

José García Trasancos

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
BIBLIOTECA DE CAMPUS DEL ACTUR

INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN MEDIA Y BAJA TENSIÓN

TERCERA EDICIÓN

THOMSON
★
PARANINFO

Instalaciones Eléctricas de Media y Baja Tensión
© José García Trasancos

Director Editorial y de Producción:
José Tomás Pérez Bonilla

Gerente Editorial Área Técnico-Vocacional:
M^a Teresa Gómez-Mascaraque Pérez

Editora de Producción:
Clara M^a de la Fuente Rojo

Producción Industrial:
Susana Pavón Sánchez

Editora de Desarrollo:
Mónica Elvira San Cristóbal

Asesor técnico:
Andrés Colmena Asensio

Diseño de cubierta:

Montytext

Preimpresión:

Montytext

Impresión:

Closas Orcóyen, S.L.
Polígono Igarsa
nave 21, 22, 23 y 24
Paracuellos de Jarama
(Madrid)

COPYRIGHT © 1999 International
Thomson Editores Spain
Paraninfo, S.A.
3ª edición, 2ª reimpresión, 2003

Magallanes, 25; 28015 Madrid
ESPAÑA
Teléfono: 91 4463350
Fax: 91 4456218
clientes@paraninfo.es
www.paraninfo.es

Impreso en España
Printed in Spain

ISBN: 84-283-2594-4
Depósito Legal: M-42.538-2002

(101/69/51)

Reservados los derechos para todos los países de lengua española. De conformidad con lo dispuesto en el artículo 270 del Código Penal vigente, podrán ser castigados con penas de multa y privación de libertad quienes reprodujeran o plagiaran, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica fijada en cualquier tipo de soporte sin la preceptiva autorización. Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de la cubierta, puede ser reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea éste electrónico, químico, mecánico, electro-óptico, grabación, fotocopia o cualquier otro, sin la previa autorización escrita por parte de la Editorial.

Otras delegaciones:

México y Centroamérica
Tel. (525) 281-29-06
Fax (525) 281-28-56
clientes@mail.internet.com.mx
clientes@thomsonlearning.com.mx
México, D.F.

Puerto Rico
Tel. (787) 758-75-80 y 81
Fax (787) 758-75-73
thomson@coqui.net
Hato Rey

Chile
Tel. (562) 531-26-47
Fax (562) 524-46-88
devonagr@netexpress.cl
Santiago

Costa Rica
EDISA
Tel./Fax (506) 235-89-55
edisacr@sci.racsa.co.cr
San José

Colombia
Tel. (571) 340-94-70
Fax (571) 340-94-75
clithomson@andinet.com
Bogotá

Cono Sur
Pasaje Santa Rosa, 5141
C.P. 141 - Ciudad de Buenos Aires
Tel. 4833-3838/3883 - 4831-0764
thomson@thomsonlearning.com.ar
Buenos Aires (Argentina)

República Dominicana
Caribbean Marketing Services
Tel. (809) 533-26-27
Fax (809) 533-18-82
cms@codetel.net.do

Bolivia
Librerías Asociadas, S.R.L.
Tel./Fax (591) 2244-53-09
libras@datacom-bo.net
La Paz

Venezuela
Ediciones Ramville
Tel. (582) 793-20-82 y 782-29-21
Fax (582) 793-66-66
tclibros@attglobal.net
Caracas

El Salvador
The Bookshop, S.A. de C.V.
Tel. (503) 243-70-17
Fax (503) 243-12-90
amorales@sal.gbm.net
San Salvador

Guatemala
Textos, S.A.
Tel. (502) 368-01-48
Fax (502) 368-15-70
textos@infovia.com.gt
Guatemala

ÍNDICE

PRÓLOGO XV

1. LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN 1

1.1. Clasificación de las líneas eléctricas según su tensión nominal	1
1.2. Producción transporte y distribución de energía eléctrica	2
1.3. Distribución de energía en corriente alterna	4
1.4. Cálculo de circuitos de corriente alterna	5
1.5. Sistema trifásico con cargas desequilibradas	10
1.6. Líneas de distribución abiertas y cerradas	17
1.7. Transmisión de información	18
1.8. Conductores utilizados en las líneas eléctricas	19
1.9. Designación de conductores aislados en media y baja tensión	21
<i>Problemas de recapitulación</i>	24

2. CÁLCULO ELÉCTRICO DE LÍNEAS 27

2.1. Cálculo de la sección de los conductores en las líneas de baja tensión en corriente alterna	27
2.2. Sección mínima de los conductores por criterio térmico	28
2.3. Cálculo de líneas por caída de tensión	38
2.4. Cálculo de líneas de baja tensión en corriente alterna con carga única	38
2.5. Cálculo de líneas de distribución abiertas de sección uniforme	42
2.6. Cálculo de líneas de distribución abiertas de sección no uniforme	46
2.7. Cálculo de líneas de sección uniforme, alimentadas por dos extremos a la misma tensión	51
2.8. Cálculo de líneas cerradas en anillo	53
2.9. Cálculo de líneas de B.T. por medio de ábacos	54
2.10. Cálculo de líneas de corriente continua	56
2.11. Cálculo eléctrico de líneas de media tensión	57
2.12. Caída de tensión en las líneas de media tensión	58
2.13. Potencia máxima de transporte	62
2.14. Pérdidas de potencia	62
2.15. Sección mínima de los conductores para soportar un cortocircuito	64
<i>Problemas de recapitulación</i>	66

3. LÍNEAS AÉREAS	69
3.1. Línea eléctrica aérea	69
3.2. Cables de aluminio acero utilizados en las líneas aéreas de distribución en media tensión.	69
3.3. Cálculo eléctrico de los conductores en las líneas aéreas de M.T. con cables de aluminio acero	70
3.4. Aisladores	73
3.5. Aislamiento suspendido en líneas de media tensión	73
3.6. Apoyos	74
3.7. Postes de hormigón en media y baja tensión	75
3.8. Apoyos metálicos de celosía para media tensión	77
3.9. Crucetas	78
3.10. Crucetas para apoyos de hormigón en media tensión	79
3.11. Crucetas para apoyos metálicos en media tensión	79
3.12. Herrajes	80
3.13. Antivibratorios	80
3.14. Empalmes y derivaciones en las líneas aéreas de media tensión	80
3.15. Cálculo mecánico de cables	81
3.16. Cálculo de la flecha	82
3.17. Ecuación del cambio de condiciones	84
3.18. Cálculos mecánicos de los conductores de la línea de M.T.	86
3.19. Cálculo de apoyos en las líneas de M.T.	93
3.20. Apoyos de alineación	94
3.21. Apoyos en ángulo	96
3.22. Apoyos de anclaje	98
3.23. Apoyos de fin de línea	99
3.24. Cargas verticales sobre los apoyos	100
3.25. Distancias de seguridad	100
3.26. Cables aislados de aluminio trenzados en haz utilizados en las líneas aéreas de baja tensión	101
3.27. Sujeciones y accesorios en las líneas aéreas de baja tensión	102
3.28. Empalmes y conexiones	103
3.29. Empalmes y derivaciones en las líneas aéreas de baja tensión	103
3.30. Derivaciones para acometidas	104
3.31. Tomas de tierra en las líneas de B.T.	105
3.32. Cálculo eléctrico en las líneas de distribución en baja tensión	105

3.33. Cálculo mecánico de cables aislados de aluminio trenzados en haz en líneas aéreas de baja tensión	107
3.34. Cálculo de los apoyos en líneas aéreas de baja tensión	110
3.35. Cruzamientos, proximidades y paralelismos en las líneas de B.T.	111
3.36. Cimentaciones	112
3.37. Puesta a tierra de los apoyos	113
3.38. Cimentación y elevación de apoyos	114
3.39. Tendido de cables	114
3.40. Tensado de cables	115
3.41. Instalación de líneas aéreas de media tensión con conductores de aluminio acero	115
3.42. Instalación de líneas aéreas de baja tensión	115
3.43. Señalización de seguridad en las líneas aéreas	116
3.44. Apertura de calles en zonas de arbolado para líneas de media tensión	116
<i>Problemas de recapitulación</i>	117
4. LÍNEAS SUBTERRÁNEAS	119
4.1. Líneas subterráneas	119
4.2. Cables subterráneos	119
4.3. Cables aislados subterráneos para media tensión	120
4.4. Cálculo de líneas subterráneas de media tensión	121
4.5. Empalme, derivación y terminal	123
4.6. Empalmes subterráneos en media tensión	123
4.7. Terminales de cables subterráneos para media tensión	124
4.8. Cables subterráneos para líneas de baja tensión	125
4.9. Cálculo de líneas subterráneas de baja tensión	126
4.10. Empalmes y derivaciones en B.T.	129
4.11. Registro o arqueta	129
4.12. Arquetas de registro para canalizaciones subterráneas de media y baja tensión	129
4.13. Armarios de urbanización	130
4.14. Excavación y preparación de la zanja	130
4.15. Señalización de líneas subterráneas	130
4.16. Rellenado de la zanja	130
4.17. Zanjas y canalizaciones en media tensión	131
4.18. Zanjas y canalizaciones en baja tensión	132

4.19. Tendido de cables	132
<i>Problemas de recapitulación</i>	133
5. APARAMENTA Y PROTECCIÓN	135
5.1 Aparamenta eléctrica	135
5.2. Parámetros característicos de los aparatos eléctricos	135
5.3. Interruptor	136
5.4. Interruptor automático	137
5.5. Interruptor magnetotérmico	138
5.6. Seccionador	139
5.7. Fusible	140
5.8. Fusibles de B.T.	141
5.9. Contactor	142
5.10. Protección de las instalaciones contra sobrecargas	145
5.11. Protección de las instalaciones contra cortocircuitos	147
5.12. Cálculo de la intensidad de cortocircuito	149
5.13. Elección de un interruptor automático	150
5.14. Selectividad en las protecciones contra sobreintensidades	150
5.15. Puesta a tierra	154
5.16. Partes de una puesta a tierra	154
5.17. Tipos de electrodos utilizados en las puestas a tierra	154
5.18. Cálculo aproximado de la resistencia de puesta a tierra de los electrodos	155
5.19. Soldadura aluminotérmica	156
5.20. Tensión de paso y tensión de contacto	157
5.21. Medida de una toma de tierra	158
5.22. Medida de la resistividad del terreno	158
5.23. Peligrosidad de la corriente eléctrica	159
5.24. Interruptor diferencial	160
5.25. Protección contra contactos directos	161
5.26. Protección contra contactos indirectos	163
5.27. Elección de un interruptor diferencial	165
5.28. Selectividad entre interruptores diferenciales	166
5.29. Protección de las líneas eléctricas	167
5.30. Relés de protección	167
5.31. Protección de las líneas contra sobrecargas	168
5.32. Protección de las líneas de distribución contra cortocircuitos	168

5.33. Sobretensiones en las líneas	169
5.34. Protección de las líneas de distribución contra sobretensiones	170
5.35. Medida del aislamiento de una línea	170
5.36. Medidas de seguridad para trabajos sin tensión	170
5.37. Trabajos en tensión	170
5.38. Determinación de averías en las líneas	171
5.39. Localización de averías en las líneas	171
5.40. Mantenimiento y averías en los sistemas de protección de las líneas	173
5.41. Mantenimiento de líneas aéreas	173
5.42. Mantenimiento y averías en las líneas subterráneas	174
<i>Problemas de recapitulación</i>	175
6. CENTROS DE TRANSFORMACIÓN	177
6.1. Centro de transformación	177
6.2. Régimen de neutro en el C.T.	178
6.3. Componentes del C.T.	178
6.4. Transformador	179
6.5. Protecciones propias del transformador	181
6.6. Protección contra defectos internos	181
6.7. Protección contra sobrecargas y cortocircuitos	182
6.8. Protección contra las sobretensiones	183
6.9. Protección contra incendios	184
6.10. Alumbrado, señalización y material de seguridad	184
6.11. Cuadro-general de baja tensión	184
6.12. Medidas	185
6.13. Cálculos eléctricos del centro de transformación	185
6.14. Centros de transformación intemperie sobre poste	191
6.15. Centros de transformación de interiores	198
6.16. Ventilación del centro de transformación	204
6.17. Verificaciones previas a la conexión de un centro de transformación	206
6.18. Maniobras de conexión y desconexión en el centro de transformación	206
6.19. Mantenimiento de los centros de transformación	207
6.20. Cálculo de la toma de tierra	207
<i>Problemas de recapitulación</i>	212

7. TARIFICACIÓN	215
7.1. Contador monofásico de inducción	215
7.2. Contadores trifásicos	215
7.3. Contadores de impulsos	217
7.4. Contadores electrónicos	217
7.5. Regletas de verificación	218
7.6. Coeficiente de facturación	218
7.7. Medida del factor de potencia con voltímetro, amperímetro y vatímetro	219
7.8. Medida del factor de potencia con fasímetro	219
7.9. Medida del factor de potencia con analizador de redes	220
7.10. Medida del factor de potencia con contadores de energía activa y reactiva	220
7.11. Tarifas eléctricas	221
7.12. Tarifas eléctricas en baja tensión	221
7.13. Potencia de facturación	222
7.14. Complemento por discriminación horaria	224
7.15. Complemento por energía reactiva	227
7.16. Complemento por estacionalidad	228
7.17. Complemento por interrumpibilidad	229
7.18. Otros conceptos de la facturación	229
7.19. Tarifas eléctricas en media tensión	232
7.20. Medida en B.T. y facturación en A.T.	235
7.21. Corrección del factor de potencia	236
7.22. Cálculo de la potencia reactiva	238
7.23. Instalación de la batería de condensadores	240
<i>Problemas de recapitulación</i>	242
8. INSTALACIONES DE ENLACE E INTERIORES	245
8.1. Instalaciones de enlace	245
8.2. Acometida en B.T.	245
8.3. Acometida aérea	246
8.4. Acometida subterránea	246
8.5. Acometida mixta	246
8.6. Caja general de protección y bases tripolares verticales	247
8.7. Línea repartidora	248
8.8. Equipo de medida	249

8.9. Derivación individual	249
8.10. Cuadro privado de mando y protección	252
8.11. Instalaciones interiores	252
8.12. Canalizaciones eléctricas en B.T.	252
8.13. Proceso de trabajo en una instalación empotrada bajo tubo	253
8.14. Instalaciones domésticas	253
8.15. Instalaciones en el interior de la vivienda	255
8.16. Instalación de ascensor	259
8.17. Instalaciones en edificios singulares	264
8.18. Instalaciones de emergencia	265
8.19. Instalaciones industriales	271
8.20. Instalaciones eléctricas de seguridad contra incendios	282
8.21. Instalaciones temporales y de obras	283
8.22. Instalación de pararrayos	284
8.23. Puesta a tierra en edificios	285
8.24. Conductores de puesta a tierra	286
8.25. Número de picas necesarias para la instalación de puesta a tierra en un edificio	286
8.26. Número de picas necesarias para la instalación de puesta a tierra provisional	288
8.27. Proceso a seguir en la instalación de electrodos	288
8.28. Control de la realización de la instalación de puesta a tierra	289
8.29. Prueba de funcionamiento de la instalación de puesta a tierra	290
8.30. Mantenimiento de las puestas a tierra	290
8.31. Puesta en servicio e inspección de las instalaciones eléctricas de B.T.	290
<i>Problemas de recapitulación</i>	292
9. ILUMINACIÓN	295
9.1. Luz	295
9.2. Fuentes de luz eléctrica	295
9.3. Magnitudes luminosas y unidades	296
9.4. Características y propiedades de las lámparas	297
9.5. Lámparas de incandescencia convencionales	298
9.6. Lámparas de incandescencia halógenas	299
9.7. Lámparas o tubos fluorescentes	299
9.8. Lámparas de vapor de mercurio alta presión	301

9.9. Lámparas de luz mezcla	302
9.10. Lámparas de halogenuros metálicos	302
9.11. Lámparas de vapor de sodio baja presión	303
9.12. Lámparas de vapor de sodio alta presión	303
9.13. Lámparas de inducción	304
9.14. Luminarias	304
9.15. Clases de protección eléctrica	305
9.16. Índices de protección de las luminarias	305
9.17. Leyes fundamentales de la luminotecnia	306
9.18. Diagramas de iluminación	308
9.19. Alumbrado de interiores	311
9.20. Cálculo de un alumbrado de interior	311
9.21. Rendimiento de la iluminación	314
9.22. Factor de conservación	315
9.23. Control y regulación de las instalaciones de alumbrado de interiores	316
9.24. Alumbrado exterior	318
9.25. Cálculo del alumbrado de exteriores por el método del flujo luminoso	318
9.26. Luminarias para el alumbrado exterior	321
9.27. Curvas de utilización	321
9.28. Alimentación y control de las instalaciones de alumbrado de exteriores	323
9.29. Alumbrado con proyectores	326
9.30. Mantenimiento de las instalaciones de alumbrado	328
<i>Problemas de recapitulación</i>	329
A. CORRIENTE ALTERNA	331
A.1. Corriente alterna	331
A.2. Período, frecuencia y alternancia de la corriente alterna	331
A.3. Valores característicos de las magnitudes alternas	331
A.4. Representación gráfica de una magnitud alterna senoidal	332
A.5. Circuitos simples de corriente alterna	333
A.6. Circuito serie de corriente alterna	335
A.7. Construcciones gráficas	336
A.8. Principio de separación de potencias	337
A.9. Circuito paralelo de corriente alterna	337
A.10. Resonancia	338
A.11. Corriente alterna trifásica	339

A.12. Representación gráfica de magnitudes trifásicas	340
A.13. Conexión en estrella	340
A.14. Conexión en triángulo	341
A.15. Potencia en corriente alterna trifásica	342
A.16. Cálculo de un circuito trifásico equilibrado	342
A.17. Aplicación de los números complejos al cálculo de circuitos en corriente alterna senoidal	343
<i>Problemas resueltos</i>	344
<i>Problemas propuestos</i>	350
B. TRANSFORMADOR	353
B.1. Transformador	353
B.2. Constitución y principio de funcionamiento de un transformador monofásico	353
B.3. Transformador ideal	354
B.4. Transformador real	355
B.5. Caída de tensión en el transformador	358
B.6. Corriente de cortocircuito	359
B.7. Transformador trifásico	359
B.8. Conexión en paralelo de transformadores	361
B.9. Autotransformador	362
B.10. Transformadores de medida	363
<i>Problemas resueltos</i>	367
<i>Problemas propuestos</i>	372
C. PROYECTO TÉCNICO	375
C.1. Proyecto técnico	375
C.2. Fases de un proyecto técnico	375
C.3. Documentos del proyecto técnico	377
C.4. Tramitación de los proyectos técnicos	382
C.5. Estudio previo del proyecto de una instalación eléctrica de baja tensión	383
D. SÍMBOLOS GRÁFICOS	385
BIBLIOGRAFÍA	391

PRÓLOGO

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZ
BIBLIOTECA DE CAMPUS DEL ACTU

En el estudio de la tecnología, junto con el conocimiento manipulativo de una profesión, los procesos de análisis y síntesis son fundamentales para que este conocimiento no sea un conjunto de recetas junto a una descripción de aparatos. Se pretende en este libro que los alumnos adquieran conceptos claros de las instalaciones eléctricas de media y baja tensión, que permitan su aplicación en cálculos, que deben completar usando e interpretando catálogos de casas comerciales, proyectos tipo y programas informáticos.

Por su contenido está dirigido a los alumnos de ciclos formativos de electricidad, especialmente al ciclo superior de Instalaciones Electrotécnicas. Puede, sin embargo, ser utilizado también en el ciclo medio de Equipos e Instalaciones Electrotécnicas atendiendo más a su parte descriptiva y conceptual que a los cálculos.

Es útil también para técnicos instaladores electricistas y para proyectistas de estas instalaciones; así como para los alumnos que acceden a estudios técnicos sin pasar por la formación profesional.

El libro consta de nueve capítulos y cuatro apéndices.

El primer Capítulo, "Líneas de distribución," trata de la distribución de energía eléctrica en corriente alterna y del cálculo de circuitos monofásicos y trifásicos.

El segundo Capítulo, "Cálculo eléctrico de líneas," abarca el cálculo eléctrico en baja y media tensión de las líneas eléctricas, por caída de tensión, pérdida de potencia y cortocircuito.

Los Capítulos 3 y 4, "Líneas aéreas" y "Líneas subterráneas," estudian la constitución de estas líneas en baja y media tensión, su cálculo con los conductores más utilizados, incluyendo el cálculo mecánico de conductores y apoyos en las líneas aéreas.

El Capítulo 5, "Aparataje y protección," trata de los aparatos utilizados para maniobra y protección de las líneas, averías, mantenimiento de las mismas y cálculo de las protecciones.

En el Capítulo 6, "Centros de transformación," se estudia la constitución, cálculos, maniobra y mantenimiento en los centros de transformación de intemperie e interiores.

El Capítulo 7, "Tarificación," se ocupa de la medida de la energía eléctrica, tarifas en baja y media tensión, así como de la mejora del factor de potencia.

El Capítulo 8, "Instalaciones de enlace e interiores," sobre la constitución y cálculo de las instalaciones de enlace, además de las instalaciones domésticas, singulares e industriales en el interior de edificios.

El Capítulo 9, "Iluminación," trata de las fuentes de luz, constitución, mantenimiento y cálculo de alumbrados de interiores y exteriores.

Cada capítulo consta de teoría y problemas de aplicación, resueltos unos, y con los resultados indicados, otros. Al final de cada capítulo, y como síntesis de lo tratado en él, se plantean problemas de recapitulación con los resultados.

El Apéndice A, "Corriente alterna," es un resumen de las leyes y fórmulas de corriente alterna monofásica y trifásica. Completa el capítulo primero para todos los que necesiten conocer la teoría de circuitos de corriente alterna, antes de abordar los problemas de aplicación. Consiste en un resumen teórico, con problemas resueltos y otros para resolver con los resultados especificados.

El Apéndice B, "Transformador," es un resumen de la constitución y funcionamiento de esta máquina eléctrica. Completa el Capítulo 6, para todos los que necesiten conocer la teoría del transformador, antes de abordar el estudio de los centros de transformación. Consiste en un resumen teórico, con problemas resueltos y otros para resolver con indicación de los resultados.

