse será el correspondiente a un nivel de aislamiento 0,6/1 kV, cobre o aluminio.

En lo que se refiere a las secciones de los conductores, se calculará teniendo en cuenta:

— la demanda máxima prevista;
— la tensión de suministro;
— las densidades máximas de corriente admisible para el tipo y condiciones de instalación de los conductores;
— la caída de tensión máxima admisible. Esta se determinará por la empresa suministradora para que la tensión en las cajas o caja general de protección esté dentro de los límites establecidos por el vigente Reglamento de Verificaciones Eléctricas.

16.8.2 *Línea repartidora*

Las líneas repartidoras destinadas a la conexión de contadores instalados en forma individual o concentrados por plantas y cuando la alimentación de los mismos se realice por su parte inferior, podrán estar constituidas por tomas de diferente sección y composición, debiendo disponerse del correspondiente fusible de protección en cada cambio de sección. El número de conductores en cada uno de los tramos será el conveniente, a fin de establecer un reparto lo más equilibrado posible de las cargas previsibles sobre los conductores de acometidas.

Cuando las líneas repartidoras sean alimentadas por su parte superior, deberán tener sección y composición constante en todo su recorrido.

Los conductores utilizados serán de cobre con un nivel de aislamiento de 0,6/1 kV.

Para el cálculo de la sección de los conductores se tendrá en cuenta la máxima caída de tensión admisible, que será:

— para líneas repartidoras destinadas a contadores instalados en forma individual o concentrados, por planta: 1 por 100.

— para líneas repartidoras destinadas a contadores totalmente concentrados: 0,5 por 100.

Para la sección del conductor neutro, se tendrá en cuenta el máximo desequilibrio que pueda preverse, y su adecuado comportamiento, en función de las protecciones establecidas ante las sobrecargas y cortocircuitos que puedan presentarse.

16.8.3 *Derivaciones individuales*

El número de conductores vendrá fijado por el de fases necesarias para la utilización de los receptores del abonado, así como por la importancia del suministro.

La empresa distribuidora puede dar suministro monofásico hasta 7 kW en redes de 220 V y 9 kW en redes de 380 V. Para potencias superiores, el suministro será trifásico. Los conductores serán de cobre, y para el cálculo de su sección se tendrá en cuenta:

a) la demanda prevista en cada abonado;

b) la caída de tensión admisible, que será:

— contadores en forma individual o concentrados por planta: 0,5 por 100;

— contadores totalmente concentrados: 1 por 100.

Esta caída de tensión comprende desde el punto de arranque de la derivación individual, en una línea repartidora, hasta el punto de conexión del dispositivo privado de mando y protección.

16.8.4 *Tablas de intensidad máxima admisible*

A continuación, se exponen tablas para determinar la intensidad máxima admisible en función de la sección y el tipo de conductor, así como del tipo de canalización.

En la tabla 16.23 se entra con el tipo de aislamiento y se busca el tipo de canalización; el número de columna en que se encuentre nos indicará la columna correspondiente de las tablas 16.24 ó 16.25.

16.9 **Presupuesto de una acometida sencilla**

En este apartado se va a exponer el presupuesto de una instalación eléctrica para el suministro de energía a 16 viviendas. No se realizan los cálculos, ya que esto puede verse en el libro de Dibujo correspondiente a este curso, de esta misma Editorial, y sólo se verá el estudio económico.

16.9.1 *Potencia instalada y características eléctricas*

16 viviendas a 5 000 W		=	80 000 W
Alumbrado escalera y garajes a	700 W	=	1 400 W
	TOTAL:		81 400 W

Clase de corriente:	Alterna trifásica
Tensión nominal del suministro:	220 V entre fase 127 V entre fase y neutro
Sección de acometida general:	3,5 × 125 mm² en Al.
Línea de derivación individual a viviendas:	2 × 6 mm²
Línea escalera:	2 × 2,5 mm²
Línea garajes:	2 × 2,5 mm²
Protecciones:	Fusibles de seguridad con cortacircuitos de alto poder de ruptura. Cortacircuitos de alto poder para circuito de la caja repartidora. Interruptores limitadores magnetotérmicos. Interruptores diferenciales. Toma de tierra.
Equipos de medida:	Contadores monofásicos a 220 V, 5 A en alumbrado escalera y garaje.