El Apéndice C, "Proyecto técnico," consiste en unas indicaciones sobre el proyecto técnico en general, análisis de los documentos de que consta y estudio previo para la realización del proyecto de una instalación eléctrica.

El Apéndice D, "Símbolos gráficos," es un cuadro de símbolos eléctricos, que contiene todos los utilizados en el libro.

Quiero agradecer la colaboración de todas aquellas empresas que me facilitaron información sobre instalaciones eléctricas, especialmente a Unión Fenosa, por permitirme utilizar datos y gráficos de sus unidades constructivas, de líneas eléctricas y centros de transformación.

Mi agradecimiento también a todas las personas que desinteresadamente me han ayudado en la confección de este libro, especialmente a los ingenieros técnicos industriales, D. Antonio Picado Rodríguez y D. Arcadio Seco Falcón, que revisaron los capítulos de Líneas aéreas y Tarificación, y D. José Carlos Pérez Fernández, que hizo una revisión de los problemas que aparecen en el libro y una atenta corrección del texto.

EL AUTOR



LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN

1.1. CLASIFICACIÓN DE LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS SEGÚN SU TENSIÓN NOMINAL

Tensión nominal de una instalación o aparato eléctrico es el valor de tensión asignado y al cual se refieren sus características.

Tensión nominal en una línea trifásica de corriente alterna es el valor convencional de la tensión eficaz entre fases de la línea. La frecuencia de la corriente alterna normalizada en Europa es de 50 Hz.

La clasificación de las líneas según su tensión es la siguiente:

- 1) *Líneas de baja tensión (B.T.):* Son las que tienen una tensión nominal menor o igual a 1 000 V para corriente alterna y 1 500 V para corriente continua, según el artículo 3º del Reglamento Electrotécnico para B.T. (R.B.T.).

Las tensiones nominales normalizadas son:

Tabla 1.1

CONTINUA	MONOFÁSICA	TRIFÁSICA
110 V 220 V	110 V 220 V	127 V entre fase y neutro. 220 V entre fase y neutro. 220 V entre fases. 380 V entre fases. 440 V entre fases.

Se consideran como preferentes las tensiones de 380 V entre fases y 220 V entre fase y neutro (artículo 4º del R.B.T.).

- 2) *Líneas de alta tensión (A.T.):* Son las líneas que tienen una tensión nominal mayor de 1 000 V. Se clasifican en tres categorías, según el artículo 3 del Reglamento de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión (R.L.A.T.):

- Líneas de primera categoría. Son de tensión nominal mayor de 66 kV.
- Líneas de segunda categoría. De tensión nominal comprendida entre 30 kV y 66 kV, ambas inclusive.
- Líneas de tercera categoría. De tensión nominal igual o mayor de 1 kV e inferior a 30 kV.

Según el artículo 2 del R.L.A.T. se recomiendan las tensiones siguientes: 20 - 66 - 132 - 220 y 380 kV.

Las empresas productoras y distribuidoras de energía eléctrica dividen las líneas de Alta Tensión de la forma siguiente:

- Media Tensión (M.T.). De tensión nominal igual o mayor de 1 kV hasta 50 kV.
- Alta Tensión (A.T.). De tensión nominal superior a 50 kV hasta 300 kV.
- Muy Alta Tensión (M.A.T.). De tensión nominal superior a 300 kV e inferior a 800 kV.
- Ultra Alta Tensión (U.A.T.). De tensión igual o superior a 800 kV.

Las líneas de transmisión de energía en A.T. suelen ser aéreas, y para distribución en M.T. las líneas son aéreas o subterráneas.

1.2. PRODUCCIÓN TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La energía eléctrica se produce (fig. 1.1) en la central generadora (1) a una tensión que no suele sobrepasar los 25 kV. En la subestación elevadora (2) se eleva a tensión de transporte (380 kV, 220 kV o 132 kV) para la línea (3) que transporta la energía a alta tensión (A.T.) hasta la estación reductora (4), que distribuye la tensión para líneas de 2ª o 3ª categoría. La línea de distribución (5) lleva la energía a centros de gran consumo o a centros de transformación (6) que disminuyen la tensión a 380 V y, con las líneas de distribución (7) en baja tensión (B.T.), se suministra energía a los abonados, que conectan a la línea mediante acometidas (8).

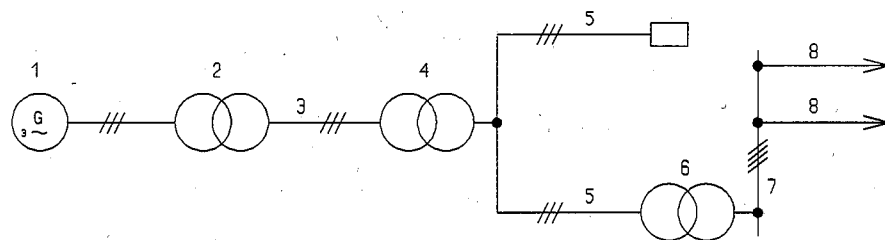


Fig. 1.1

La energía eléctrica producida en la central puede ser distribuida directamente (fig. 1.2) cuando la utilización es próxima a la central generadora (1). En este caso la energía producida a M.T. es utilizada directamente (2) o mediante centro de transformación (3), distribuida en B.T. (4).

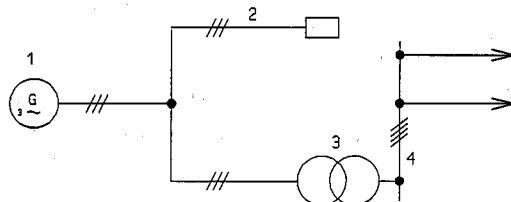


Fig. 1.2

La elección de tensión de una línea depende de características técnicas y económicas diversas:

- Aislamiento de las máquinas y aparatos. El transformador es una máquina eléctrica estática fácilmente aislable, pero el alternador que genera la corriente alterna, al tener partes móviles, tiene más dificultad de aislamiento y produce tensiones como máximo a 30 kV.
- Economía. A igualdad de potencia aparente, la intensidad de corriente disminuye al aumentar la tensión. Por ello es conveniente para el transporte de energía eléctrica que la tensión sea lo más elevada posible, lo que disminuye la sección necesaria de los conductores al pasar por ellos menor intensidad de corriente.
- Seguridad. La seguridad contra los peligros de la corriente eléctrica aumenta al disminuir la tensión, por lo que se usan tensiones bajas en la utilización. La mayoría de los aparatos eléctricos funcionan en baja tensión, por lo que es necesario, mediante transformadores, reducir la tensión para la utilización de la energía eléctrica.

Las instalaciones eléctricas están generalmente alimentadas en derivación, a tensión prácticamente constante.

Las instalaciones alimentadas en serie o a corriente constante sólo se utilizan en casos bien determinados, como instalaciones de electrólisis o en algún tipo de iluminación.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN¹

1.2-1. Se desea construir una línea eléctrica trifásica para transportar a M.T. una potencia de 2 MVA. Calcular:

- Intensidad de línea si la tensión de línea es de 20 kV.
- Sección mínima del conductor de cobre necesario si se admite una densidad de corriente de 3 A/mm².
- Intensidad de línea si la tensión de línea es de 6 kV.
- Sección mínima del conductor de cobre necesario si se admite la misma densidad de corriente que para la línea de 20 kV.
- Máxima potencia aparente a transportar con una sección de 70 mm² y densidad de corriente máxima de 40 A/mm².

a) La potencia aparente $S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$; de donde la intensidad de línea.

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3} V_L} = \frac{2 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20\,000} = 57,74 \text{ A}$$

b) La densidad de corriente $\delta = \frac{I_L}{s}$. La sección mínima $s = \frac{I_L}{\delta} = \frac{57,74}{3} = 19,25 \text{ mm}^2$

¹Para aplicar las fórmulas de los circuitos fundamentales de corriente alterna, consultar el Apéndice A: "Corriente alterna"

c) La intensidad de línea: $I_L = \frac{S}{\sqrt{3} V_L} = \frac{2 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 192,45 \text{ A}$

d) La sección mínima: $s = \frac{I_L}{\delta} = \frac{192,45}{3} = 64,15 \text{ mm}^2$

e) La máxima intensidad de corriente: $I_{L\text{máx}} = s \cdot \delta = 70 \cdot 4 = 280 \text{ A}$

La máxima potencia aparente: $S_{\text{máx}} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_{L\text{máx}} = \sqrt{3} \cdot 20000 \cdot 280 = 9\,699\,485 \text{ VA}$

1.2-2. En una línea trifásica de distribución en M.T. se utiliza un conductor de aluminio de sección nominal 120 mm^2 . Si se admite una densidad de corriente de 3 A/mm^2 . Calcular:

- Máxima intensidad de corriente que puede circular por la línea.
- Máxima potencia aparente a transportar si la tensión de línea es de 20 kV .

Solución: a) 360 A ; b) $12,47 \text{ MVA}$

1.3. DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA EN CORRIENTE ALTERNA

En la construcción de una red de distribución de energía eléctrica se pretende conseguir:

- Buena calidad de servicio: mantenimiento de la tensión y frecuencia, con continuidad de servicio.
- Posibilidad de soportar aumento de consumo.
- Construcción simple y económica.

La distribución de energía eléctrica se realiza de varias formas:

- Monofásica, a dos conductores (fig. 1.3). para alimentación de reducido consumo en B.T.
- Trifásica, a tres conductores (fig. 1.4). Se utiliza para distribución en A.T. y en B.T. (En este caso solamente para receptores trifásicos equilibrados, con las tres fases iguales).

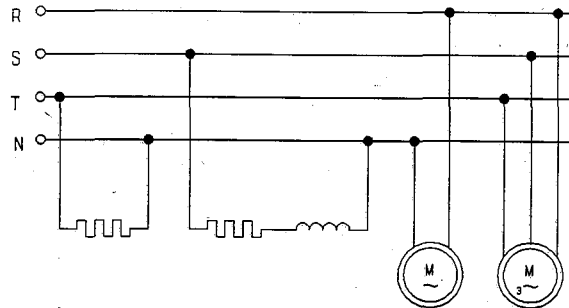


Fig. 1.5

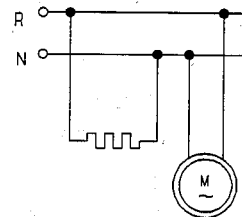


Fig. 1.3

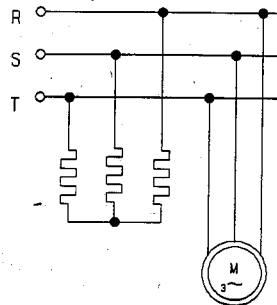


Fig. 1.4

- Trifásica a cuatro conductores (fig. 1.5). Se utiliza en B.T. para receptores monofásicos y trifásicos, obteniéndose así dos tensiones: la tensión de fase V_f (entre fase y neutro) y la de línea V_L (entre dos fases).

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

1.4. CÁLCULO DE CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA

El cálculo directo de circuitos de corriente alterna puede realizarse por los siguientes métodos:

- Método gráfico o vectorial.* Utilizando los vectores representativos de las magnitudes eléctricas de tensión o intensidad, siendo necesario considerar como origen de fases el vector de tensión o intensidad de corriente común a todos los receptores.
- Método simbólico o de números complejos.* Utilizando números complejos para el análisis de la red, aplicando las leyes de Ohm y Kirchhoff.
- Método de separación de potencias o de Boucherot.* Considerando que en una red de corriente alterna de frecuencia constante se conservan por separado las potencias activas y reactivas.

En el cálculo de redes de corriente alterna trifásica se consideran dos casos:

- Sistema trifásico equilibrado.* En un sistema equilibrado o simétrico las magnitudes que representan las tensiones y las intensidades tienen el mismo valor y están desfasadas entre sí un tercio de periodo o 120° . Como las tres fases son idénticas puede realizarse el cálculo por fase igual que en una distribución monofásica.
- Sistema trifásico desequilibrado.* Se calcula por separado cada fase. En la práctica se consideran las tensiones de línea equilibradas y desequilibradas las cargas.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

1.4-1. A una línea monofásica de 220 V , 50 Hz se conectan los receptores siguientes (fig. 1.6):

- Una bobina de resistencia 10Ω y reactancia 4Ω .
- Una estufa de resistencia 110Ω .
- Un motor monofásico de potencia $0,75 \text{ CV}$, factor de potencia $0,8$ y rendimiento 80% a plena carga.

Calcular por los métodos, gráfico, simbólico y de separación de potencias, la intensidad total y el factor de potencia total.

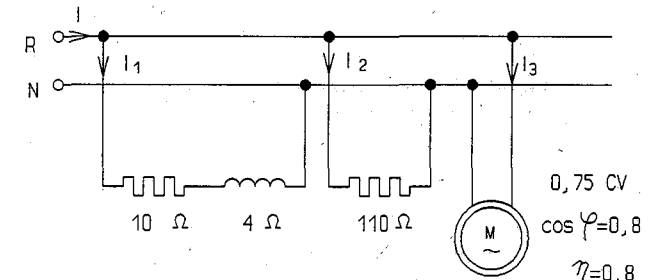


Fig. 1.6

1) Método gráfico.

a) Cálculo de las intensidades de los receptores.

En el primer receptor: $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{10^2 + 4^2} = 10,77 \Omega$

$I_1 = \frac{220}{10,77} = 20,43 \text{ A}$; $\cos\varphi_1 = \frac{10}{10,77} = 0,9285$; $\varphi_1 = 21,8^\circ$; con retraso de la intensidad respecto a la tensión.

En el segundo receptor: $I_2 = \frac{220}{110} = 2 \text{ A}$; $\cos\varphi_2 = 1$; $\varphi_2 = 0^\circ$

En el tercer receptor:

La potencia absorbida por el motor a plena carga:

$$P_{ab} = \frac{P_u}{\eta} = \frac{0,75 \cdot 736}{0,8} = 690 \text{ W}$$

La intensidad absorbida:

$$I_3 = \frac{P_{ab}}{V \cos\varphi_3} = \frac{690}{220 \cdot 0,8} = 3,92 \text{ A}; \quad \cos\varphi_3 = 0,8; \quad \varphi_3 = 36,87^\circ; \text{ con retraso}$$

de la intensidad respecto a la tensión, porque el motor siempre es inductivo.

b) Cálculo de la intensidad total.

Considerando la tensión horizontal y dibujando los vectores de las intensidades con sus desfases correspondientes (fig. 1.7), se calcula la intensidad total I y su desfase respecto a la tensión.

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

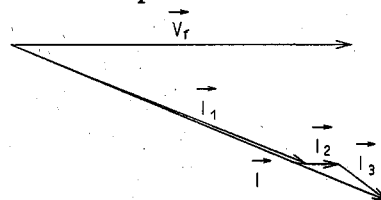


Fig. 1.7

2) Método simbólico.

Utilizando números complejos y considerando el vector tensión horizontal y como origen de fase.

$$I_1 = 20,43 \angle -21,8^\circ = (18,97 - 7,59j) \text{ A}$$

$$I_2 = 2 \angle 0^\circ = (2 + 0j) \text{ A}$$

$$I_3 = 3,92 \angle -36,87^\circ = (3,14 - 2,35j) \text{ A}$$

La intensidad total: $I = I_1 + I_2 + I_3 = 24,11 - 9,94j = 26,1 \angle -22,41^\circ \text{ A}$

3) Método de separación de potencias.

En el primer receptor:

$$P_1 = VI_1 \cos\varphi_1 = 220 \cdot 20,43 \cdot 0,9285 = 4173 \text{ W}$$

$$Q_1 = VI_1 \sin\varphi_1 = 220 \cdot 20,43 \cdot 0,3713 = 1669 \text{ VAR}$$

En el segundo receptor:

$$P_2 = VI_2 \cos\varphi_2 = 220 \cdot 2 \cdot 1 = 440 \text{ W}$$

$$Q_2 = 0 \text{ VAR}$$

En el tercer receptor:

$$P_3 = 690 \text{ W}$$

$$Q_3 = VI_3 \sin\varphi_3 = 220 \cdot 3,92 \cdot 0,6 = 517 \text{ VAR}$$

Las potencias activas y reactivas totales:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 5303 \text{ W}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 2186 \text{ VAR}$$

La potencia aparente: $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{5303^2 + 2186^2} = 5736 \text{ VA}$

La intensidad total: $I = \frac{S}{V} = \frac{5736}{220} = 26,1 \text{ A}$

El factor de potencia total: $\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{5303}{5736} = 0,9245$

1.4-2. A una línea monofásica de 220 V, 50 Hz se conectan los receptores siguientes:

- Una bobina de resistencia 10Ω y reactancia 40Ω .
- Un receptor de resistencia 40Ω y reactancia inductiva 30Ω .

Calcular:

- Impedancia e intensidad de primer receptor.
- Impedancia e intensidad del segundo receptor.
- Intensidad y factor de potencia total.

Solución: a) $41,23 \Omega$, $5,34 \text{ A}$; b) 50Ω , $4,4 \text{ A}$; c) $9,19 \text{ A}$, $0,52$

1.4-3. A una línea monofásica de 220 V, 50 Hz se conectan los receptores siguientes:

- Un receptor que consume 2 kW con factor de potencia unidad.
- Un receptor que consume $2,5 \text{ kW}$ con factor de potencia $0,8$ inductivo.
- Un receptor que consume $1,5 \text{ kW}$ con factor de potencia $0,6$ inductivo.

Calcular:

- Potencia activa y potencia reactiva total.
- Intensidad y factor de potencia total.

Solución: a) 6 kW , $3,875 \text{ kVAR}$; b) $32,47 \text{ A}$, $0,84$

1.4-4. A una línea monofásica de 220 V, 50 Hz se conectan los receptores siguientes:

- Una bobina de resistencia despreciable y reactancia 10Ω .
- Un receptor de resistencia 11Ω y reactancia despreciable.
- Un condensador de reactancia 100Ω .

Calcular la potencia activa que consumen.

Solución: $4,4 \text{ kW}$

1.4-5. A una línea monofásica de 220 V, 50 Hz se conectan los receptores siguientes:

- Un receptor de impedancia $Z_1 = 20 \angle -30^\circ \Omega$.
- Un receptor de impedancia $Z_2 = 40 \angle 0^\circ \Omega$.
- Un receptor que consume una potencia de 2 kW con factor de potencia $0,8$ inductivo.

Calcular la intensidad y factor de potencia total.

Solución: $24,16 \text{ A}$; $0,998$

1.4-6. A una línea trifásica de 380 V , 50 Hz , se conectan los receptores que indica la figura 1.8:

- Receptor en estrella de 4Ω de resistencia cada rama.

- Motor trifásico de 4 kW, factor de potencia 0,8 y rendimiento a plena carga 88,9%.
- Receptor conectado en triángulo con una bobina de resistencia 4Ω y reactancia 3Ω por rama.

Calcular por los métodos, gráfico, simbólico y de separación de potencias, la intensidad total por fase y el factor de potencia de la instalación.

1) Método gráfico.

a) Cálculo de las intensidades de fase de los receptores.

En el primer receptor: $I_1 = I_{f1} = \frac{V_{f1}}{Z_{f1}} = \frac{380/\sqrt{3}}{4} = 54,85 \text{ A}$; $\cos \varphi_1 = 1$; $\varphi_1 = 0^\circ$

En el segundo receptor, la potencia absorbida por el motor a plena carga:

$$P_{ab} = \frac{P_u}{\eta} = \frac{4000}{0,889} = 4499 \text{ W}$$

La intensidad absorbida:

$$I_2 = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi_2} = \frac{4499}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 8,54 \text{ A}; \quad \cos \varphi_2 = 0,8; \quad \varphi_2 = 36,87^\circ$$

En el tercer receptor:

$$I_{f3} = \frac{V_{f3}}{Z_{f3}} = \frac{380}{\sqrt{4^2 + 3^2}} = 76 \text{ A}$$

$$I_3 = 76 \cdot \sqrt{3} = 131,64 \text{ A}; \quad \cos \varphi_3 = \frac{4}{\sqrt{4^2 + 3^2}} = 0,8; \quad \varphi_3 = 36,87^\circ$$

b) Cálculo de la intensidad total.

Considerando la tensión horizontal y dibujando los vectores de las intensidades con sus desfases correspondientes (fig. 1.9), se calcula la intensidad total I y su desfase respecto a la tensión.

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

2) Método analítico.

Utilizando números complejos y considerando el vector tensión de fase horizontal y como origen de fase en cada caso.

$$I_1 = 54,85 \angle 0^\circ = (54,85 + 0j) \text{ A}$$

$$I_2 = 8,54 \angle -36,87^\circ = (6,83 - 5,12j) \text{ A}$$

$$I_3 = 131,64 \angle -36,87^\circ = (105,31 - 78,98j) \text{ A}$$

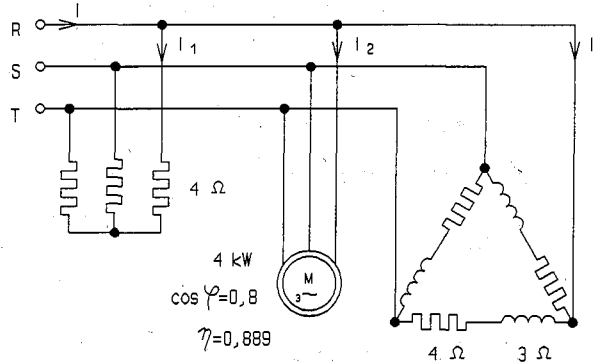


Fig. 1.8

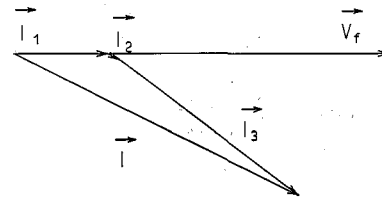


Fig. 1.9

La intensidad total: $I = I_1 + I_2 + I_3 = 167 - 84,1j = 187 \angle -26,73^\circ \text{ A}$

3) Método de separación de potencias.