Tabla 16.23 Intensidad máxima admisible para conductores aislados

Clase de canalización		*Columna aplicable de las tablas II y III*							
		1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
Al aire o directamente empotrados	Conductores hasta 1 kV, aislados con PVC o materiales análogos, instalados sobre apoyos.						3 unipolares agrupados		
	Conductores hasta 1 kV, aislados con goma butílica o materiales análogos, instalados sobre apoyos.							3 unipolares agrupados	
	Conductores hasta 750 V, aislados con goma, PVC o materiales análogos, fijados o adosados a las paredes o directamente empotrados.		1 tripolar	1 bipolar	3 unipolares agrupados	Unipolares distanciados			
	Conductores hasta 1 kV, con goma, PVC, papel impregnado o materiales análogos, fijados o adosados a las paredes.				1 tripolar	1 bipolar	3 unipolares agrupados	Unipolares distanciados	
	Conductores hasta 750 V y hasta 1 kV, con goma butílica, polietileno reticulado o materiales análogos, fijados o adosados a las paredes o directamente empotrados.					1 tripolar	1 bipolar	3 unipolares agrupados	Unipolares distanciados
Bajo tubo o conductos (1)	Conductores hasta 750 V, con goma, PVC o materiales análogos.	3 conductores unipolares	2 conductores unipolares		1 conductor unipolar (2)				
	Conductores hasta 1 kV, con goma, PVC, papel impregnado o materiales análogos.		3 conductores unipolares	2 conductores unipolares		1 conductor unipolar (2)			
	Conductores hasta 750 V y hasta 1 kV, con goma butílica, polietileno reticulado o material análogo.				3 conductores unipolares	2 conductores unipolares	1 conductor unipolar (2)		

(1) Cuando por un mismo tubo o conducto tengan que pasar más de 3 conductores normalmente recorridos por la corriente, se aplica a los valores de la columna correspondiente los coeficientes de reducción siguiente:

De 4 a 7 conductores 0,9
Más de 7 conductores 0,7

(2) Sólo aplicable para corriente continua con cualquier clase de tubos o para corriente alterna en tubos de material no ferromagnético.

Tabla 16.24 Intensidad máxima admisible, en A, para conductores de cobre aislados

Sección nominal conductor (mm²)	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
1	8,5	9,5	10,5	12	13	15,5	17	19
1,5	11	12	13	15	17	20	22	24
2,5	15	17	18	21	23	27	30	33
4	20	23	25	28	31	36	41	45
6	26	29	32	36	40	47	52	58
10	36	40	44	50	55	64	72	80
16	48	54	59	67	74	86	95	105
25	64	71	78	88	97	115	130	140
35	78	88	97	110	120	140	155	175
50	95	110	115	130	145	170	190	210
70	120	135	150	165	185	220	245	270
95	145	165	180	200	225	265	295	325
120	170	190	210	235	260	305	340	375
150	195	220	240	270	300	350	390	435
185	220	250	275	305	340	400	445	495
240	260	295	320	360	400	470	525	580

Tabla 16.25 Intensidad máxima admisible, en A, para conductores de aluminio aislados

Sección nominal conductor (mm²)	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
10	28	32	34	39	43	50	56	62
16	37	42	46	52	58	67	75	83
25	50	56	61	68	76	89	100	110
35	61	69	75	85	94	110	120	135
50	74	83	91	105	115	135	150	165
70	94	105	115	130	145	170	190	210
95	115	130	140	160	175	205	230	255
120	130	150	160	185	205	240	265	295
150	150	170	185	210	235	275	305	340
185	175	195	215	240	265	310	350	385
240	205	230	250	280	315	365	410	450