En el primer receptor:

$$P_1 = \sqrt{3} V_{L1} I_1 \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 54,85 \cdot 1 = 36101 \text{ W}$$

$$Q_1 = \sqrt{3} V_{L1} I_1 \sin \varphi_1 = 0 \text{ VAR}$$

En el segundo receptor:

$$P_2 = 4499 \text{ W}$$

$$Q_2 = \sqrt{3} V_{L2} I_2 \sin \varphi_2 = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 8,54 \cdot 0,6 = 3373 \text{ VAR}$$

En el tercer receptor:

$$P_3 = \sqrt{3} V_{L3} I_3 \cos \varphi_3 = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 131,64 \cdot 0,8 = 69314 \text{ W}$$

$$Q_3 = \sqrt{3} V_{L3} I_3 \sin \varphi_3 = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 131,64 \cdot 0,6 = 51986 \text{ VAR}$$

Las potencias activas y reactivas totales:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 109,914 \text{ kW}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 55,359 \text{ kVAR}$$

La potencia aparente:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{109,914^2 + 55,359^2} = 123,068 \text{ kVA}$$

La intensidad total por fase: $I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot 380} = 187 \text{ A}$

El factor de potencia total: $\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{109,914}{123,068} = 0,893$

1.4-7. A una línea trifásica de 380 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes:

- Receptor en estrella de resistencia por fase 100Ω y reactancia despreciable.
- Receptor en triángulo de resistencia por fase 100Ω y reactancia despreciable.

Calcular:

- Intensidad de línea del primer receptor.
- Intensidad de línea del segundo receptor.
- Intensidad de línea total.

Solución: a) 2,2 A; b) 6,58 A; c) 8,78 A

1.4-8. A una línea trifásica de 380 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes:

- Receptor en estrella de impedancia $Z_1 = 50 \angle 37^\circ \Omega$ por fase.
- Receptor en triángulo de impedancia $Z_2 = 3 + 4j \Omega$ por fase.

Calcular:

- Intensidad de línea del primer receptor.
- Intensidad de línea del segundo receptor.
- Intensidad de línea y factor de potencia total.

Solución: a) 4,4 A; b) 131,64 A; c) 135,87 A, 0,607

1.4-9. A una línea trifásica de 380 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes:

- Receptor trifásico equilibrado que consume una potencia aparente de 10 kVA, con factor de potencia 0,8 inductivo.

- Receptor trifásico equilibrado que consume una potencia de 2 kW, con factor de potencia 0,8 inductivo.
- Motor trifásico de 7,5 CV, factor de potencia 0,8 y rendimiento a plena carga 85%.

Calcular:

- Potencia activa que consume el primer receptor.
- Potencias activa y reactiva total.
- Intensidad de línea y factor de potencia total.

Solución: a) 8 kW; b) 16,5 kW, 12,37 kVAr; c) 31,3 A, 0,8

1.4-10. A una línea trifásica de 380 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes:

- Receptor trifásico equilibrado que consume una potencia de 10 kW, con factor de potencia 0,98 capacitivo.
- Receptor trifásico equilibrado que consume una potencia de 2 kW, con factor de potencia 0,8 inductivo.
- Motor trifásico que consume 11 kW, con factor de potencia 0,8.

Calcular:

- Potencia reactiva que consume el primer receptor.
- Potencias activa y reactiva total.
- Intensidad de línea y factor de potencia total.

Solución: a) -2 kVAr; b) 23 kW, 7,75 kVAr; c) 36,88 A, 0,948 inductivo.

1.4-11. A una línea trifásica de 220 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes:

- Receptor trifásico equilibrado que consume una potencia de 10 kW, con factor de potencia 0,8 inductivo.
- Receptor en triángulo con impedancia $Z = (30 + 40j) \Omega$ por cada rama.
- Motor trifásico de 15 CV, factor de potencia 0,84 y rendimiento a plena carga 86%.

Calcular:

- Intensidad de línea del primer receptor.
- Intensidad de línea del segundo receptor.
- Intensidad de línea que consume el motor.
- Intensidad de línea, factor de potencia y potencia activa total.

Solución: a) 32,8 A; b) 7,62 A; c) 40,1 A; d) 80,1 A, 0,805, 24,58 kW

1.5. SISTEMA TRIFÁSICO CON CARGAS DESEQUILIBRADAS

Se consideran los siguientes casos:

- 1) *Receptor desequilibrado en conexión triángulo.* Se calculan las intensidades por cada rama del triángulo a partir de la tensión de línea y de la impedancia de cada rama. A continuación se calculan las intensidades por cada conductor de la línea. Al no existir neutro la suma de las corrientes de línea en cualquier instante es nula.
- 2) *Receptor desequilibrado en conexión estrella sin neutro.* Se convierte la estrella en triángulo equivalente y se procede como en el caso anterior. Para que una conexión triángulo (fig. 1.10) sea equivalente a una conexión estrella, la

impedancia que une dos puntos de conexión del triángulo tiene que ser igual a la suma de impedancias de la estrella que concurren en esos puntos, aumentada en el cociente de dividir el producto de esas impedancias por la tercera impedancia de la estrella.

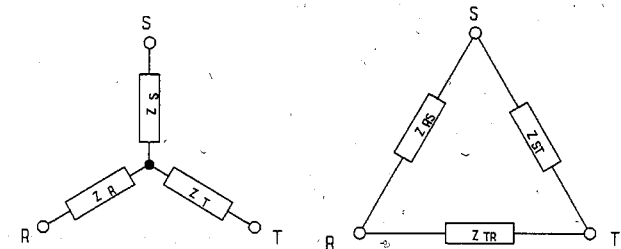


Fig. 1.10

$$Z_{RS} = Z_R + Z_S + \frac{Z_R \cdot Z_S}{Z_T}; \quad Z_{ST} = Z_S + Z_T + \frac{Z_S \cdot Z_T}{Z_R}; \quad Z_{TR} = Z_T + Z_R + \frac{Z_T \cdot Z_R}{Z_S}$$

- 3) *Receptor desequilibrado en conexión estrella con neutro.* Se calcula cada fase independientemente, teniendo en cuenta:

- La intensidad de corriente en un conductor fase de la línea de alimentación, es la suma vectorial de las intensidades de corriente debidas a los receptores trifásicos, y las debidas a los receptores monofásicos conectados entre ese conductor y el neutro.
- La intensidad de corriente en el neutro es igual y opuesta a la corriente resultante de la suma vectorial de las corrientes de las tres fases.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN²

1.5-1. A una línea trifásica de 380 V, 50 Hz se conecta un receptor en triángulo (fig. 1.11). La rama RS del triángulo es una bobina de resistencia despreciable y reactancia 5 Ω ; la rama ST es una resistencia de 10 Ω ; la rama TR es una bobina de resistencia despreciable y reactancia 10 Ω . Calcular las intensidades de línea.

Considerando la tensión V_{ST} (fig. 1.12) como origen de fase, las tensiones de línea tendrán las siguientes expresiones complejas:

$$V_{ST} = 380 \angle 0^\circ = 380 \text{ V}$$

$$V_{RS} = 380 \angle 120^\circ \text{ V}$$

$$V_{TR} = 380 \angle -120^\circ \text{ V}$$

La intensidad I_{RS} se calcula por la ley de Ohm

$$I_{RS} = \frac{V_{RS}}{Z_{RS}} = \frac{380 \angle 120^\circ}{5 \angle 90^\circ} = 76 \angle 30^\circ = (65,82 + 38j) \text{ A}$$

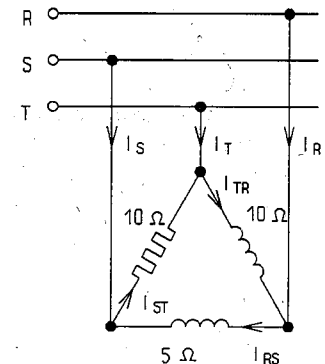


Fig. 1.11

² En los problemas se consideran las tensiones compuestas o de línea equilibradas y con secuencia R-S-T.

La intensidad I_{TR} :

$$I_{TR} = \frac{V_{TR}}{Z_{TR}} = \frac{380 \angle -120^\circ}{10 \angle 90^\circ} = 38 \angle -210^\circ = (-32,91 + 19j) \text{ A}$$

La intensidad I_{ST} :

$$I_{ST} = \frac{V_{ST}}{Z_{ST}} = \frac{380 \angle 0^\circ}{10 \angle 0^\circ} = 38 \angle 0^\circ = (38 + 0j) \text{ A}$$

La intensidad I_R se calcula aplicando la primera ley de Kirchhoff al punto de conexión de la fase R

$$I_R + I_{TR} = I_{RS}; I_R = I_{RS} - I_{TR} = 98,73 + 19j = 100,54 \angle 11^\circ \text{ A}$$

De forma análoga:

$$I_S = I_{ST} - I_{RS} = -27,82 - 38j = 47,1 \angle -126,2^\circ \text{ A}$$

$$I_T = I_{TR} - I_{ST} = -70,91 + 19j = 73,41 \angle 165^\circ \text{ A}$$

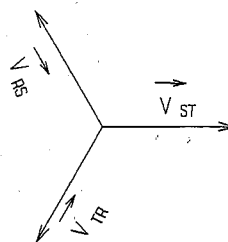


Fig. 1.12

1.5-2. A una línea trifásica de 300 V, 50 Hz se conecta un receptor en triángulo. La rama RS del triángulo es una resistencia de 300 Ω ; las ramas ST y TR son resistencias de 100 Ω . Calcular:

a) Intensidad I_{RS} .

b) Intensidad I_{TR} .

c) Intensidad de línea I_R

Solución: a) 1 A; b) 3 A; c) 3,61 A

1.5-3. A una línea trifásica de 380 V, 50 Hz se conecta un receptor en triángulo. Las ramas RS y ST del triángulo son resistencias de 100 Ω ; la rama TR es una bobina de impedancia $Z = 100 \angle 30^\circ \Omega$. Calcular las intensidades de línea.

Solución: $I_R = 5,37 \text{ A}$;

$I_S = 6,58 \text{ A}$; $I_T = 7,34 \text{ A}$

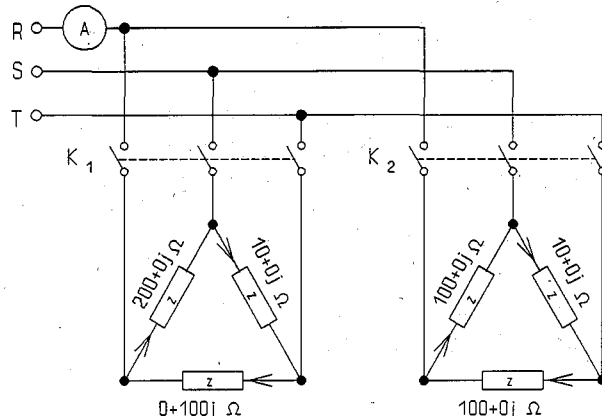


Fig. 1.13

1.5-4. En la línea trifásica de 400 V, 50 Hz, con los receptores que indica la figura 1.13.

Calcular la indicación del amperímetro en los casos siguientes:

a) El interruptor K_1 abierto y K_2 cerrado.

b) El interruptor K_1 cerrado y K_2 abierto.

c) Los dos interruptores cerrados.

Solución: a) 6,93 A; b) 2,48 A; c) 7,1 A.

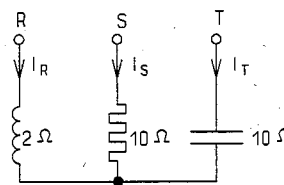


Fig. 1.14

1.5-5. A una línea trifásica de 380 V, 50 Hz se conecta un receptor en estrella (fig. 1.14). La fase R del receptor está formada por una bobina de resistencia despreciable y reactancia 2 Ω ; la fase S está formada por una resistencia de 10 Ω y la fase T por un condensador de reactancia 10 Ω . Calcular las intensidades de línea.

Para calcular las intensidades se convierte el receptor en estrella en otro receptor equivalente en triángulo.

La impedancia compleja Z_{RS} de una rama del triángulo se calcula por la fórmula:

$$Z_{RS} = Z_R + Z_S + \frac{Z_R \cdot Z_S}{Z_T} = 2j + 10 + \frac{20j}{-10j} = 8 + 2j = 8,246 \angle 14^\circ \Omega$$

De forma análoga se calculan Z_{ST} y Z_{TR} :

$$Z_{ST} = Z_S + Z_T + \frac{Z_S \cdot Z_T}{Z_R} = 10 + (-10j) + \frac{-100j}{2j} = -40 - 10j = 41,23 \angle -166^\circ \Omega$$

$$Z_{TR} = Z_T + Z_R + \frac{Z_T \cdot Z_R}{Z_S} = -8j + \frac{20}{10} = 2 - 8j = 8,246 \angle -76^\circ \Omega$$

Considerando la tensión V_{ST} como origen de fase (fig. 1.15).

$$V_{RS} = 380 \angle 120^\circ \text{ V}$$

$$V_{ST} = 380 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_{TR} = 380 \angle -120^\circ \text{ V}$$

Las intensidades por cada rama del triángulo (fig. 1.16).

$$I_{RS} = \frac{V_{RS}}{Z_{RS}} = \frac{380 \angle 120^\circ}{8,246 \angle 14^\circ} = 46,1 \angle 106^\circ = (-12,71 + 44,31j) \text{ A}$$

$$I_{ST} = \frac{V_{ST}}{Z_{ST}} = \frac{380 \angle 0^\circ}{41,23 \angle 166^\circ} = 9,22 \angle 166^\circ = (-8,95 + 2,23j) \text{ A}$$

$$I_{TR} = \frac{V_{TR}}{Z_{TR}} = \frac{380 \angle -120^\circ}{8,246 \angle -76^\circ} = 46,1 \angle -44^\circ = (33,16 - 32,02j) \text{ A}$$

Las intensidades por cada conductor de línea

$$I_R = I_{RS} - I_{TR} = -45,87 + 76,33j = 89 \angle 121^\circ \text{ A}$$

$$I_S = I_{ST} - I_{RS} = 3,76 - 42,08j = 42,25 \angle -84,9^\circ \text{ A}$$

$$I_T = I_{TR} - I_{ST} = 42,11 - 34,25j = 54,28 \angle -39,12^\circ \text{ A}$$

1.5-6. A una línea trifásica de 400 V, 50 Hz, sin conductor neutro, se conecta un receptor en estrella. La fase R de la estrella es una resistencia de 200 Ω , la fase S es una bobina de resistencia despreciable y reactancia 10 Ω , y la fase T es una resistencia de 100 Ω . Calcular:

a) Impedancia Z_{RS} equivalente.

b) Impedancia Z_{TR} equivalente.

c) Intensidad en la fase R.

Solución: a) $200 + 30j$; b) $300 - 2000j$; c) 2,15 A

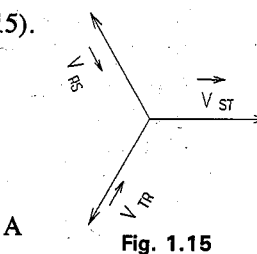


Fig. 1.15

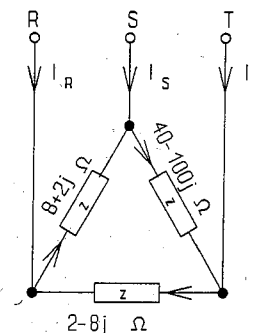


Fig. 1.16

1.5-7. A una línea trifásica de 380 V, 50 Hz, sin neutro se conecta un receptor en estrella:

La fase R de la estrella es una resistencia de 200 Ω , la fase S es una resistencia de 10 Ω , y la fase T es una resistencia de 100 Ω . Calcular la intensidad que circula por cada una de las fases del receptor.

Solución: $I_R = 1,74$ A; $I_S = 4,37$ A; $I_T = 3,39$ A

1.5-8. A una línea trifásica con neutro 380/220 V, 50 Hz se conectan los receptores siguientes (fig. 1.17):

- Un receptor en estrella con neutro, con las impedancias por rama que indica la figura.
- Un receptor trifásico equilibrado que consume 10 kW con factor de potencia 0,8 inductivo.

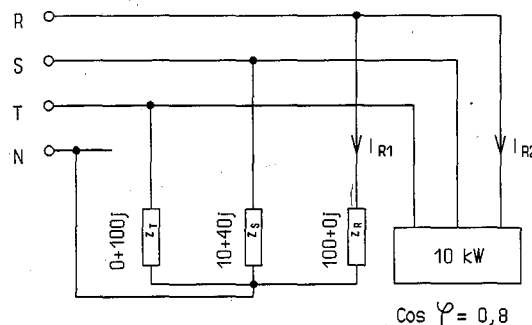


Fig. 1.17

Calcular:

- Intensidad que circula por cada fase del receptor en estrella.
- Intensidad de línea del segundo receptor.
- Intensidad total en la fase R.

a) Considerando la tensión V_R como origen de fases (fig. 1.18) $V_R = 220 \angle 0^\circ$, $V_S = 220 \angle -120^\circ$ y $V_T = 220 \angle 120^\circ$

La intensidad en la fase R del primer receptor:

$$I_{R1} = \frac{V_R}{Z_R} = \frac{220 \angle 0^\circ}{100 \angle 0^\circ} = 2,2 \angle 0^\circ = 2,2 + 0j \text{ A}$$

La impedancia de la fase S: $Z_S = 10 + j40 = 41,23 \angle 76^\circ \Omega$

La intensidad en la fase S:

$$I_{S1} = \frac{V_S}{Z_S} = \frac{220 \angle -120^\circ}{41,23 \angle 76^\circ} = 5,34 \angle -196^\circ \text{ A}$$

La intensidad en la fase T: $I_{T1} = \frac{V_T}{Z_T} = \frac{220 \angle 120^\circ}{100 \angle 90^\circ} = 2,2 \angle 30^\circ \text{ A}$

b) La intensidad de línea en el segundo receptor:

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos \varphi} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 19 \text{ A}$$

$\cos \varphi = 0,8$; $\varphi = 36,87^\circ$ de retraso respecto a la tensión de fase

$$I_{R2} = 19 \angle -36,87^\circ = (15,2 - 11,4j) \text{ A}$$

c) La intensidad total en la fase R:

$$I_R = I_{R1} + I_{R2} = (2,2 + 0j) + (15,2 - 11,4j) = 17,4 - 11,4j = 20,8 \angle -33,23^\circ \text{ A}$$

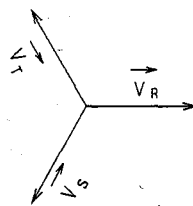


Fig. 1.18

1.5-9. A una línea trifásica con neutro, de tensión compuesta o de línea 380 V, 50 Hz, se conectan los receptores que indica la figura 1.19.

- Un motor monofásico entre la fase R y el neutro de potencia nominal 0,75 CV, factor de potencia 0,8 y rendimiento a plena carga 80%.
- Un motor trifásico de 5,5 CV, factor de potencia 0,8 y rendimiento a plena carga 90%.
- Receptor en triángulo con una bobina de resistencia 40 Ω y reactancia 30 Ω por rama.

Calcular la intensidad de línea en la fase R.

Solución: $I_R = 25,62$ A

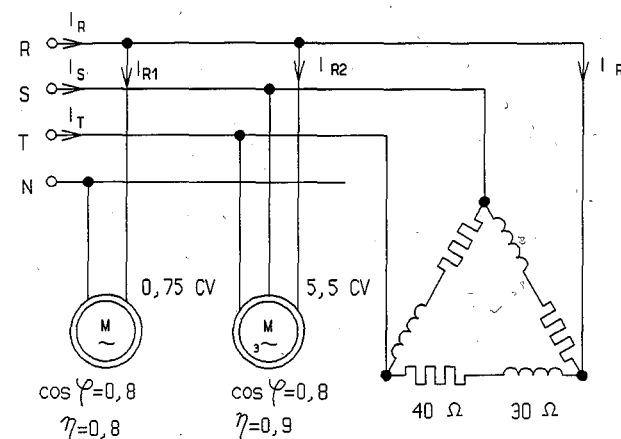


Fig. 1.19

1.5-10. A una línea trifásica de 380 V, 50 Hz, se conectan los receptores que indica la figura 1.20:

- Un receptor de impedancia $Z_1 = 10 \angle 30^\circ$ conectado entre las fases R y S.
- Un receptor trifásico en estrella de impedancia de fase $Z_2 = 20 \angle -30^\circ$

Calcular la indicación del amperímetro.

La tensión entre fase y neutro o tensión de fase:

$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$$

Considerando la tensión V_R como origen de fases (fig. 1.21) $V_R = 220 \angle 0^\circ$, $V_S = 220 \angle -120^\circ$, $V_{RS} = 380 \angle 30^\circ$ y V_{SR} es opuesta a V_{RS} : $V_{SR} = 380 \angle -150^\circ$

La intensidad en la fase S del primer receptor:

$$I_{S1} = \frac{V_{SR}}{Z_1} = \frac{380 \angle -150^\circ}{10 \angle 30^\circ} = 38 \angle -180^\circ = (-38 + 0j) \text{ A}$$

La intensidad en la fase S del segundo receptor:

$$I_{S2} = \frac{V_S}{Z_2} = \frac{220 \angle -120^\circ}{20 \angle -30^\circ} = 11 \angle -90^\circ = (0 - 11j) \text{ A}$$

La intensidad total en la fase S:

$$I_S = I_{S1} + I_{S2} = -38 - 11j = 39,56 \angle -163,86^\circ \text{ A}$$

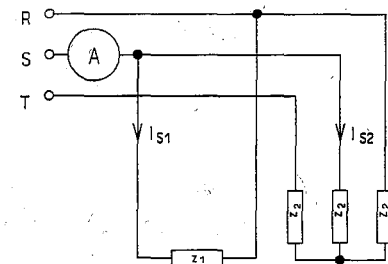


Fig. 1.20

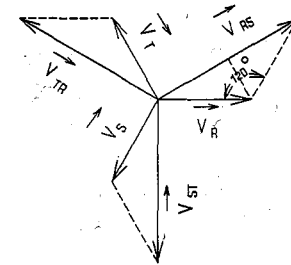


Fig. 1.21

1.5-11. A una línea trifásica de 380 V, 50 Hz, se conectan los receptores que indica la figura 1.22:

- Un receptor de impedancia $Z_1 = 100 \angle 0^\circ$ conectado entre las fases R y S.
- Un receptor de impedancia $Z_2 = 100 \angle 30^\circ$ conectado entre las fases R y T.
- Un motor trifásico de 11 kW, factor de potencia 0,866 y rendimiento a plena carga 80%.

Calcular la intensidad total en la fase R.

Solución: 29,34 A.

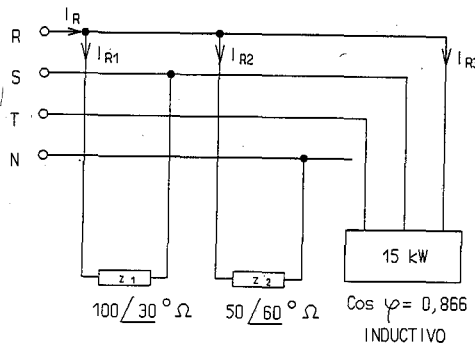


Fig. 1.23

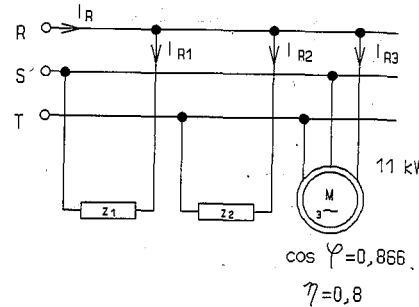


Fig. 1.22

1.5-12 Una línea trifásica con neutro de tensión de línea 380/220 V, 50 Hz, tiene conectados los receptores que indica la figura 1.23. Calcular la intensidad total en la fase R.

Considerando la tensión simple (fig. 1.24) para la fase R como horizontal y origen de fase, las tensiones $V_R = 220 \angle 0^\circ$ y $V_{RS} = 380 \angle 30^\circ$

La intensidad en el primer receptor:

$$I_{R1} = \frac{V_{RS}}{Z_1} = \frac{380 \angle 30^\circ}{100 \angle 30^\circ} = 3,8 \angle 0^\circ = (3,8 + 0j) \text{ A}$$

La intensidad en el segundo receptor:

$$I_{R2} = \frac{V_2}{Z_2} = \frac{220 \angle 0^\circ}{50 \angle 60^\circ} = 4,4 \angle -60^\circ = (2,2 - 3,81j) \text{ A}$$

La intensidad en el tercer receptor:

$$I_{R3} = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi} = \frac{15000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,866} = 26,32 \text{ A}$$

El factor de potencia $\cos \varphi = 0,866$; $\varphi = 30^\circ$; en retraso respecto a la tensión de fase V_R , por lo que la intensidad en números complejos:

$$I_{R3} = 26,32 \angle -30^\circ = (22,79 - 13,16j) \text{ A}$$

La intensidad total en el conductor de la fase R:

$$I_R = I_{R1} + I_{R2} + I_{R3} = 28,79 - 16,97j = 33,42 \angle -30,52^\circ \text{ A}$$

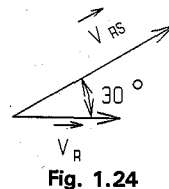


Fig. 1.24

1.6. LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN ABIERTAS Y CERRADAS

Según el esquema de montaje las líneas de distribución se clasifican en:

a) *Líneas de distribución abiertas.* Son las que reciben corriente por un solo extremo.

Una red abierta se llama *radial*, cuando está constituida por líneas de derivación abiertas, con las cargas en los extremos o repartidas a lo largo de la línea (fig. 1.25).

La estructura de la red radial está constituida por un centro de alimentación, del cual parten las líneas principales con sus derivaciones. Las ventajas de estas redes son: sencillez de diseño, economía de instalación y clara distribución de corriente que permite la rápida localización de averías. Las principales desventajas son: limitada capacidad de ampliación de suministro de potencia y poca calidad de servicio, porque una avería en la línea afecta a muchos usuarios.

Se utiliza la red radial en electrificación rural, que se caracteriza por puntos de bajo consumo disperso en una zona relativamente grande. Se emplea una línea de M.T. de la que, mediante centros de transformación, parten líneas de B.T. que suministran energía eléctrica a los usuarios (fig. 1.26).

Las líneas de distribución de energía en B.T. suelen ser de corta longitud y con estructura radial.

b) *Líneas de distribución cerradas.* Son las que reciben la corriente por dos o más puntos.

• *Red en anillo.* Una red en anillo está constituida por una línea cerrada que tiene una o dos alimentaciones (fig. 1.27).

Se utilizan en M.T. para alimentar altos consumos de energía y mantener a la vez la continuidad en el servicio. En el anillo se colocan elementos de maniobra que permiten aislar una parte del mismo, por lo que una avería afecta a menos usuarios que en una red radial. Para la red de distribución en B.T. se usa la construcción en

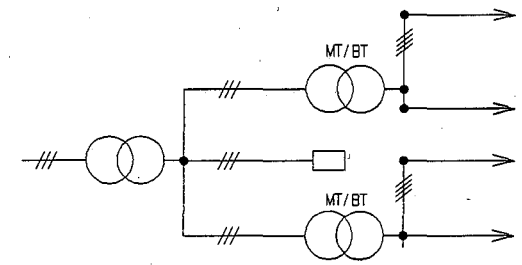


Fig. 1.25

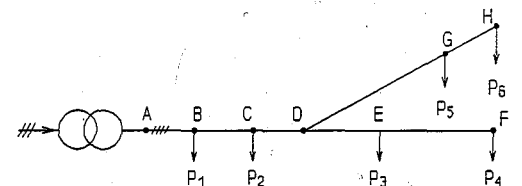


Fig. 1.26

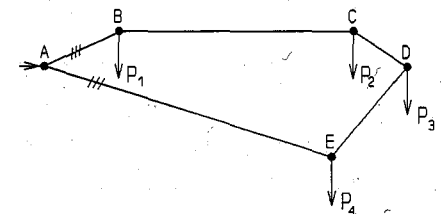


Fig. 1.27

anillo en distribución local, que presenta una pequeña caída de tensión y seguridad en el suministro. La red radial de B.T. puede conectarse en anillo por medio de un aparato de maniobra que normalmente está abierto.

Las redes de distribución urbanas en M.T. suelen ser construidas en anillo, alimentando a centros de transformación con entrada y salida de la línea, llamados centros de transformación "de paso" (fig. 1.28). Los aparatos de maniobra permiten que cada centro de transformación pueda alimentarse de uno u otro lado del anillo, dejando en caso de avería desconectada la parte averiada.

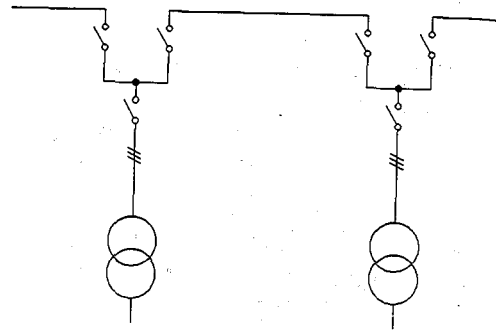


Fig. 1.28

Las principales ventajas de la construcción en anillo es que logra poca caída de tensión con variaciones bruscas de carga y más seguridad en el suministro que en la red radial.

- **Red en malla.** Una red en malla está constituida por redes cerradas unidas eléctricamente (fig. 1.29). Puede ser construida como tal o ser el resultado de unir eléctricamente entre sí redes radiales. La alimentación puede ser por uno o varios puntos.

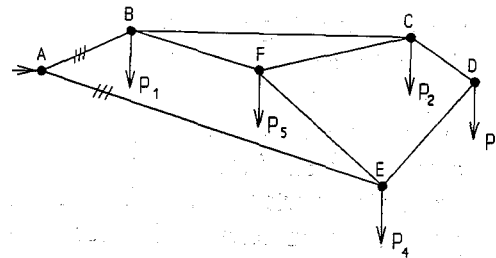


Fig. 1.29

Las principales ventajas de la red en malla son: pequeña caída de tensión sin grandes variaciones con el cambio de consumo, y poder hacer frente a aumento de demanda de potencia sin grandes cambios en la red.

Se utiliza para el suministro de energía a zonas de gran densidad de carga, obteniéndose buena estabilidad de tensión y gran seguridad en el suministro.

1.7. TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN

La transmisión de informaciones técnicas (medidas, señalizaciones y órdenes de maniobras) entre subestaciones y centros de transformación con un puesto de mando y control se llama telemedida, telemando y telecontrol.

Este sistema de telecomunicaciones consiste en lo siguiente: en el lado emisor se codifican las informaciones para su emisión por el canal de comunicación, y en el lado receptor se decodifican las informaciones transformándolas en señal indicativa, valor de medición u orden de maniobra.

El soporte de la comunicación puede ser:

- **Línea telefónica.** Tiene el inconveniente que es necesario una instalación telefónica entre los puntos a comunicar.
- **Ondas de radio de muy alta frecuencia (VHF) con radioenlace.** Tiene el inconveniente de necesitar en muchos casos estaciones repetidoras.
- **Onda portadora por alta tensión.** Utiliza la línea de distribución en alta tensión. El emisor acopla la señal de poca intensidad y alta frecuencia (HF) a la línea, de forma que se superpone a la frecuencia de 50 Hz. El receptor detecta la señal del emisor separándola de la del sistema de potencia.
- **Línea de fibra óptica.** La transmisión de datos por cable de fibra óptica requiere una instalación de este tipo entre los puntos a comunicar. En líneas aéreas de alta tensión, que disponen de cable de tierra para protección de la línea contra descargas atmosféricas se instala el cable de fibra óptica adosado al de tierra o un cable especial que cumple la función de cable de tierra y de comunicación. En líneas aéreas en las que no se utiliza el cable de tierra (líneas de media tensión) se instala un cable de fibra óptica autosoportado, con resistencia a la tracción.

El puesto de mando y control tradicional con cuadros sinópticos de la red, de tipo mosaico se sustituye por ordenadores y pantallas, que permiten el análisis de datos para medida de magnitudes, visualización de fallos y representación actualizada de los valores necesarios para las maniobras a efectuar.

1.8. CONDUCTORES UTILIZADOS EN LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS

Los conductores más utilizados en M.T y en B.T. son:

- 1) **Conductores sin aislamiento,** formados por los materiales siguientes:



Fig. 1.30

- a) **Cobre duro,** los cuales pueden ser de:

- Alambre.
- Cable de cobre, formado por alambres cableados en capas concéntricas.
- Cable de cobre con alma de acero, unidos por soldadura.

- b) **Aluminio,** se utiliza en forma de cable (art. 8 del R.L.A.T.).

- Cable de aleación de aluminio con silicio y magnesio (Almelec).
- Cable de aluminio-acero. Formado por varios alambres de aluminio, cableados sobre alambres de acero galvanizado (fig. 1.30).
- Cable de aluminio-acero, de tipo comprimido. Formado por hilos sectoriales de aluminio comprimidos sobre un alambre de acero.

- c) **Acero galvanizado,** utilizado formando parte de cables y en los conductores de tierra, que en líneas aéreas de A.T. van tendidos sobre la línea para protección contra descargas atmosféricas.

Actualmente los conductores sin aislamiento (conductores desnudos), se usan casi exclusivamente en líneas de A.T. En B.T. se usan como pletinas en canalizaciones prefabricadas bajo envoltente metálica o aislante.

2) **Conductores con aislamiento.** Los cables eléctricos aislados están formados básicamente por conductor rodeado de aislante, pero tienen otros elementos (fig. 1.31) para dar al cable resistencia mecánica, resistencia a los agentes atmosféricos, etc.

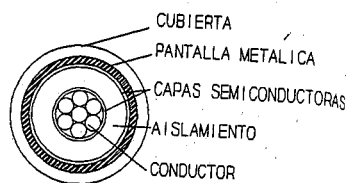


Fig. 1.31 Conductor aislado

Conductores. Los conductores más utilizados en los cables aislados son:

- Cobre. Se utiliza cobre recocido de resistividad a 20 °C, $\rho \approx 0,018 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ y carga de rotura 20 kp/mm².
- Aluminio. A igualdad de resistencia eléctrica el peso de aluminio es la mitad que el del cobre. Su resistividad a 20 °C $\rho = 0,028 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ y la carga de rotura 15 kp/mm².
- Almelec. Aleación de aluminio con pequeñas proporciones de silicio y magnesio. Su resistividad a 20 °C, $\rho = 0,032 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ y la carga de rotura es el doble que el aluminio.
- Otros materiales, como el plomo (pantallas protectoras) y el acero (armaduras), pueden funcionar ocasionalmente como conductores.

Aislantes. Los materiales aislantes más empleados en M.T. y en B.T. son a base de material plástico:

- Termoplásticos. Se reblandecen con el calor, como el policloruro de vinilo PVC (utilizado en B.T.) y el polietileno PE (utilizado en M.T.).
- Termoestables. No funden al aumentar la temperatura. Se emplean el etileno-propileno EPR, polietileno reticulado, PRC o XLPE, utilizados en M.T. y B.T.; goma natural y goma butílica (que está siendo sustituida por EPR).
- Otros aislantes utilizados son a base de siliconas y plásticos resistentes a altas temperaturas, a la llama o a determinados ambientes.

El cable aislado con papel impregnado en aceite y con cubierta de plomo se está usando cada vez menos actualmente.

Pantallas. Se utilizan para mejorar la distribución del campo eléctrico del cable. Se utilizan como pantallas hilos o mallas de cobre, hojas de aluminio, fundas de plomo, etc.

Armaduras. Se colocan sobre el aislante para aumentar la resistencia mecánica del cable. Se utilizan flejes de acero o hilos de acero arrollados sobre el cable.

Cubiertas. Protegen al aislante de efectos atmosféricos y daños mecánicos. Se utilizan diversos tipos de plásticos.

Los tipos de cables aislados más utilizados son:

- En líneas aéreas. Se utilizan en B.T. y en M.T. conductores de aluminio formados por tres cables unipolares aislados con polietileno reticulado o etileno propileno, trenzados en haz sobre un fiador de Almelec o de acero.
- En líneas subterráneas. Se utilizan en B.T. y en M.T. cables de aluminio o de cobre con aislamiento seco (plástico) o con papel impregnado.
- En instalaciones interiores. Se utilizan conductores de cobre con aislamiento de plástico.

1.9. DESIGNACIÓN DE CONDUCTORES AISLADOS EN MEDIA Y BAJA TENSIÓN

Tabla 1.2 Cables con tensión nominal hasta 750 V, más utilizados en instalaciones interiores

PARTES DE LA DESIGNACIÓN	ELEMENTOS A CONSIDERAR	SÍMBOLO
1	Estado de armonización.	H Cable de tipo armonizado. A Cable de tipo nacional autorizado.
2	Tensión nominal U_0/U .	03 Tensión nominal 300/300 V. 05 Tensión nominal 300/500 V. 07 Tensión nominal 450/750 V.
3	Naturaleza del aislamiento o de la cubierta.	V Aislamiento en PVC normal. R Aislamiento en goma normal. N Cubierta de policloropreno.
4	Particularidades constructivas.	H Cable plano de conductores separables. H2 Cable plano no separable.
5	Formación del conductor.	-F Conductor flexible para cable flexible. -H Conductor muy flexible para un cable flexible. -K Conductor flexible para un cable de instalación fija. -R Conductor rígido redondo cableado. -U Conductor rígido redondo formado por un sólo alambre.
6	Número de conductores y sección nominal.	Número \times sección en mm ² (Si hay conductor de protección se utiliza G en lugar de \times).

EJEMPLOS:

H05VV-F: Cable de normas armonizadas, de tensión nominal 300/500 V, aislamiento PVC, cubierta de PVC, conductor flexible para cable flexible.

H07V-U: Cable de normas armonizadas, de tensión nominal 450/750 V, aislamiento PVC, conductor rígido redondo.

H07RN-F 3G6: Cable según norma armonizada, tensión nominal 450/750 V, Aislamiento de goma, cubierta de policloropreno, conductor flexible; tres conductores de 6 mm², uno de ellos de protección.

H03VH-H 2 \times 0,5: Cable según norma armonizada, tensión nominal 300/300 V, aislamiento de PVC, cable plano de conductores separables, muy flexible, dos conductores de 0,5 mm².

Tabla 1.3

Cables de transporte de energía aislados con dieléctricos secos para tensiones nominales de 1 kV a 30 kV.

PARTES DE LA DESIGNACIÓN	ELEMENTOS A CONSIDERAR	SÍMBOLO
1	Particularidades constructivas.	<p><i>Naturaleza del aislamiento:</i> V Policloruro de vinilo (PVC). R Polietileno reticulado (PRC o XLPE). D Etileno-propileno (EPR).</p> <p><i>Cables de campo radial:</i> H Pantalla semiconductora sobre el conductor, sobre el aislamiento y sobre pantalla metálica individual. HO Como en el caso anterior pero, además, con pantalla metálica sobre el conjunto de los conductores aislados cableados.</p> <p><i>Cubierta de separación:</i> E Polietileno termoplástico. V Policloruro de vinilo. N Policloropreno (neopreno). I Polietileno clorosulfonado.</p> <p><i>Protecciones metálicas:</i> O Pantalla conjunta. F Flejes de hierro. M Alambres de hierro. FA Flejes de aluminio. MA Alambres de aluminio. Q Pletinas de hierro. QA Pletinas de aluminio. P Tubo de plomo. A Tubo liso de aluminio. AW Tubo corrugado de aluminio.</p> <p><i>Cubiertas:</i> E Polietileno termoplástico. V Policloruro de vinilo. N Policloropreno (neopreno). I Polietileno clorosulfonado. Cuando la cubierta termoplástica sea de naturaleza especial, se indica a continuación: RH Cubierta resistente a hidrocarburos. FLAM Cubierta no propagadora de incendio.</p>
2	Tensión nominal U_0/U	Expresada en kV y designando los valores U_0/U .
3	Número de conductores y sección nominal.	Número \times sección en mm^2 .
4	Forma del conductor.	Sin indicación con cuerda convencional redonda. K Cuerdas compactas. S Cuerdas sectoriales.
5	Naturaleza del conductor.	Al Si el conductor es de aluminio.

EJEMPLOS:

RVFV 0,6/1 kV $3 \times 120/70$ K: Cable con aislamiento de polietileno reticulado, cubierta interna de PVC, armado con fleje de acero y cubierta exterior de PVC, de tensión 0,6/1 kV, con tres conductores de cobre de sección 120 mm^2 y neutro de 70 mm^2 , cuerda compacta.

DHVMV 15/25 kV 1×240 K: Cable unipolar con conductor de cobre de 240 mm^2 de sección en cuerda compacta, aislado etileno propileno, pantalla semiconductora, cubierta de separación de PVC, armadura de alambres de aluminio, cubierta de PVC, tensión 15/25 kV.

Tabla 1.4

Conductores de aluminio aislados, cableados en haz, para líneas aéreas de 0,6/1 kV de tensión nominal.

PARTES DE LA DESIGNACIÓN	ELEMENTOS A CONSIDERAR	SÍMBOLO
1	Tipo constructivo.	R Aislamiento de polietileno reticulado. Z Cableado en hélice visible.
2	Tensión nominal U_0/U .	0,6/1 kV
3	Número de conductores y sección nominal.	Número \times sección en mm^2
4	Naturaleza del conductor.	Al. Si el conductor es de aluminio. Alm. Si el neutro es de aleación de aluminio, se indica a continuación de la sección. Ac. Si el fiador es de acero galvanizado, se indica a continuación de la sección.

EJEMPLO:

RZ 0,6/1 kV 3×95 Al/54,6 Alm: Cable con aislamiento de polietileno reticulado, cableado en hélice visible, de tensión nominal 0,6/1 kV, tres conductores de aluminio de sección 95 mm^2 , neutro fiador de Almelec (para sujeción del cable) de sección $54,6 \text{ mm}^2$.

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.1-1 Una línea eléctrica trifásica en M.T. transporta una potencia de 1 MVA. Calcular:

- Intensidad de línea y sección mínima del conductor de cobre necesario si se admite una densidad de corriente de 3 A/mm^2 y la tensión de línea es de 20 kV.
- Sección mínima del conductor de cobre necesario, si se admite la misma densidad de corriente, para una tensión de línea de 15 kV.

Solución: a) 28,87 A; $9,62 \text{ mm}^2$; b) 38,49 A; $12,83 \text{ mm}^2$

P.1-2 A una línea monofásica de 220 V, 50 Hz se conectan los receptores siguientes:

- Un receptor de impedancia $Z_1 = 50 \angle 30^\circ \Omega$.
- Una instalación de alumbrado, que consume 2,4 kW con factor de potencia 0,86 inductivo.
- Un motor monofásico que consume una potencia de 0,7 kW con factor de potencia 0,8 inductivo.

Calcular la intensidad total y el factor de potencia total de la instalación.

Solución: 21 A; 0,85

P.1-3 A una línea trifásica de 380 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes:

- Receptor en estrella con impedancia $Z = (100 + j0) \Omega$ por cada rama.
- Receptor trifásico equilibrado que consume una potencia de 8 kW, con factor de potencia 0,8 inductivo.
- Motor trifásico de potencia nominal 15 kW, con factor de potencia 0,86 y rendimiento a plena carga del 88%.

Calcular:

- Intensidad de línea del primer receptor.
- Intensidad de línea del segundo receptor.
- Intensidad de línea que consume el motor.
- Intensidad de línea total.
- Potencia activa total y factor de potencia.

Solución: a) 2,19 A; b) 15,19 A; c) 30,11 A; d) 47,1 A; e) 26,5 kW, 0,854

P.1-4 Un local industrial alimentado por una línea trifásica con neutro 380/220 V, 50 Hz, tiene dos instalaciones:

- Instalación de alumbrado que consume 1,2 kW por cada fase con factor de potencia 0,86 inductivo.
- Instalación de fuerza, que alimenta a motores trifásicos y consume 20 kW con factor de potencia 0,8 inductivo.

Calcular:

- Intensidad de línea total en cada fase de alumbrado.
- Intensidad de línea total en la instalación de fuerza.
- Potencia activa que consume el local y su factor de potencia.

Solución: a) 6,34 A; b) 38 A; c) 23,6 kW; 0,81

LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN

P.1-5 En la línea trifásica de 380 V, 50 Hz, con los receptores que indica la figura 1.32. Calcular la indicación del amperímetro.