16.9.2 *Presupuestos parciales*

Número de unidades	*Concepto*	*Precio por unidad Ptas.*	*Total Ptas.*
	Acometida General		
55	Metros de cable subterráneo en aluminio P.V.C. de 3,5 × 120 mm²	300	16 500
16	Terminales aluminio para cable de 120 mm²	35	560
	SUMA:		17 060
	Armario de cortacircuitos		
1	Armario metálico precintable para centralización de cortacircuitos con sus regletas derivación, bornas, piezas aislantes, etc.	10 800	10 800
	Tornillería, canalizaciones, conductores, etc.		940
	SUMA:		11 740
	Armario de contadores		
16	Cofres montados con tapa transparente B.J.C. n.º 8 574.	1 683	26 928
	Angulares, tornillos, grapas, canalizaciones, etc.		2 000
	Conductores de unión desde armarios a contadores y salida de éstos		1 400
18	Interruptores de 25 A con cortacircuitos (c/c) de alto poder de ruptura	340	6 228
1	Interruptor magnetotérmico.		962
	Pequeño material.		600
	SUMA:		38 118
	Acometida a viviendas		
16	Interruptores magnetotérmicos.	962	15 392
226	Metros de cable d/c de 6 mm².	23,80	5 378,80
112	Metros de tubo P.V.C. articulado de ∅ 23 mm.	12,20	1 366,40
	Pequeño material.		400
	SUMA:		22 537,20

Nota. No se tienen en cuenta, en este presupuesto, la instalación interior de viviendas ni el alumbrado de escalera y servicios, debido a que se limita a la instalación de acometida.

Número de unidades	*Concepto*	*Precio por unidad Ptas.*	*Total Ptas.*
	Toma de tierra		
4	Picos toma de tierra de 2 m.	600	2 400
12	Metros de cable desnudo de cobre de 35 mm².	130	1 560
38	Metros de cable desnudo de cobre de 16 mm².	59,70	2 268,60
18	Metros de tubo *Emaplax* de 16 mm de diámetro.	15,20	273,60
5	Cajas derivación de 100 × 100 mm.	13	65
6	Bornas B.J.C. n.º 1 119.	37	222
	Pequeño material.		300
	SUMA:		7 089,20

16.9.3 *Gastos generales*

Mano de obra de la instalación	39 500
Imprevistos, 2 %	2 958
Beneficio Industrial, 6 %	8 875
SUMA:	51 333

16.9.4 *Presupuesto general*

Acometida general	17 060
Armario de cortacircuitos	11 740
Armario de contadores	38 118
Acometida a viviendas	22 573,20
Toma de tierra	7 089,20
Gastos generales	51 333
SUMA TOTAL:	147 913,40 Ptas.

Asciende este Presupuesto General a la expresada cantidad de CIENTO CUARENTA Y SIETE MIL NOVECIENTAS TRECE PESETAS, (40 cts.).

TEMAS QUE PUEDE DESARROLLAR EL ALUMNO

— Realizar una acometida para un edificio destinado a viviendas, de cuatro plantas y tres viviendas por planta. Contadores totalmente centralizados. Cálculo y presupuesto.

— Confeccionar mediante recortes o catálogos de dispositivos para acometidas un estudio gráfico de los materiales empleados en esta parte de la instalación.

CUESTIONARIO

16.1 Define qué es acometida.
16.2 Cuántas acometidas puede tener un edificio.
16.3 Cómo se pueden clasificar las acometidas.
16.4 Cuándo se realiza una acometida directa a C. T.
16.5 Qué fórmula da la sección en función de la potencia y longitud de la acometida (en general).
16.6 En qué partes se divide una instalación de enlace.
16.7 Qué misión tiene la caja general de protección.
16.8 Qué partes enlaza la línea repartidora.
16.9 ¿Se puede instalar una línea repartidora por medio de conductores al aire libre? ¿De qué forma se hará?
16.10 Cómo se instala la línea repartidora en un edificio destinado a un solo abonado.
16.11 Qué son las derivaciones individuales.
16.12 Cuáles son los puntos que se deben tener en cuenta a la hora de calcular la sección de los conductores de una acometida.
16.13 En líneas repartidoras, qué tipo de conductor debe empleafse.
16.14 Qué caídas de tensión se admiten en líneas repartidoras.
16.15 Las caídas de tensión citadas anteriormente, ¿entre qué puntos se miden?

BIBLIOGRAFIA

Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (1973).
ENCICLOPEDIA CEAC DE ELECTRICIDAD, *Instalaciones de Baja Tensión. Cálculo de líneas eléctricas,* Ediciones CEAC, S. A., Barcelona 1974.
SPITTA-SEIP, *Instalaciones eléctricas,* Dossat, S. A., Madrid 1974.
Normas NTE-IEB/1974 del Ministerio de la Vivienda.
Recomendaciones Técnicas sobre las instalaciones eléctricas en los edificios, E. R. Z., S. A.