Solución: 39,14 A.

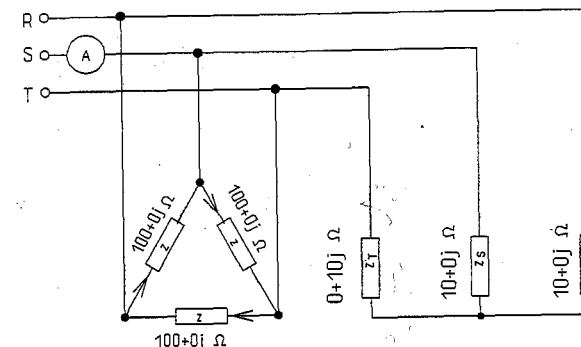


Fig. 1.32

P.1-6 A una línea trifásica con neutro de 380/220 V, 50 Hz, se conectan los receptores que indica la figura 1.33. Calcular:

- Intensidad de línea del receptor en triángulo.
- Intensidad en la fase R de la conexión en estrella.
- Intensidad total en la fase R.

Solución: a) 29,4 A;

b) 4,4 A; c) 33,74 A.

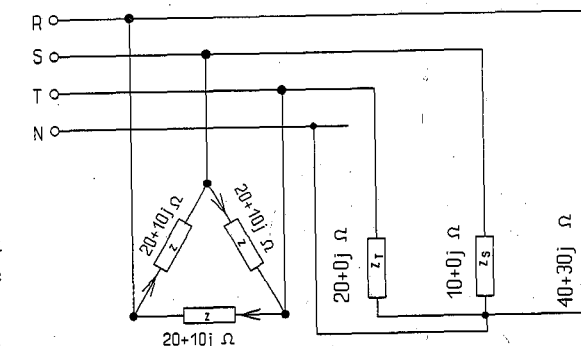


Fig. 1.33

P.1-7 A una línea trifásica de 380 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes:

- Un receptor de impedancia $Z_1 = 100 \angle 0^\circ$ conectado entre las fases R y T.
- Un motor trifásico de 7,5 CV, factor de potencia 0,866 y rendimiento a plena carga 88%.

Calcular la intensidad en la fase R.

Solución: 14,8 A.

P.1-8 En la instalación de la figura 1.34, con línea trifásica de tensión compuesta o de línea 380 V, 50 Hz. Calcular la indicación del amperímetro.

Solución: 14 A.

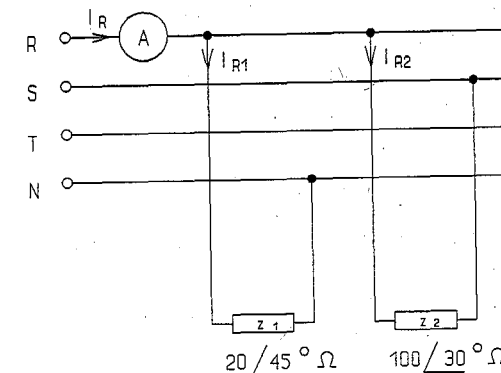


Fig. 1.34

2.1. CÁLCULO DE LA SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES EN LAS LÍNEAS DE BAJA TENSIÓN EN CORRIENTE ALTERNA

El cálculo eléctrico de una línea consiste en calcular la sección del conductor de forma que satisfaga unas condiciones (cálculo preliminar) o escogida una sección verificar que esas condiciones se cumplen (cálculo de comprobación).

En el cálculo de la sección de los conductores se consideran tres criterios:

- 1) *Calentamiento del conductor*. La densidad de corriente en el conductor debe ser limitada para disminuir el calentamiento producido al circular la corriente eléctrica. Este criterio fija la máxima intensidad de corriente por el conductor.
- 2) *Caída de tensión en el conductor*. La caída de tensión (diferencia entre la tensión al principio y al final de la línea), se limita para evitar el efecto que la disminución de la tensión de utilización tiene sobre el funcionamiento de los receptores, los cuales deben estar conectados a la tensión nominal para su correcto funcionamiento.

En el cálculo de la caída de tensión en de las líneas de B.T. se tiene en cuenta la *resistencia eléctrica de los conductores* que las forman:

- *Resistencia óhmica*. Es directamente proporcional a la longitud del conductor, inversamente proporcional a su sección y depende del tipo de material y de la temperatura.

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

R : Resistencia del conductor (Ω).

l : Longitud del conductor (m).

s : Sección del conductor (mm^2).

ρ : Coeficiente de resistividad, según el material y la temperatura ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$).

A la inversa de la resistividad se le denomina conductividad c .

La resistencia de los conductores metálicos aumenta al aumentar la temperatura.

- *Efecto pelicular o efecto Kelvin*. En corriente alterna, debido a que el flujo magnético producido por la corriente es alterno, se inducen fuerzas electromotrices en el interior del conductor que originan un desplazamiento de las cargas eléctricas a la periferia del mismo, produciendo una aumento de resistencia cuando la sección es grande. (El aumento de resistencia es menor del 2% para secciones de 300 mm^2 a la frecuencia de 50 Hz).

- *Efecto de proximidad.* Cuando dos o más conductores están paralelos y próximos entre sí, el campo magnético producido por la corriente eléctrica que recorre un conductor actúa sobre las corrientes en los otros, produciendo una modificación de la distribución de densidad de corriente, lo que hace aumentar la resistencia del conductor.

En el cálculo eléctrico de líneas de B.T. suele considerarse solamente la resistencia óhmica de los conductores. Para cálculos más exactos en las líneas largas se tiene en cuenta la reactancia.

- 3) *Capacidad del conductor para soportar la corriente de cortocircuito.* Debe limitarse la intensidad de corriente de cortocircuito, porque su valor muy elevado produce un excesivo calentamiento del conductor y puede originar que las fuerzas que tienden a separar o a juntar conductores próximos recorridos por esa corriente tomen un valor excesivo. En las instalaciones de interiores o receptoras de baja tensión, alejadas del centro de transformación que las alimenta, no se suele tener en cuenta este criterio para el cálculo de sección, porque se considera que la intensidad de corriente y el calentamiento producido no llegan a valores peligrosos antes de que actúen las protecciones contra cortocircuitos.

2.2. SECCIÓN MÍNIMA DE LOS CONDUCTORES POR CRITERIO TÉRMICO

Cuando circula corriente por un conductor se produce un calentamiento del mismo (debido fundamentalmente a la pérdida de energía en forma de calor o efecto Joule), aumentando su temperatura hasta que llega al equilibrio térmico cuando todo el calor producido es cedido al exterior. La temperatura de equilibrio térmico es directamente proporcional al volumen del conductor y al cuadrado de la densidad de corriente δ (relación entre la intensidad I que circula por el conductor y su sección s , $\delta = I/s$), dependiendo de las condiciones de enfriamiento. Para mantener una determinada temperatura, la densidad de corriente admisible debe disminuir al aumentar la sección del conductor.

En los conductores aislados el calor puede deteriorar los aislamientos y las máximas temperaturas admisibles dependen del material aislante.

En los conductores desnudos o sin aislamiento utilizados en líneas aéreas, la temperatura límite viene fijado por la constancia de las características mecánicas del conductor.

El cálculo de la sección de los conductores en B.T. según el calentamiento, se realiza mediante tablas del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (R.B.T.), que fijan las intensidades o las densidades de corriente máximas admisibles en función de la sección, del material conductor, del aislamiento y según el tipo de instalación que marca las condiciones de enfriamiento.

- *Redes aéreas.* La sección se fija por las tablas de la instrucción MIE BT 004, que indican las intensidades admisibles para conductores, desnudos o aislados hasta una tensión de aislamiento de 1 000 V y temperatura ambiente de 40 °C.
- *Redes subterráneas.* La sección se fija por las tablas de la instrucción MIE BT 007, que indican las intensidades admisibles para conductores aislados, con una tensión de aislamiento de 1 000 V y a la temperatura de 25 °C.
- *Instalaciones interiores.* La sección se fija por las tablas de la instrucción MIE BT 017, que indican las intensidades admisibles en conductores aislados, para una tensión de aislamiento hasta 750 V y a la temperatura ambiente de 40 °C.

Cuando la temperatura ambiente o las condiciones de la instalación no coinciden con las de las tablas se utilizan unos factores de corrección para las intensidades admisibles, que están fijados en las instrucciones correspondientes del R.B.T.

El cálculo según este criterio puede efectuarse de dos formas:

- 1) *Cálculo preliminar.* Para calcular la sección del conductor necesaria para que por él circule una determinada intensidad de corriente (carga de la instalación), se divide esta intensidad por los factores de corrección necesarios y con el valor resultante se elige en las tablas la sección que admita una intensidad igual o superior.
- 2) *Cálculo de comprobación.* Escogida una sección, para determinar la intensidad admisible, se escoge en las tablas la intensidad correspondiente a esa sección y se multiplica este valor por los coeficientes de corrección necesarios. El valor resultante es la intensidad admisible en las condiciones de la instalación.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.2-1. Calcular la sección necesaria en un cable de cobre tripolar, aislado con polietileno reticulado, para tensión nominal 1 kV, por el que debe circular una corriente eléctrica de intensidad 70 A. El conductor va colocado horizontalmente en bandeja perforada, separado de otros dos cables, en un local en el que se considera una temperatura ambiente de 30°C.

Según la tabla IX de la instrucción MIE BT 004, el factor de corrección para tres cables instalados en bandeja perforada (tabla 2.1) es 0,9.

Tabla 2.1 Factor de corrección para cables instalados en bandeja

DISPOSICIÓN	NÚMERO DE CABLES O TÉRMINOS		
	2	3	MÁS DE 3
En contacto mutuo.	0,85	0,80	0,75
Separados un diámetro sobre bandeja continua.	0,90	0,85	0,80
Separados un diámetro sobre bandeja perforada.	0,95	0,90	0,85

Para la temperatura ambiente de 30°C el factor de corrección según la tabla X de la misma instrucción es de 1,10 en cable con aislamiento de PRC (tabla 2.2).

Tabla 2.2 Factores de corrección en función de la temperatura ambiente (MIE BT 004)

TIPO DE AISLAMIENTO	TEMPERATURA °C								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
V	1.33	1.28	1.23	1.18	1.12	1.06	1,00	0.93	0.86
B	1.30	1.25	1.20	1.15	1.11	1.05	1,00	0.94	0.88
D	1.26	1.22	1.18	1.14	1.10	1.05	1,00	0.95	0.90
R	1.26	1.22	1.18	1.14	1.10	1.05	1,00	0.95	0.90
P	1.33	1.28	1.23	1.18	1.12	1.06	1,00	0.93	0,86

V: Policloruro de vinilo. G: Goma. B: Goma butílica. D: Etileno-propileno. R: Polietileno reticulado. P: Papel impregnado.

La intensidad mínima que debe admitir el cable $\frac{I}{0,9 \cdot 1,1} = \frac{70}{0,99} = 70,7 \text{ A}$

Según la tabla V de la instrucción MIE BT 004 (tabla 2.3) el cable de cobre aislado con polietileno reticulado de sección 16 mm^2 admite 82 A, mayor que 70,7 A. La sección de 16 mm^2 es suficiente según el criterio térmico.

Tabla 2.3 Intensidades máximas admisibles en cables de cobre, redes aéreas (MIE BT 004)

SECCION NOMINAL mm ²	TRES CABLES UNIPOLARES (1)					UN CABLE TRIPOLAR O TETRAPOLAR					DOS CABLES UNIPOLARES				UN CABLE BIPOLAR				
	TIPO DE AISLAMIENTO																		
	V	B	D	R	P	V	B	D	R	P	V	B	D	R	V	B	D	R	
1,5	16	18	18	18	30	15	17	17	17	15	22	25	27	27	20	23	25	25	
2,5	22	25	26	26	38	21	24	25	25	18	30	34	36	36	26	30	33	33	
4	30	34	35	35	48	28	32	34	34	25	40	45	48	48	35	40	44	44	
6	38	44	45	46	62	36	41	43	44	35	50	60	64	64	45	55	58	58	
10	53	61	62	64	80	50	57	60	61	50	70	80	85	85	65	75	79	79	
16	71	81	83	86	102	65	75	80	82	70	95	105	115	115	85	95	103	103	
25	96	110	115	120	130	87	100	105	110	90	125	145	155	155	115	130	138	138	
35	115	135	140	145	160	105	120	130	135	110	155	175	190	190	140	160	170	170	
50	145	165	175	180	195	130	150	160	165	140	185	210	225	225	165	190	200	200	
70	185	215	225	230	250	165	190	200	210	180	230	265	280	285	205	240	255	255	
95	235	270	280	285	305	205	235	250	260	220	285	325	345	350	255	295	310	310	
120	275	315	325	335	350	240	275	290	300	250	330	380	400	405	295	345	360	360	
150	315	360	375	385	410	275	315	335	350	295	375	430	455	465	340	390	410	415	
185	365	420	440	450	465	315	365	385	400	335	430	490	525	535	390	450	475	485	
240	435	490	515	535	530	370	435	460	475	380	505	580	615	630	460	530	560	565	
300	500	570	595	615	605	425	495	520	545	440	580	670	710	730	535	615	650	660	
400	585	660	700	720	675	495	575	610	645	500	665	770	815	840	620	715	760	770	
500	665	760	800	825	745						760	865	915	950					
630	765	870	915	950	810						880	1015	1080	1100					
800					875														
1 000					925														

V: Policloruro de vinilo. B: Goma butílica (butil). D: Etileno - propileno. R: Polietileno reticulado. P: Papel impregnado.

(1) Los mismos valores se aplican si se incluye además el conductor neutro.

Para cables bajo tubo el factor de reducción de la intensidad máxima es 0,8, y para cables expuestos directamente al sol 0,9.

2.2-2. Un cable tetrapolar de cobre con aislamiento de PVC, tensión nominal 1 kV, alimenta a 380 V, 50 Hz una instalación que consume 34 kW con un factor de potencia 0,87 inductivo. Calcular:

a) Intensidad que consume la instalación.

b) Sección necesaria del conductor si la instalación es empotrada bajo tubo

Solución: a) 59,38 A b) 25 mm²

2.2-3. Calcular la intensidad admisible en un cable tetrapolar de aluminio, de sección $3 \times 35 + 1 \times 25 \text{ mm}^2$, aislado con polietileno reticulado, tensión 1 kV, en canalización bajo tubo a 30°C.

La tabla VI de la instrucción MIE BT 004, indica que para un cable tripolar o tetrapolar de aluminio de sección 35 mm², la intensidad máxima permitida es de 105 A (tabla 2.4).

Tabla 2.4 Intensidades máximas admisibles en cables de aluminio, redes aéreas (MIE BT 004)

SECCIÓN NOMINAL mm²	TRES CABLES UNIPOLARES (1)					UN CABLE TRIPOLAR O TETRAPOLAR					DOS CABLES UNIPOLARES				UN CABLE BIPOLAR				
	TIPO DE AISLAMIENTO																		
	V	B	D	R	P	V	B	D	R	P	V	B	D	R	V	B	D	R	
10	41	47	48	50	62	39	44	47	48	39	55	62	66	66	51	58	62	62	
16	55	63	65	67	80	51	59	63	64	55	74	82	90	90	66	74	80	80	
25	75	86	90	93	101	68	78	82	86	70	97	113	121	121	90	101	108	108	
35	90	105	110	115	125	82	94	100	105	86	121	136	148	148	109	125	133	133	
50	115	130	135	140	152	100	115	125	130	109	144	164	176	176	129	148	156	156	
70	145	165	175	180	195	130	150	155	165	140	179	207	218	222	160	187	199	199	
95	180	210	215	220	238	160	185	195	205	172	222	253	269	273	199	230	242	242	
120	215	245	255	260	273	185	215	225	235	195	257	296	312	316	230	269	281	281	
150	245	280	290	300	320	215	245	260	275	230	292	335	355	363	265	304	320	324	
185	285	330	345	350	363	245	285	300	315	281	335	382	410	417	304	351	371	378	
240	340	380	400	420	413	290	340	360	370	296	394	452	480	491	359	413	437	441	
300	390	445	465	480	472	335	385	405	425	343	452	523	55,4	569	417	480	507	515	
400	455	515	545	560	527	385	450	475	505	390	519	600	636	655	484	558	593	601	
500	520	595	625	645	581						593	675	714	741					
630	600	680	715	740	632						686	792	842	858					
800					683														
1000					722														

V: Policloruro de vinilo. B: Goma butílica (butil). D: Etileno - propileno. R: Polietileno reticulado. P: Papel impregnado.

(1) Los mismos valores se aplican si se incluye además el conductor neutro.

Para cables bajo tubo el factor de reducción de la intensidad admisible 0,8, y para cables expuestos directamente al sol 0,9.

Para la temperatura de 35°C, según la tabla X de la misma instrucción, el factor de corrección es 1,05 (tabla 2.2).

Para cable bajo tubo el factor de corrección es 0,8.

La intensidad admisible en el cable $I_{ad} = 105 \cdot 1,05 \cdot 0,8 = 88,2 \text{ A}$

2.2-4. Calcular la sección necesaria en tres cables unipolares de aluminio, aislados con polietileno reticulado, 1 kV, expuestos directamente al sol, si por los conductores debe circular una corriente de intensidad 112 A.

Solución: 50 mm².

2.2-5. Un cable tetrapolar de aluminio, trenzado en haz, aislado con polietileno reticulado, debe transportar una intensidad de 70 A, instalado al aire con una temperatura ambiente de 45°C. Calcular la sección del conductor necesaria.

En la tabla IV de la instrucción MIE BT 004, se indica un factor de corrección de 0,95 para 45°C y aislamiento PRC (tabla 2.5).

Tabla 2.5 Factores de corrección en función de la temperatura para cables trenzados

AISLAMIENTO	TEMPERATURA °C						
	20	25	30	35	40	45	50
Policloruro de vinilo.	1,23	1,18	1,12	1,06	1,00	0,93	0,86
Polietileno reticulado o clorosulfonado.	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89

La intensidad mínima que debe admitir el conductor a 40°C $\frac{80}{0,95} = 84,21$ A

La tabla II de la instrucción MIE BT 004, indica que para una sección nominal de 25 mm², el conductor trenzado en haz admite 100 A (tabla 2.6).

Tabla 2.6 Intensidad máxima admisible en cables trenzados

SECCIÓN NOMINAL mm ²	NATURALEZA DEL CONDUCTOR			
	COBRE		ALUMINIO	
	V	R-I	V	R-I
4	36	41	-	-
6	47	52	-	-
10	64	72	50	56
16	86	95	67	75
25	115	130	89	100
35	140	155	110	120
50	170	190	135	150
70	220	245	170	190
95	265	295	205	230
120	-	-	240	265
150	-	-	275	305

R: Policloruro de vinilo. R: Polietileno reticulado. I: Polietileno clorosulfonado.

El conductor será entonces RZ 0,6/1 kV 3×25 Al 54,6 Alm.

2.2-6. Calcular la intensidad admisible en un conductor de aluminio trenzado en haz, aislado con polietileno reticulado, tensión nominal 1 kV, sección 95 mm², a la temperatura de 50°C.

Solución: 204,7 A.

2.2-7. Calcular la máxima intensidad admisible en un cable tetrapolar con conductores de cobre, de sección 3×25+1×16 mm², aislado con PVC, para 1 kV, colocado al aire en contacto con otros dos cables con una temperatura ambiente de 30°C.

Solución: 78 A

2.2-8. Calcular la sección necesaria para la circulación de una corriente de intensidad 110 A, por un cable tripolar de aluminio, aislado con PRC de 1 kV, en instalación enterrada bajo tubo, en un terreno a 30°C con resistividad térmica 165 °C cm/W.

En la tabla V de la instrucción MIE BT 007, se indica un factor de corrección de 0,96 para 30°C y aislamiento PRC (tabla 2.7).

Tabla 2.7 Factores de corrección según la temperatura del terreno (MIE BT 007)

TIPO DE AISLAMIENTO	TEMPERATURA °C								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
V	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,74
B	1,12	1,08	1,04	1,00	0,96	0,91	0,87	0,81	0,76
D	1,11	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78
R	1,11	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78
P	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,74

En la tabla VI de la misma instrucción, para el terreno indicado, el factor de corrección es 0,85 (tabla 2.8).

Tabla 2.8 Factores de corrección según la resistividad térmica del terreno (MIE BT 007)

Resistividad térmica °C cm/W.	85	100	120	140	165	200	230	280
Factor de corrección.	1,06	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70

La intensidad mínima que debe admitir el cable $\frac{I}{0,96 \cdot 0,85} = \frac{110}{0,816} = 134,8$ A

La tabla II de la instrucción MIE BT 007, indica que para un cable tripolar o tetrapolar de aluminio de sección 35 mm², la intensidad máxima permitida es de 140 A, mayor que 134,8 A. La sección de 35 mm² es suficiente por criterio térmico, como se indica en la tabla 2.9).

Tabla 2.9 Intensidades máximas admisibles en cables de aluminio con instalación enterrada

SECCIÓN NOMINAL mm ²	TRES CABLES UNIPOLARES (1)					UN CABLE TRIPOLAR O TETRAPOLAR					DOS CABLES UNIPOLARES				UN CABLE BIPOLAR				
	TIPO DE AISLAMIENTO																		
	V	B	D	R	P	V	B	D	R	P	V	B	D	R	V	B	D	R	
10	66	71	73	75	76	58	64	66	69	56	94	101	105	109	76	82	87	90	
16	86	90	94	97	98	76	82	86	90	74	125	133	140	144	97	109	115	117	
25	110	115	120	125	125	98	105	110	115	98	160	115	179	187	129	137	144	148	
35	130	140	145	150	148	120	130	135	140	117	191	211	218	226	152	168	176	179	
50	155	165	175	180	183	140	150	160	165	148	222	242	254	261	179	195	203	211	
70	190	205	215	220	222	170	190	200	205	179	277	300	312	324	218	238	246	254	
95	225	245	255	260	265	210	225	235	240	211	331	363	374	390	265	285	293	300	
120	260	280	290	295	293	235	260	270	275	238	378	413	425	441	300	324	335	343	
150	290	310	325	330	335	265	290	305	310	273	425	464	476	491	335	363	374	386	
185	325	350	365	375	374	300	330	345	350	308	476	519	538	558	374	406	421	433	
240	380	405	420	430	421	350	380	395	405	347	554	605	624	647	433	472	488	495	
300	430	460	475	485	468	395	430	445	460	390	624	679	702	729	491	530	550	562	
400	480	525	540	550	515	445	480	500	520	433	710	776	800	827	554	605	624	636	
500	535	580	605	615	561	-	-	-	-	-	792	854	885	917	-	-	-	-	
630	600	655	680	690	601	-	-	-	-	-	909	990	1026	1053	-	-	-	-	
800	-	-	-	-	640	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1000	-	-	-	-	679	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

V: Policloruro de vinilo. B: Goma butílica (butil). D: Etileno - propileno. R: Polietileno reticulado. P: Papel impregnado.

(1) Los mismos valores se aplican si se incluye además el conductor neutro.

Para cables instalados bajo tubo el factor de reducción de la intensidad máxima admisible es 0,8.

2.2-9. Calcular la máxima intensidad admisible en un cable tetrapolar de aluminio, aislado con PRC o XLPE, tensión 1 kV, sección 50 mm² y la instalación es enterrada bajo tubo a una temperatura de 25°C.

Solución: 132 A

2.2-10. Calcular la intensidad admisible en un cable tetrapolar de cobre, aislado con PVC, tensión 1 kV, sección 35 mm², si la canalización se realiza en una zanja con otro cable del que está separado 8 cm. Los cables van instalados en tubos y se considera una temperatura del terreno de 30°C.

Según la tabla I de la instrucción MIE BT 007, para conductor de cobre, de sección de 25 mm² se admite una intensidad de 150 A, como se indica en la tabla 2.10.

Tabla 2.10 Intensidades máximas admisibles en cables de cobre con instalación enterrada

SECCIÓN NOMINAL mm ²	TRES CABLES UNIPOLARES (1)					UN CABLE TRIPOLAR O TETRAPOLAR					DOS CABLES UNIPOLARES				UN CABLE BIPOLAR				
	TIPO DE AISLAMIENTO																		
	V	B	D	R	P	V	B	D	R	P	V	B	D	R	V	B	D	R	
6	63	68	70	72	75	56	61	64	66	54	90	98	103	105	75	80	84	86	
10	85	91	94	96	98	75	82	85	88	72	120	130	135	140	98	105	112	115	
16	110	115	120	125	125	97	105	110	115	95	160	170	180	185	125	140	148	150	
25	140	150	155	160	160	125	135	140	150	125	205	225	230	240	165	175	185	190	
35	170	180	185	190	190	150	165	175	180	150	245	270	280	290	195	215	225	230	
50	200	215	225	230	235	180	195	205	215	190	285	310	325	335	230	250	260	270	
70	245	260	270	280	285	220	240	250	260	230	355	385	400	415	280	305	315	325	
95	290	315	325	335	340	265	290	305	310	270	425	465	480	500	340	365	375	385	
120	335	360	375	380	375	305	335	350	355	305	485	530	545	565	385	415	430	440	
150	370	400	415	425	430	340	370	390	400	350	545	595	610	630	430	465	480	495	
185	420	450	470	480	480	385	420	440	450	395	610	665	690	715	480	520	540	555	
240	485	520	540	550	540	445	485	505	520	445	710	775	800	830	555	605	625	635	
300	550	590	610	620	600	505	550	565	590	500	800	870	900	935	630	680	705	720	
400	615	670	690	705	660	570	615	645	665	555	910	995	1025	1060	710	775	800	815	
500	685	745	775	790	720						1015	1095	1135	1175					
630	770	840	870	885	770						1165	1270	1315	1350					
800					820														
1000					870														

V: Policloruro de vinilo. B: Goma butílica (butil). D: Etileno - propileno. R: Polietileno reticulado. P: Papel impregnado.

(1) Los mismos valores se aplican si se incluye además el conductor neutro.

Para cables instalados bajo tubo el factor de reducción de la intensidad máxima admisible 0,8.

El coeficiente de corrección para cable bajo tubo es 0,8, y para dos cables colocados en la misma zanja, la tabla IV de la misma instrucción indica un factor de corrección de 0,85 (tabla 2.11).

Tabla 2.11

Factores de corrección para cables enterrados en la misma zanja

Número de cables o termos.	2	3	4	5
Factor de corrección.	0,85	0,75	0,70	0,60

El factor de corrección para la temperatura de 30°C es de 0,95 (tabla 2.7).

La intensidad admisible por el cable $I_{ad} = 150 \cdot 0,8 \cdot 0,85 \cdot 0,95 = 96,9 \text{ A}$

2.2-11. Calcular la sección necesaria en un cable tripolar de cobre, aislado con etileno-propileno, tensión 1 kV, enterrado directamente en una zanja con terreno de resistividad térmica 200 °C cm/W a una temperatura de 25 °C. La intensidad de línea que debe circular por el conductor es de 100 A.

Solución: 25 mm²

2.2-12. En una canalización bajo tubo con 3 conductores unipolares de cobre de sección 16 mm² aislados con PVC para una tensión de 750 V. Calcular la intensidad admisible con una temperatura ambiente de 35 °C.

En la tabla I de la instrucción MIE BT 017, se indica que la intensidad admisible para 3 conductores de cobre unipolares, sección de 16 mm², bajo tubo, es de 48 A (tabla 2.12).

Tabla 2.12 Intensidad máxima admisible para cables con conductores de cobre (MIE BT 017)

SECCIÓN NOMINAL mm ²	AL AIRE O DIRECTAMENTE EMPOTRADOS						BAJO TUBO O CONDUCTO				
	UN SOLO CABLE			VARIOS CABLES			UN SOLO CABLE			VARIOS CABLES	
	1 UNIPOLAR	1 BIPOLAR	1 TRIPOLAR (1)	2 UNIPOLARES	3 UNIPOLARES (2)		1 UNIPOLAR (2)	1 BIPOLAR	1 TRIPOLAR (1)	2 UNIPOLARES	3 UNIPOLARES (2)
0,5	7,5	5,5	5	6	5,5		7	5	4,5	5,5	5
0,75	10	8	6,5	8,5	7		9	7	6	7,5	6,5
1	13	10,5	9,5	12	9		12	8,5	7,5	9,5	8,5
1,5	17	13	12	15	12		15	12	10	12	11
2,5	23	18	17	21	17		21	16	14	17	15
4	31	25	23	28	23		28	22	19	23	20
6	40	32	29	36	29		34	28	24	29	26
10	55	44	40	50	40		49	38	34	40	36
16	74	59	54	67	54		64	51	44	54	48
25	97	78	71	88	73		85	68	59	71	64
35	120	97	88	110	87		110	83	72	88	78
50	145	115	105	130	110		130	98	85	110	95
70	185	140	120	165	140		160	118	100	135	120
95	225	166	145	200	180		200	140	120	165	145
120	260			235	210		230			190	170
150	300			270	240		265			220	195

(1) Los mismos valores se aplican a cables con cuatro o cinco conductores.

(2) Aplicable para corriente continua y para corriente alterna en tubos de material no ferromagnético.

(3) Los mismos valores se aplican para cuatro o cinco conductores en suministros trifásicos con neutro y/o protección.

Esa instrucción indica un factor de corrección para 30 °C de 1,22 (tabla 2.13).

Tabla 2.13 Factores de corrección según la temperatura ambiente (MIE BT 017)

AISLAMIENTO	TEMPERATURA °C								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
V-G	1,57	1,49	1,40	1,30	1,22	1,13	1,00	0,87	0,71
B-D-R	1,30	1,26	1,21	1,16	1,11	1,06	1,00	0,94	0,89

V: Policloruro de vinilo. G: Goma. B: Goma butílica (butil). D: Etileno-propileno. R: Polietileno reticulado.

La máxima intensidad admisible será $I_{ad} = 48 \cdot 1,22 = 58,56 A$

2.2-13. En una instalación se utilizan 4 conductores (tres fases y neutro) H7OV-U 1×10, bajo tubo. Calcular la máxima intensidad admisible si la temperatura ambiente es 35 °C.

Solución: 40,68 A

2.2-14. Calcular la sección necesaria para transportar una intensidad de 65 A por tres conductores unipolares de cobre, aislados con polietileno reticulado, tensión 750 V, en canalización bajo tubo, junto con otros tres conductores, a la temperatura de 35 °C.

El factor de corrección para canalización bajo tubo para 6 conductores, según la instrucción MIE BT 017, es de 0,9 (tabla 2.14).

Cuando un tubo o conducto contenga más de 3 conductores normalmente recorridos por la corriente (no se tiene en cuenta el neutro ni los conductores de protección), la intensidad admisible se halla con los factores de corrección siguientes:

Tabla 2.14

NÚMERO DE CONDUCTORES	FACTOR DE CORRECCIÓN
De 4 a 7	0,9
Más de 7	0,7

La intensidad mínima que deben admitir los conductores a 40 °C $\frac{65}{0,9} = 72,22 A$

Según la tabla II de la instrucción MIE BT 017, el conductor de cobre, aislado con PRC, goma butílica o etileno-propileno, de sección 16 mm² admite a 40 °C, bajo tubo una intensidad de 76 A (tabla 2.15).

Tabla 2.15

SECCIÓN NOMINAL mm ²	TIPO DE INSTALACIÓN				
	AL AIRE O DIRECTAMENTE EMPOTRADOS		BAJO TUBO O CONDUCTO		
	1 Bipolar	1 Tripolar (1)	1 Bipolar	1 Tripolar (1)	
	2 Unipolares agrupados	3 Unipolares agrupados (2)	2 unipolares agrupados	3 Unipolares agrupados (2)	
1	17	15	15	13	
1,5	22	20	20	18	
2,5	30	27	27	23	
4	40	36	36	31	
6	52	47	47	41	
10	72	64	64	57	
16	96	86	86	76	
25	128	114	114	101	
35	157	141	141	124	
50	191	171	171	151	
70	243	218	218	192	
95	294	264	264	232	

(1) Los mismos valores se aplican para cables de cuatro conductores, constituidos por tres fases y neutro o tres fases y neutro y protección. También se aplican a cables de cinco conductores, tres fases, neutro y protección.

(2) Los mismos valores se aplican al agrupamiento de cuatro conductores para suministros trifásicos con neutro o a cinco conductores para suministros trifásicos con neutro y protección.

2.2-15. Calcular la intensidad permitida en un cable tetrapolar con conductores de cobre, aislado con etileno-propileno, tensión 750 V, sección 35 mm² en instalación bajo tubo a una temperatura de 25 °C.

Solución: 143,84 A

2.3. CÁLCULO DE LÍNEAS POR CAÍDA DE TENSIÓN

La sección del conductor es función de la caída de tensión admisible en la línea. Las empresas distribuidoras de energía eléctrica suelen limitar la caída de tensión en las líneas distribuidoras de B.T. como máximo a un 5%. Según el Reglamento de Verificaciones Eléctricas (artículo 65) la máxima variación de tensión entre los terminales de toma del usuario no debe ser superior a $\pm 7\%$. En las instalaciones interiores según la instrucción MIE BT 017, la caída de tensión desde el origen de la instalación, considerando todos los aparatos susceptibles de funcionar simultáneamente, debe ser inferior al 3% para alumbrado y al 5% para los demás usos.

En las líneas de poca longitud, el criterio de calentamiento suele dar secciones con las que se obtienen caídas de tensión inferiores a las permitidas. En las líneas largas, por el criterio de caída de tensión se suelen obtener secciones que permiten más intensidad que la que circulará por el conductor.

En el cálculo de las líneas de B.T. deben tenerse en cuenta los dos criterios y escoger la sección normalizada superior o igual a la más elevada que resulte. El cálculo se puede realizar de dos formas:

- 1) *Cálculo preliminar.* Fijada la máxima caída de tensión admisible en las condiciones de la instalación y la carga, se realiza el cálculo de la sección y se evalúa si la intensidad permitida por calentamiento es superior a la que circulará por el conductor.
- 2) *Cálculo de comprobación.* Fijada la sección del conductor y la carga de la instalación, se verifica que la caída de tensión es admisible y que la intensidad permitida por calentamiento es superior a la de carga.

De no cumplirse las condiciones es necesario aumentar la sección hasta otra normalizada que verifique esas condiciones.

2.4. CÁLCULO DE LÍNEAS DE BAJA TENSIÓN EN CORRIENTE ALTERNA CON CARGA ÚNICA

La línea puede ser monofásica o trifásica y su sección se calcula en función de la intensidad de corriente que circula por ella o de la potencia que consumen los receptores.

- 1) *Cálculo de una línea monofásica.*

- a) En función de la intensidad $s = \frac{2LI \cos \varphi}{cu}$

- s : Sección del conductor (mm²).
 L : Longitud de la línea (m).
 I : Intensidad eficaz (A).
 $\cos \varphi$: Factor de potencia.
 u : Caída de tensión en la línea (V).
 c : Conductividad del conductor.

$$\text{Para el cobre } c = 56 \frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2}$$

$$\text{Para el aluminio } c = 35 \frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2}$$

- b) En función de la potencia $s = \frac{2LP}{cuV}$

P : Potencia de consumo (W).

V : Tensión de la línea (V).

DEMOSTRACIÓN

Según el diagrama de la figura 2.1, la caída de tensión en la línea con carga inductiva, se puede considerar prácticamente como el producto la resistencia de los conductores de la línea por la intensidad activa:

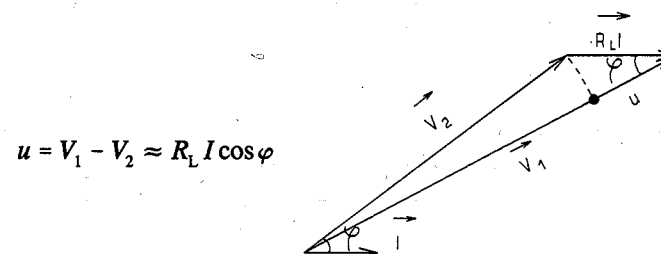


Fig. 2.1

$$\text{La resistencia de la línea: } R_L = \rho \frac{2L}{s} = \frac{2L}{cs}$$

$$\text{Entonces: } u = \frac{2LI \cos \varphi}{cs}$$

$$\text{La sección de conductor: } s = \frac{2LI \cos \varphi}{cu}$$

$$\text{La potencia activa: } P = VI \cos \varphi; \quad I \cos \varphi = \frac{P}{V}$$

$$\text{La sección del conductor en función de la potencia: } s = \frac{2LP}{cuV}$$

2) Cálculo de una línea trifásica.

$$a) \text{ En función de la intensidad } s = \frac{\sqrt{3} L I_L \cos \varphi}{cu}$$

I_L : Intensidad de línea (A).

u : Caída de tensión de línea (V).

$$b) \text{ En función de la potencia } s = \frac{LP}{cu V_L}$$

V_L : Tensión de línea (V).

DEMOSTRACIÓN

En la línea trifásica se tiene en cuenta solamente el conductor de fase $s = \frac{LP}{cu V_L}$

Sustituyendo el valor de la potencia activa $P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi$

$$\text{La sección en función de la intensidad } s = \frac{\sqrt{3} L I_L \cos \varphi}{cu}$$

La sección mínima del conductor neutro se adopta de acuerdo con la sección calculada para los conductores de fase, según las instrucciones MIE BT 003 (líneas aéreas) y MIE BT 005 (líneas subterráneas):

- A dos o a tres hilos (fase y neutro o dos fases y neutro): Igual a la del conductor de fase.
- A cuatro hilos (tres fases y neutro): Igual a la sección de los conductores de fase hasta 10 mm² para el cobre y 16 mm² para el aluminio. Para secciones superiores, la sección del neutro será la mitad de la de los conductores de fase, con un mínimo de 10 mm² para el cobre y 16 mm² para el aluminio.

Cuando en la línea trifásica se prevén fuertes desequilibrios de carga, se suele adoptar una sección de 1,2 veces la determinada por cálculo.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.4-1. Calcular la sección de los conductores de una línea monofásica de 220 V, 50 Hz, con una caída de tensión del 1% y que alimenta una instalación que consume 30 A con un factor de potencia unidad. Los conductores son de cobre, unipolares, aislados con PVC, 750 V, y la canalización es empotrada bajo tubo, de longitud 40 m.

$$\text{La caída de tensión: } u = \frac{1 \cdot 220}{100} = 2,2 \text{ V}$$

$$\text{La sección de los conductores: } s = \frac{2 L I \cos \varphi}{cu} = \frac{2 \cdot 40 \cdot 30 \cdot 1}{56 \cdot 2,2} = 19,48 \text{ mm}^2$$

La sección comercial más próxima por exceso es 25 mm², que según la instrucción MIE BT 017, considerando una temperatura ambiente de 40°C, admite una intensidad de 71 A, mayor que los 30 A que circularán por el conductor (tabla. 2.12).

2.4-2. Una línea monofásica de 220 V, 50 Hz, alimenta una instalación que consume 15 A con un factor de potencia de 0,9 en retraso. Los conductores son de cobre, unipolares, aislados con policloruro de vinilo, para 750 V y la canalización es empotrada bajo tubo, de longitud 25 m. Calcular la sección de los conductores admitiendo una caída de tensión del 0,5 %

Solución: 16 mm²

2.4-3. Calcular la sección de los conductores de cobre, unipolares, aislados con PVC, 750 V, en canalización interior empotrada bajo tubo, de longitud 20 m, que alimenta una instalación monofásica de 220 V, 4 kW y factor de potencia 0,86. La caída de tensión admisible es el 2%.

$$\text{La caída de tensión: } u = \frac{2 \cdot 220}{100} = 4,4 \text{ V}$$

$$\text{La sección del conductor: } s = \frac{2LP}{cuV} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 4000}{56 \cdot 4,4 \cdot 220} = 2,95 \text{ mm}^2$$

La sección comercial más próxima por exceso es 4 mm², que según la instrucción MIE BT 017, admite una intensidad (tabla 2.12), a temperatura ambiente de 40°C, de 23 A.

La intensidad que consume el receptor:

$$P = VI \cos \varphi; I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{4000}{220 \cdot 0,86} = 21,14 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la intensidad admisible, por lo que la sección de 4 mm² es válida. Si la intensidad de consumo del receptor fuese mayor de la permitida por el R.E.B.T. para esa sección, habría que escoger una sección comercial mayor, hasta que el conductor pudiese transportar la intensidad de consumo.

2.4-4. Una línea monofásica de longitud 20 m está formada por conductores de cobre de 16 mm² de sección y alimenta a la tensión de 220 V una vivienda de electrificación especial (potencia de consumo 10 kW y factor de potencia 1). Calcular la caída de tensión en la línea.

Solución: 0,92%

2.4-5. Calcular la sección de la línea de alimentación a un receptor trifásico de 10 kW, 380 V, $\cos \varphi = 0,8$, conectado a una red trifásica de 380 V, 50 Hz. La línea está formada por un cable tripolar, de longitud 40 m, con conductores de cobre aislados con PVC, 750 V, en canalización interior bajo tubo en montaje superficial. La caída de tensión admisible es del 1%.

$$\text{La caída de tensión } u = \frac{1 \cdot 380}{100} = 3,8 \text{ V}$$

$$\text{La sección de los conductores } s = \frac{LP}{cuV_L} = \frac{40 \cdot 10000}{56 \cdot 3,8 \cdot 380} = 4,94 \text{ mm}^2$$

La sección comercial más próxima por exceso es 6 mm², que según el R.E.B.T., instrucción 017, admite una intensidad de 24 A (tabla 2.12).

La intensidad absorbida por el receptor:

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi; \quad I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi} = \frac{10\,000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 19 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la admitida por el R.B.T., por lo que la sección es válida.

2.4-6. Calcular la longitud máxima que puede tener una línea trifásica, con conductores de cobre de 10 mm² de sección, que alimenta a un receptor de 7 kW, 380 V y factor de potencia 0,9 inductivo. La caída de tensión no debe sobrepasar el 1%.

Solución: 115,5 m

2.4-7. Una instalación trifásica que consume una intensidad de 48 A con un factor de potencia 0,9 y tensión de línea 380 V, está alimentada por una línea trifásica de longitud 60 m, formada por conductores de aluminio de sección 16 mm². Calcular la caída de tensión en la línea en tanto por cien.

De la fórmula del cálculo de la sección se obtiene la caída de tensión.

$$u = \frac{\sqrt{3} L I_L \cos \varphi}{c s} = \frac{\sqrt{3} \cdot 60 \cdot 48 \cdot 0,9}{35 \cdot 16} = 8 \text{ V}$$

$$\text{La caída de tensión porcentual } u\% = \frac{u \cdot 100}{V_L} = \frac{8 \cdot 100}{380} = 2,1\%$$

2.4-8. Un receptor trifásico consume una intensidad de 32 A con factor de potencia 0,8 inductivo. Está alimentado por una línea formada por un cable tripolar con conductores de cobre, aislados con XLPE, tensión de aislamiento 550 V, en instalación interior bajo tubo empotrado, de longitud 40 m. La tensión de línea es 380 V y la caída de tensión permitida del 1,5%. Calcular la sección de los conductores.

Solución: 10 mm²

2.4-9. Calcular la sección de la línea trifásica, formada por un cable tetrapolar con conductores de cobre, aislado con PRC, para una tensión de 1 kV, en canalización bajo tubo. La línea alimenta a 380 V, 50 Hz, una instalación en la que se considera un consumo de 78 A con un factor de potencia 0,86 inductivo. En la instalación se prevén desequilibrios de carga entre las fases, por lo que se incrementa la sección calculada en un 20%. La longitud de la línea es de 70 m y la máxima caída de tensión permitida es del 1%.

Solución: 50 mm²

2.5. CÁLCULO DE LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN ABIERTAS DE SECCIÓN UNIFORME

La línea (fig. 2.2), puede ser monofásica o trifásica y su sección puede calcularse en función de la intensidad de corriente que circula por ella o de la potencia que consumen los receptores.

1) Cálculo de una línea monofásica.

a) En función de la potencia. Cuando las cargas de los receptores vienen dadas en potencias, como la caída de tensión debe ser relativamente pequeña, puede tomarse para todos los receptores la misma tensión, igual a la nominal de la línea:

$$s = \frac{2 (L_1 P_1 + L_2 P_2 + \dots L_n P_n)}{c u V} = \frac{2 \sum (L P)}{c u V}$$

P : Potencia que consume cada receptor conectado (W).

L : Longitud de la línea, del extremo de alimentación a cada receptor (m).

V : Tensión de la línea (V).

s : Sección del conductor (mm²).

u : Caída de tensión en la línea (V).

c : Conductividad del conductor (m/Ωmm²).

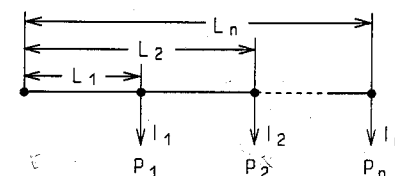


Fig. 2.2

b) En función de la intensidad $s = \frac{2 \sum (L I \cos \varphi)}{c u}$

I : Intensidad eficaz de cada receptor (A).

$\cos \varphi$: Factor de potencia de cada receptor.

DEMOSTRACIÓN

La caída de tensión total es la suma de las caídas de tensión en cada tramo de la línea. Siendo las longitudes de cada tramo de la línea (fig. 2.2) l_1, l_2, \dots, l_n , la caída de tensión:

$$u = \frac{2 l_1 (P_1 + P_2 + \dots P_n)}{c s V} + \frac{2 l_2 (P_2 + \dots P_n)}{c s V} + \dots \frac{2 l_n P_n}{c s V}$$

$$u = \frac{2 l_1 P_1 + 2 (l_1 + l_2) P_2 + \dots 2 (l_1 + l_2 + \dots l_n) P_n}{c s V}$$

Las longitudes al origen de la línea:

$$L_1 = l_1$$

$$L_2 = l_1 + l_2$$

$$L_n = l_1 + l_2 + \dots l_n$$

$$\text{La caída de tensión: } u = \frac{2 L_1 P_1 + 2 L_2 P_2 + \dots 2 L_n P_n}{c s V} = \frac{2 \sum (L P)}{c s V}$$

$$\text{La sección: } s = \frac{2 \sum (L P)}{c u V}$$

Al producto LP se le llama momento eléctrico, por analogía con el momento de una fuerza en mecánica.

Sustituyendo el valor de la potencia $P = VI \cos \varphi$, en la fórmula de la sección.

$$s = \frac{2 \sum (L V I \cos \varphi)}{c u V} = \frac{2 V \sum (L I \cos \varphi)}{c u V} = \frac{2 \sum (L I \cos \varphi)}{c u}$$

2) Cálculo de una línea trifásica.

a) En función de la potencia $s = \frac{\sum(LP)}{cuV_L}$

V_L : Tensión de línea (V).

u : Caída de tensión de línea (V).

b) En función de la intensidad $s = \frac{\sqrt{3} \sum(LI_L \cos \varphi)}{cu}$

I_L : Intensidad de línea de cada receptor(A).

Para comprobar que la densidad de corriente en cada tramo de la línea no sobrepasa los valores permitidos por el Reglamento Electrotécnico de B.T. del Ministerio de Industria, se suele considerar las intensidades de carga sin descomponerlas en sus componentes activas y reactivas, con lo que las intensidades de corriente serán consideradas por exceso.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.5-1. Calcular la sección de la línea monofásica representada en la figura 2.3. Los conductores son de cobre, unipolares, aislados con PVC, 750 V, en canalización

bajo tubo, la tensión 220 V y la caída de tensión máxima 1,5%.

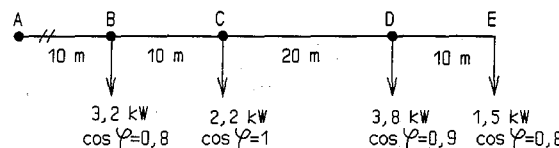


Fig. 2.3

La caída de tensión en la línea: $u = \frac{1,5 \cdot 220}{100} = 3,3 \text{ V}$

La sección del conductor: $s = \frac{2 \sum(LP)}{cuV}$

$$10 \cdot 3 \cdot 200 = 32 \text{ 000}$$

$$20 \cdot 2 \cdot 200 = 44 \text{ 000}$$

La suma de momentos: $\sum LP$ $40 \cdot 3 \cdot 800 = 152 \text{ 000 m} \cdot \text{W}$

$$50 \cdot 1 \cdot 500 = 75 \text{ 000}$$

$$303 \text{ 000}$$

La sección: $s = \frac{2 \sum(LP)}{cuV} = \frac{2 \cdot 303 \text{ 000}}{56 \cdot 3,3 \cdot 220} = 14,9 \text{ mm}^2$

La sección comercial inmediatamente superior es de 16 mm², que según el Reglamento de B.T. (MIE BT 017) admite una intensidad de 54 A (tabla 2.12).

La intensidad que circula por el tramo AB, es la intensidad de toda la línea, que suponemos con el factor de potencia más desfavorable 0,8:

$$I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{3 \cdot 200 + 2 \cdot 200 + 3 \cdot 800 + 1 \cdot 500}{220 \cdot 0,8} = \frac{10 \cdot 700}{220 \cdot 0,8} = 60,79 \text{ A}$$

Esta intensidad es mayor que la permitida por el conductor por lo que se escoge la sección inmediatamente superior $s=25 \text{ mm}^2$, que permite el paso de una intensidad (MIE BT 017) de 71 A (tabla 2.12).

2.5-2. Calcular la caída de tensión en la línea monofásica 220 V, 50 Hz, de la figura 2.4, con conductor RZ 0,6/1 kV 2×25 Al.

Solución: 3,4%

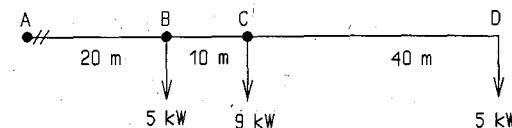


Fig. 2.4

2.5-3. La línea trifásica, de tensión de línea 380 V, representada en la figura 2.5, está formada por conductores de cobre, unipolares, de sección 25 mm², aislados con PVC en instalación bajo tubo. Calcular la caída de tensión.

La suma de momentos:

$$\sum(LP)$$

$$20 \cdot 5 \text{ 000} = 100 \text{ 000}$$

$$30 \cdot 10 \text{ 000} = 300 \text{ 000}$$

$$50 \cdot 5 \text{ 000} = 250 \text{ 000 m} \cdot \text{W}$$

$$80 \cdot 4 \text{ 000} = 320 \text{ 000}$$

$$970 \text{ 000}$$

La sección: $s = \frac{\sum(LP)}{cuV_L}$

La caída de tensión: $u = \frac{\sum(LP)}{csV_L} = \frac{970 \text{ 000}}{56 \cdot 25 \cdot 380} = 1,82 \text{ V}$

En tanto por cien: $u\% = \frac{u \cdot 100}{V_L} = \frac{1,82 \cdot 100}{380} = 0,48\%$

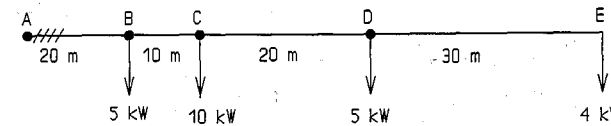


Fig. 2.5

2.5-4. En la línea trifásica de la figura 2.6, de 380 V, 50 Hz, con conductores de aluminio trenzados en haz aislados con PRC. Calcular:

a) Momento eléctrico total.

b) Sección de los conductores de fase,

admitiendo una caída de tensión del 5%. y un factor de potencia global para todas las cargas 0,9.

Solución: a) 17,5 km·kW; b) 70 mm²

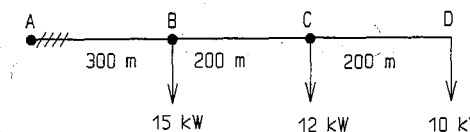


Fig. 2.6

2.5-5. La línea trifásica representada en la figura 2.7, está alimentada con una tensión de línea de 380 V. Los conductores serán de aluminio, trenzados en haz, aislados con polietileno reticulado, en instalación aérea. La caída de tensión admitida es del 2% y las cargas son inductivas. Calcular la sección:

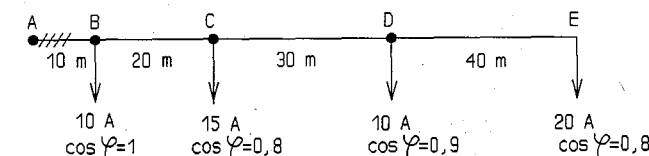


Fig. 2.7

La caída de tensión en la línea: $u = \frac{2 \cdot 380}{100} = 7,6 \text{ V}$

La sección: $s = \frac{\sqrt{3} \sum (L I_L \cos \varphi)}{cu}$

La suma de momentos: $\sum L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$

$$\begin{aligned} 10 \cdot 10 \cdot 1 &= 100 \\ 30 \cdot 15 \cdot 0,8 &= 360 \\ 60 \cdot 10 \cdot 0,9 &= 540 \text{ m} \cdot \text{A} \\ 100 \cdot 20 \cdot 0,8 &= 1600 \\ &2600 \end{aligned}$$

La sección del conductor de fase: $s = \frac{\sqrt{3} \sum (L I_L \cos \varphi)}{cu} = \frac{\sqrt{3} \cdot 2600}{35 \cdot 7,6} = 16,93 \text{ mm}^2$

Según El R.B.T. (MIE BT 004), la sección del conductor más próxima por exceso es 25 mm^2 , que admite 100 A (tabla 2.6).

La intensidad que circula por el primer tramo AB (tramo más desfavorable) es la intensidad correspondiente a todas las cargas, que para simplificar consideramos en fase, dando así un valor por exceso.

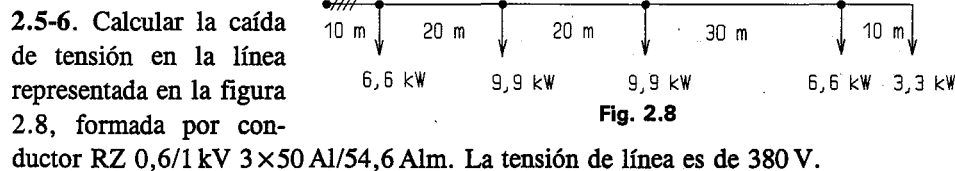
$$I_L = 10 + 15 + 10 + 20 = 55 \text{ A}$$

Valor inferior al que admite el conductor, por lo que los conductores de la línea serán RZ 0,6/1 kV $3 \times 25/54,6$ Alm.

Para hallar el valor exacto de la intensidad total, se descomponen las intensidades en sus componentes activas y reactivas o se utilizan números complejos. Así, sumando las intensidades de línea en forma compleja, se obtiene la intensidad de línea total.

$$\begin{aligned} I_{L1} &= 10 + 0j \\ I_{L2} &= 12 - 9j \\ I_{L3} &= 9 - 4,36j \\ I_{L4} &= 16 - 12j \\ I_L &= 47 - 25,36j = 53,4 \angle -28,35^\circ \end{aligned}$$

El valor de la intensidad de línea es inferior al valor hallado considerando todas las intensidades en fase. Para simplificar los cálculos, en la práctica, se desprecia esta diferencia y se calcula la intensidad por exceso.



Solución: 0,66%

2.6. CÁLCULO DE LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN ABIERTAS DE SECCIÓN NO UNIFORME

Con secciones de la línea proporcionales a la intensidad o potencia que soportan se consigue mayor economía que con líneas de sección uniforme. La sección más

económica será aquella que de lugar a un volumen de material mínimo.

En la práctica se divide la línea en tramos que se calculan independientemente, considerando todas las cargas que soporta y su caída de tensión.

La caída de tensión total debe ser la suma de las caídas de tensión parciales, desde el origen al extremo de la línea.

Para una línea de finales ramificados como la de la figura 2.9, la caída de tensión u_1 en el tramo inicial AB, que da lugar a un volumen mínimo, siendo u la caída de tensión total, se calcula:

$$u_1 = \frac{u}{1 + \sqrt{\frac{C \cdot L_{BC} + D \cdot L_{BD}}{B \cdot L_{AB}}}}$$

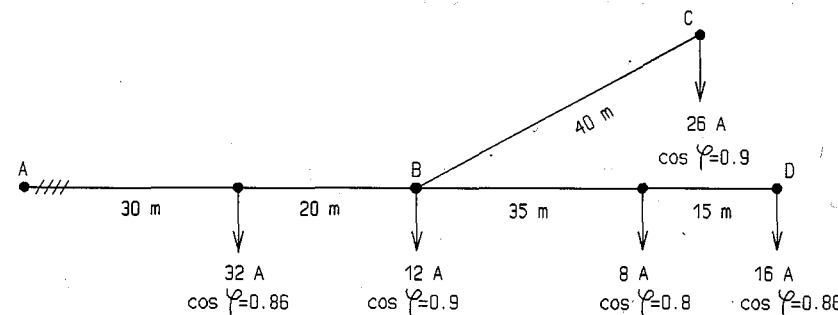
Siendo B , C y D los momentos eléctricos de los tramos AB, BC y BD.

$$B = \sum (L I \cos \varphi)_{AB} \quad C = \sum (L I \cos \varphi)_{BC} \quad D = \sum (L I \cos \varphi)_{BD}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.6-1. En la línea trifásica a 380/220 V, de la figura 2.10, con conductores de cobre, se admite una caída de tensión total del 2%. Calcular:

- Caída de tensión en los tramos AB, BC y BD para un volumen mínimo de cobre.
- Sección teórica del conductor de fase en cada tramo.



a) El momento eléctrico en los distintos tramos, considerando la intensidad de línea.

$$B = \sum (L I_L \cos \varphi)_{AB} = 30 \cdot 32 \cdot 0,86 + 50 \cdot (12 \cdot 0,9 + 8 \cdot 0,8 + 16 \cdot 0,86 + 26 \cdot 0,9) = 3543,6 \text{ A} \cdot \text{m}$$

$$C = \sum (L I_L \cos \varphi)_{BC} = 40 \cdot 26 \cdot 0,9 = 936 \text{ A} \cdot \text{m}$$

$$D = \sum (L I_L \cos \varphi)_{BD} = 35 \cdot 8 \cdot 0,8 + 50 \cdot 16 \cdot 0,86 = 912 \text{ A} \cdot \text{m}$$

La caída de tensión total: $u = 2 \cdot \frac{380}{100} = 7,6 \text{ V}$

La caída de tensión en el tramo AB:

$$u_1 = \frac{u}{1 + \sqrt{\frac{C \cdot L_{BC} + D \cdot L_{BD}}{B \cdot L_{AB}}}} = \frac{7,6}{1 + \sqrt{\frac{40 \cdot 936 + 50 \cdot 912}{50 \cdot 3543,6}}} = 4,51 \text{ V}$$

La caída de tensión en los tramos BC y BD $u_2 = 7,6 - 4,51 = 3,09 \text{ V}$

b) La sección en el tramo AB:

$$s_{AB} = \frac{\sqrt{3} \sum (L I_L \cos \varphi)_{AB}}{c u_1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 3543,6}{56 \cdot 4,51} = 24,3 \text{ mm}^2$$

La sección en el tramo BC:

$$s_{BC} = \frac{\sqrt{3} \sum (L I_L \cos \varphi)_{BC}}{c u_2} = \frac{\sqrt{3} \cdot 936}{56 \cdot 3,09} = 9,37 \text{ mm}^2$$

La sección en el tramo BD:

$$s_{BD} = \frac{\sqrt{3} \sum (L I_L \cos \varphi)_{BD}}{c u_2} = \frac{\sqrt{3} \cdot 912}{56 \cdot 3,09} = 9,13 \text{ mm}^2$$

Es necesario escoger las secciones comerciales más próximas por exceso y comprobar que la intensidad de corriente que circula por cada tramo está permitida por el R.B.T. Con empleo de estas nuevas secciones las caídas de tensión serán distintas y también el volumen de material conductor.

2.6-2. Calcular la caída de tensión y la sección teórica en los tramos AB, BC y BD de la línea monofásica a 220 V de la figura 2.11, con conductores de cobre, para que el volumen de material sea mínimo. La caída de tensión máxima admisible es del 2% y el factor de potencia común para todas las carga 0,8 inductivo.

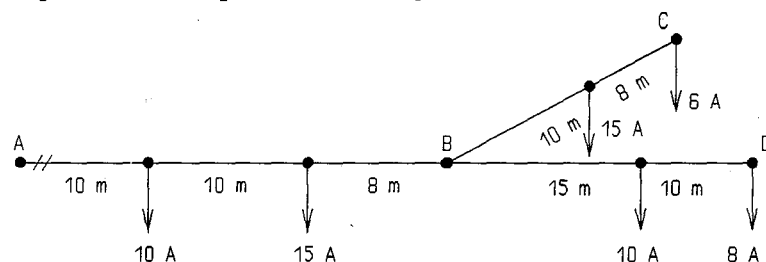


Fig. 2.11

Solución: $u_1 = 2,81 \text{ V}$; $s_{AB} = 15,17 \text{ mm}^2$; $s_{BC} = 4,64 \text{ mm}^2$; $s_{BD} = 6,29 \text{ mm}^2$

2.6-3. La línea trifásica a 380 V, representada en la figura 2.12, se quiere realizar con conductores unipolares de cobre H07VU, en instalación empotrada bajo tubo. Calcular la sección de los tramos AD, DH y DF, considerando las caídas de tensión porcentuales indicadas y un factor de potencia común a todas las cargas de 0,8.

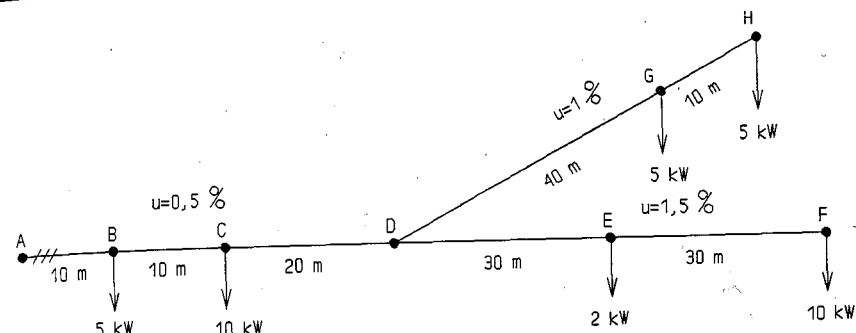


Fig. 2.12

La caída de tensión en el tramo AD:

$$u_1 = \frac{0,5 \cdot 380}{100} = 1,9 \text{ V}$$

Considerando en el punto D toda la carga conectada a este punto fuera del tramo $2 + 10 + 5 + 5 = 22 \text{ kW}$.

$$\text{La sección } s_1 = \frac{\sum (LP)_1}{c u_1 V_L} = \frac{10 \cdot 5000 + 20 \cdot 10000 + 40 \cdot 22000}{56 \cdot 1,9 \cdot 380} = 27,95 \text{ mm}^2$$

Según la instrucción MIE BT 017 la sección normalizada inmediatamente superior es de 35 mm^2 , que admite, a la temperatura ambiente de 40°C , la intensidad de 78 A (tabla 2.12).

Las intensidad que circula por el tramo AB es la intensidad total

$$I_{L1} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos \varphi} = \frac{(5 + 10 + 22) \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 70,27 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 35 mm^2 , por lo que se elige para el tramo AD esta sección.

$$\text{La caída de tensión en el tramo DH } u_2 = \frac{1 \cdot 380}{100} = 3,8 \text{ V}$$

$$\text{La sección } s_2 = \frac{\sum (LP)_2}{c u_2 V_L} = \frac{40 \cdot 5000 + 50 \cdot 5000}{56 \cdot 3,8 \cdot 380} = 5,56 \text{ mm}^2$$

Según el R.B.T. (MI BT 017) la sección normalizada inmediatamente superior es de 6 mm^2 que admite una intensidad de 26 A (tabla 2.12).

Las intensidad que circula por el tramo DG es la intensidad total de la derivación DH.

$$I_{L2} = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos \varphi} = \frac{(5 + 5) \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 19 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 6 mm^2 por lo que se elige para el tramo DH esta sección.

$$\text{La caída de tensión en el tramo DF } u_3 = \frac{1,5 \cdot 380}{100} = 5,7 \text{ V}$$

$$\text{La sección } s_3 = \frac{\sum (LP)_3}{cu_3 V_L} = \frac{30 \cdot 2000 + 60 \cdot 10000}{56 \cdot 5,7 \cdot 380} = 5,44 \text{ mm}^2$$

Según el R.B.T. (MI BT 017) la sección normalizada inmediatamente superior es de 6 mm² que admite una intensidad de 26 A (tabla 2.12).

Las intensidad por el tramo DE es la intensidad total de la derivación DF.

$$I_{L3} = \frac{P_3}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos \varphi} = \frac{(2 + 10) \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 22,8 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 6 mm² por lo que se elige para el tramo DF esta sección.

2.6-4. La línea monofásica, representada en la figura 2.13, está formada por un cable, con dos conductores de cobre, aislados con polietileno reticulado en instalación superficial. La tensión es de 220 V y las secciones están indicadas. Calcular la caída de tensión en los tramos AD, DG y DF.

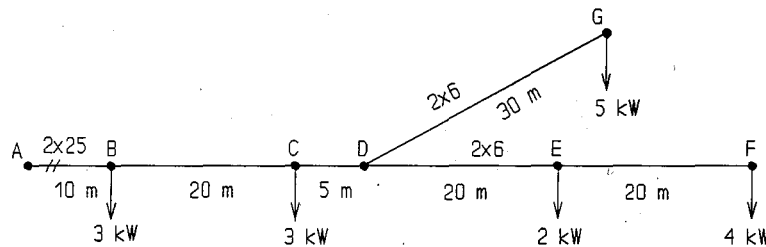


Fig. 2.13

Solución: $u_{AD}=1,49\%$; $u_{DG}=1,84\%$; $u_{DF}=2,46\%$

2.6-5. Una línea de distribución en BT está formada por conductores de aluminio trenzados en haz, con las secciones y disposición indicada en la figura 2.14. Calcular las caídas de tensión en los distintos tramos y la máxima caída de tensión. Tensión de alimentación 380/220 V.

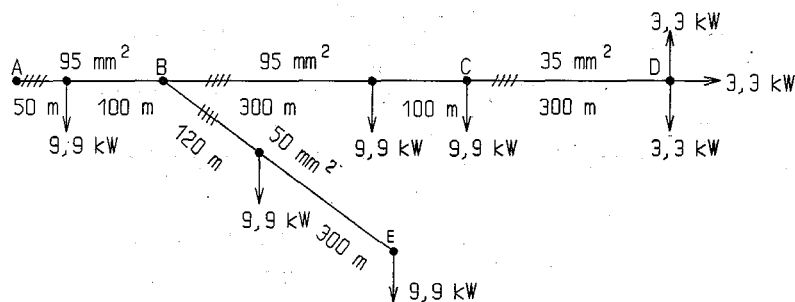


Fig. 2.14

Solución: $u_{AB}=1,65\%$; $u_{BC}=2,27\%$; $u_{CD}=1,68\%$; $u_{BE}=2,12\%$; $u_{AD}=5,6\%$

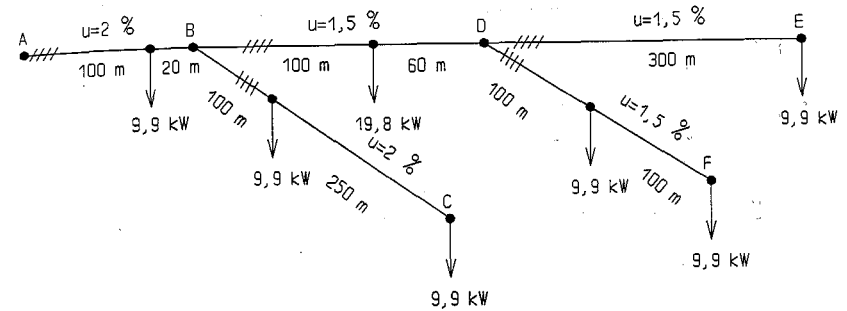


Fig. 2.15

2.6-6. Calcular la sección de los distintos tramos de la línea de distribución trifásica indicada en la figura 2.15. El conductor es de aluminio trenzado en haz, aislado con polietileno reticulado, para instalación al aire. La tensión de línea es 380 V y la caída de tensión máxima es la indicada en cada tramo. Se considera un factor de potencia unidad para todas las cargas.

Solución: $s_{AB}=s_{BD}=95 \text{ mm}^2$; $s_{BC}=s_{DE}=s_{DF}=50 \text{ mm}^2$

2.7. CÁLCULO DE LÍNEAS DE SECCIÓN UNIFORME, ALIMENTADAS POR DOS EXTREMOS A LA MISMA TENSIÓN

Considerando una línea de longitud L , alimentada por sus dos extremos A y A' (fig. 2.16), se procede de la forma siguiente:

Se halla el *punto de mínima tensión M* (que recibe corriente por los dos lados), el cual divide la línea en dos líneas abiertas de sección uniforme.

Para ello se calcula la carga que soporta cada extremo:

a) En función de la potencia que consumen los receptores:

$$P_{A'} = \frac{\sum (PL)}{L} \quad P_A = \sum P - P_{A'}$$

b) En función de la intensidad de corriente $I_{A'} = \frac{\sum (LI)}{L} \quad I_A = \sum I - I_{A'}$

En corriente alterna se utilizan intensidades activas.

La carga suministrada por un extremo se calcula sumando los momentos de las cargas respecto al otro extremo y dividiendo por la longitud total de la línea.

DEMOSTRACIÓN

Considerando una línea alimentada por los dos extremos A y A' a la misma tensión, con una carga intermedia (fig. 2.17), la caída de tensión total entre A y A' es nula por estar los dos puntos a la misma

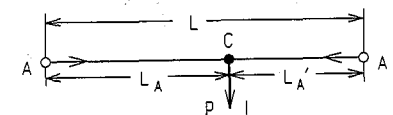


Fig. 2.17

tensión. Cada extremo suministra una potencia P_A y $P_{A'}$, de forma que la potencia de la carga $P = P_A + P_{A'}$.

$$u = \frac{2L_A P_A}{cSV} - \frac{2L_{A'} P_{A'}}{cSV} = 0; \quad L_A P_A = L_{A'} P_{A'}$$

La potencia suministrada por el extremo A' :

$$P_{A'} = P - P_A; \quad P_{A'} = P - \frac{L_{A'} P_{A'}}{L_A}; \quad P_{A'} = \frac{L_A P}{L_A + L_{A'}} = \frac{L_A P}{L}$$

Para una línea con varias cargas $P_{A'} = \frac{\sum(LP)}{L}$; $P_A = \sum P - P_{A'}$

Se calcula la *sección* de una de las líneas abiertas, considerando en ella toda la caída de tensión. Esta sección es la de la línea cerrada.

En estas líneas de corriente alterna se suele hacer los cálculos solamente con las corrientes de carga, sin tener en cuenta la división de estas corrientes en sus componentes activas y reactivas. De esta forma las densidades de corriente calculadas en los conductores serán algo superiores a las verdaderas.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.7-1. Calcular la sección de la línea trifásica de cobre representada en la figura 2.18. Los conductores forman un cable tetrapolar aislado con PRC, para 1 kV, en instalación bajo tubo. La tensión de línea es 380 V y la caída de tensión máxima admisible 2%. Se considera un factor de potencia común para todas las cargas de 0,8 inductivo.

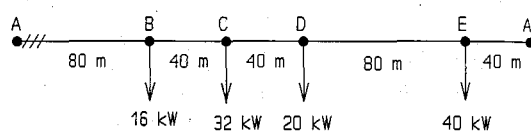


Fig. 2.18

Se calcula la carga que soporta cada extremo en función de la potencia que consumen los receptores:

$$P_{A'} = \frac{\sum(LP)}{L} = \frac{80 \cdot 16\,000 + 120 \cdot 32\,000 + 160 \cdot 20\,000 + 240 \cdot 40\,000}{280} = 64\,000 \text{ W} = 64 \text{ kW}$$

$$P_A = \sum P - P_{A'} = 108 - 64 = 44 \text{ kW}$$

El punto de mínima tensión es C, que recibirá desde A una potencia de 28 kW y desde A' una potencia de 4 kW.

Se calcula la sección de una de las líneas abiertas, considerando en ella toda la caída de tensión. Esta sección es la de toda la línea.

Considerando el tramo AC:

$$\text{La caída de tensión en el tramo } u = \frac{2 \cdot 380}{100} = 7,6 \text{ V}$$

$$\text{La sección } s = \frac{\sum(LP)}{cuV_L} = \frac{80 \cdot 16\,000 + 120 \cdot 28\,000}{56 \cdot 7,6 \cdot 380} = 28,7 \text{ mm}^2$$

Según el R.B.T. (MI BT 004) la sección normalizada inmediatamente superior es de 35 mm², que admite una intensidad de 135 A (tabla 2.3).

La intensidad que circula por el tramo AB es la total de la derivación AC.

$$I_{L1} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{(16 + 28) \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 83,56 \text{ A}$$

Las intensidad por el tramo $A'E$ es la intensidad total de la derivación $A'C$.

$$I_{L2} = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{(40 + 20 + 4) \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 121,55 \text{ A}$$

Teniendo en cuenta el factor de corrección 0,8 por ir la instalación bajo tubo. La intensidad mínima que debe admitir el cable al aire.

$$\frac{121,55}{0,8} = 151,93 \text{ A}$$

Esta intensidad es mayor que la permitida por el conductor de 35 mm² por lo que se elige el conductor de sección 50 mm², que según el R.B.T. (MI BT 004) admite a la temperatura de 40 °C, 165 A (tabla 2.3).

La sección de los conductores activos o de fase de la línea es de 50 mm².

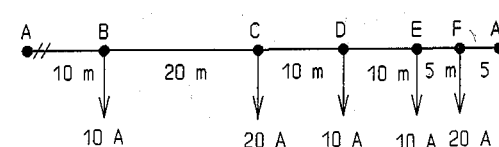


Fig. 2.19

2.7-2. Calcular la sección de la línea monofásica representada en la figura

2.19, con conductores de cobre unipolares HO7VK, en instalación bajo tubo. Tensión 220 V y caída de tensión máxima admisible 1,5%. Se considera un factor de potencia común para todas las cargas de 0,8 inductivo.

Solución:
16 mm²

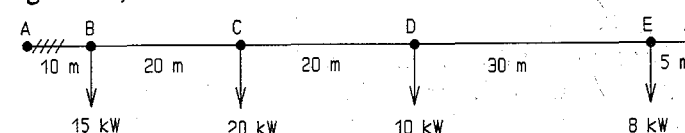


Fig. 2.20

2.7-3. Si la línea trifásica representada en la figura 2.20, es

de aluminio, de sección 25 mm². Calcular la caída de tensión, sabiendo que la tensión de alimentación es de 380 V.

Solución: 0,5%

2.8. CÁLCULO DE LÍNEAS CERRADAS EN ANILLO

Estas líneas cerradas pueden suponerse abiertas en el punto de alimentación. Así se pueden considerar como líneas abiertas alimentadas por los dos extremos a la misma tensión.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.8-1. La línea trifásica cerrada representada en la figura 2.21, está formada por conductores de cobre, tiene de sección 35 mm². La tensión de la línea es de 380 V.

Calcular la caída de tensión.

Se considera la línea abierta en el punto A.

Se calcula la carga que soporta cada extremo en función de la potencia que consumen los receptores. La carga en el sentido de A a B se denomina P_A y la carga en el sentido de A a D se denomina P_A :

$$P_A = \frac{\sum (PL)}{L} = \frac{40 \cdot 15\,000 + 100 \cdot 16\,000 + 140 \cdot 10\,000}{200} = 18\,000 \text{ W} = 18 \text{ kW}$$

$$P_A = \sum P - P_A = 41 - 18 = 23 \text{ kW}$$

El punto de mínima tensión es C, que recibirá en el sentido de A a B una potencia de 18 kW y en el sentido de A a D una potencia de 23 kW.

Considerando uno de los tramos abiertos en que queda dividida la línea teniendo en cuenta en ella toda la caída de tensión. Si se escoge el tramo ABC.

$$\text{La sección } s = \frac{\sum (LP)}{cu V_L}$$

$$\text{La caída de tensión } u = \frac{\sum (LP)}{cs V_L} = \frac{40 \cdot 15\,000 + 100 \cdot 8\,000}{56 \cdot 35 \cdot 380} = 1,88 \text{ V}$$

$$\text{En tanto por cien } u = \frac{1,88 \cdot 100}{380} = 0,5\%$$

2.8-2. Calcular la sección de la línea trifásica cerrada representada en la figura 2.22. Los conductores son de aluminio, cable RZ en instalación aérea. La tensión de línea es 380 V y la caída de tensión máxima 1,5%. Se considera la unidad como factor de potencia común para todas las cargas.

Solución: 25 mm²

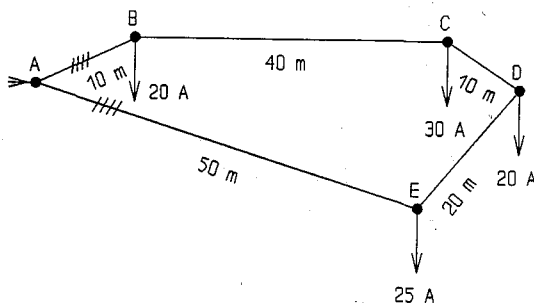


Fig. 2.22

2.9. CÁLCULO DE LÍNEAS DE B.T. POR MEDIO DE ÁBACOS

La sección de una línea monofásica con la caída de tensión en tanto por cien $u\%$ es:

$$s = \frac{2 \cdot 100 LP}{c V^2 u\%}$$

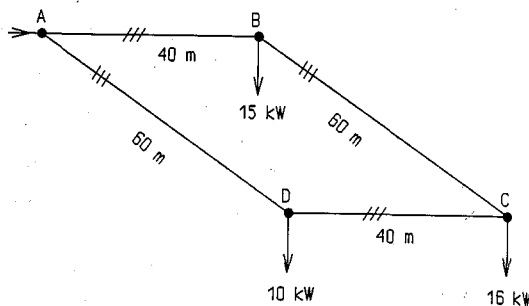


Fig. 2.21

CÁLCULO ELÉCTRICO DE LÍNEAS

DEMOSTRACIÓN

$$\text{La caída de tensión } u = \frac{V \cdot u\%}{100}$$

$$\text{Sustituyendo en la fórmula de la sección } s = \frac{2LP}{cuV} = \frac{2 \cdot 100 LP}{cu\% V^2}$$

$$\text{La caída de tensión porcentual } u\% = \frac{200 LP}{c V^2 s}$$

$$\text{Si la longitud se expresa en km y la potencia en kW } u\% = \frac{200 \cdot 10^6 LP}{c V^2 s}$$

La expresión $k = \frac{2 \cdot 10^8}{c V^2}$ es constante para una tensión y un material conductor.

Al producto LP se le llama momento eléctrico.

$$\text{La caída de tensión } u\% = \frac{2 \cdot 10^8}{c V^2} \cdot \frac{LP}{s} = k \frac{LP}{s}$$

Para una determinada tensión, si en un eje de coordenadas marcamos los momentos y en el otro las caídas de tensión, se obtiene un gráfico o ábaco, con una recta para cada sección (fig. 2.23).

Análogamente para una línea trifásica:

$$u\% = \frac{100 \cdot 10^6}{c V_L^2} \cdot \frac{LP}{s} = \frac{10^8}{c V_L^2} \cdot \frac{LP}{s}$$

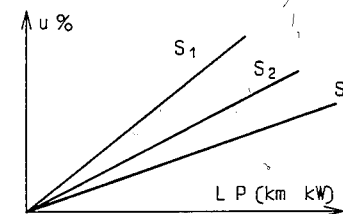


Fig. 2.23

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.9-1. Calcular por qué punto del ábaco de momentos pasará la recta que representa el momento eléctrico en función de la caída de tensión para una línea trifásica de aluminio de sección 50 mm², 380 V, 50 Hz, considerando una caída de tensión del 3%. el ábaco tiene en el eje horizontal los momentos en km·kW y el eje vertical las caídas de tensión en tanto por cien.

$$\text{La caída de tensión } u\% = \frac{10^8}{c \cdot V_L^2} \cdot \frac{LP}{s}$$

$$\text{El momento eléctrico } PL = u\% \cdot s \cdot \frac{c \cdot V_L^2}{10^8} = \frac{3 \cdot 50 \cdot 35 \cdot 380^2}{10^8} = 7,58 \text{ km} \cdot \text{kW}$$

La línea pasará por el origen y por el punto: $LP = 7,58 \text{ km} \cdot \text{kW}$ y $u = 3\%$.

2.9-2. Calcular para qué momento eléctrico una línea monofásica de cobre, de tensión 220 V y sección 16 mm² tiene una caída de tensión del 2%.

Solución: 0,27 km·kW

2.10. CÁLCULO DE LÍNEAS DE CORRIENTE CONTINUA

El cálculo de la sección en las líneas bifilares (a dos hilos) de corriente continua puede realizarse con las mismas expresiones que para las líneas monofásicas de corriente alterna, teniendo en cuenta que las cargas serían sólo resistivas, por no existir en corriente continua reactancia.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.10-1. Calcular la sección teórica de la línea bifilar de corriente continua de sección uniforme representada en la figura 2.24. El conductor es de cobre, la tensión es 220 V y la caída de tensión admisible el 2%.

La caída de tensión en la línea:

$$u = \frac{2 \cdot 220}{100} = 4,4 \text{ V}$$

$$\text{La sección del conductor } s = \frac{2 \sum (LP)}{cuV}$$

$$\begin{aligned} \text{La suma de momentos } \sum LP &= \frac{5\,000 \cdot 60 + 2\,000 \cdot 140 + 190 \cdot 5\,000}{1\,530\,000} \text{ m} \cdot \text{W} \end{aligned}$$

$$\text{La sección } s = \frac{2 \sum (LP)}{cuV} = \frac{2 \cdot 1\,530\,000}{56 \cdot 4,4 \cdot 220} = 56,45 \text{ mm}^2$$

2.10-2. Calcular la sección de los conductores de una línea bifilar de corriente continua de 220 V y longitud 40 m, con una caída de tensión del 1% y que alimenta un receptor que consume 40 A. Los conductores son de cobre.

Solución: 25,97 mm²

2.10-3. Calcular la caída de tensión en la línea bifilar de corriente continua de la figura 2.25. La tensión nominal es 220 V y el conductor es de cobre con sección 35 mm².

Solución: 3,8%

2.10-4. Calcular la caída de tensión en los tramos AB, BC y BD de la línea de corriente continua indicada en la figura 2.26, con las secciones indicadas. El conductor es de cobre y la tensión 220 V.

Solución: a) $u_{AB}=0,89$; $u_{BC}=0,44\%$; $u_{BD}=0,74\%$

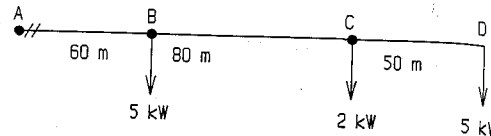


Fig. 2.24

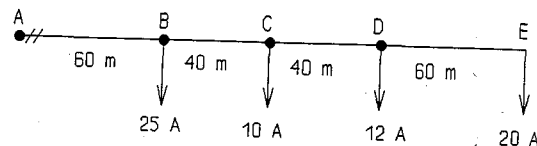


Fig. 2.25

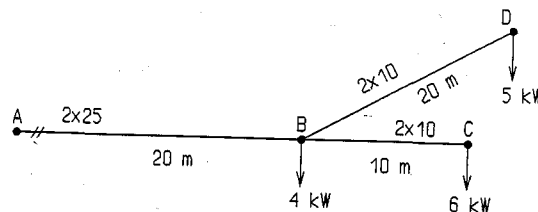


Fig. 2.26

2.10-5. Calcular la caída de tensión en los tramos AB, BC y BD de la línea de distribución bifilar de corriente continua con las cargas, longitudes y secciones que indica la figura 2.27. Los conductores son de cobre y la tensión de alimentación 220 V.

Solución: a) $u_{AB}=2,35\%$; $u_{BC}=3,04\%$
 $u_{BD}=3,57\%$

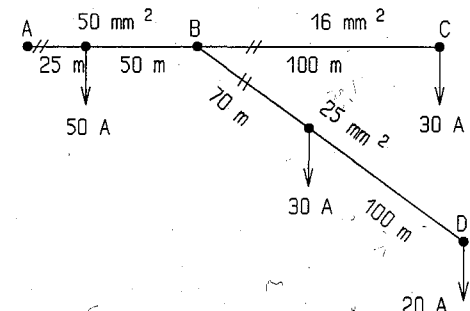


Fig. 2.27

2.10-6. Calcular la caída de tensión en la línea bifilar de corriente continua representada en la figura 2.28, con conductores de cobre de sección 25 mm². Tensión 220 V.

Solución: 2,36%

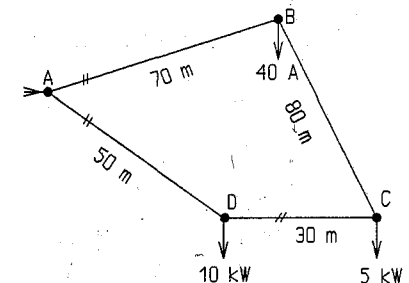


Fig. 2.28

2.11. CÁLCULO ELÉCTRICO DE LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN

En el cálculo de la sección de los conductores se consideran tres criterios:

1) *Calentamiento del conductor.* El cálculo de la sección por este criterio se basa en las tablas facilitadas por el fabricante de conductor que indica la intensidad admisible en régimen permanente según determinadas condiciones y factores de corrección para condiciones distintas.

2) *Caída de tensión en el conductor.* En el cálculo de la caída de tensión en las líneas de M.T. se tienen en cuenta:

- *Resistencia eléctrica de los conductores.* Generalmente se considera como resistencia longitudinal (Ω/km).
- *Reactancia inductiva de los conductores.* La intensidad de corriente alterna que recorre los conductores, produce un flujo magnético alterno, que origina en ellos fuerzas electromotrices de autoinducción. Se suelen considerar valores longitudinales de autoinducción (H/km) o reactancia (Ω/km).

Entre los conductores de la línea o entre un conductor y su pantalla (cables unipolares con pantalla) se produce el efecto de capacidad, que en las líneas de B.T. y en las de M.T. suele despreciarse para el cálculo de la caída de tensión.

3) *Capacidad del conductor para soportar la corriente de cortocircuito.* La intensidad de cortocircuito es varias veces superior a la intensidad de corriente en funcionamiento normal y aunque el tiempo de actuación de las protecciones es pequeño, el calentamiento puede ser excesivo para el conductor. El fabricante suministra tablas o gráficos de intensidad de cortocircuito admisible en los conductores en función de su sección, del aislamiento, incremento de la temperatura admisible y tiempo de duración del cortocircuito.

El cálculo eléctrico puede realizarse de dos formas:

- **Cálculo preliminar:** Como sección del conductor se escoge la normalizada por exceso correspondiente a la mayor de las calculadas por los tres criterios: máxima intensidad admisible, máxima caída de tensión y máxima intensidad de cortocircuito.
- **Cálculo de comprobación:** Escogida una sección se comprueba que la intensidad en régimen permanente, la caída de tensión y la intensidad de cortocircuito están dentro de los valores admisibles. Es el cálculo más utilizado en instalaciones de M.T.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.11-1. Para la alimentación a 6 kV, 50 Hz, de una instalación trifásica que consume 1 500 kW con factor de potencia 0,8 inductivo, se utiliza un cable tripolar de cobre, aislado con etileno propileno (EPR), de tensión 6/10 kV y sección 70 mm². El cable va colocado horizontalmente sobre bandeja continua con otros tres cables, a una temperatura ambiente de 35°C. Calcular:

- Intensidad que circula por el cable.
- Intensidad admisible en el cable si según el catálogo del fabricante, admite instalado al aire a 40°C la intensidad de 255 A. El factor de corrección por temperatura es 1,12 y por instalación sobre bandeja 0,8.

$$a) \text{ La intensidad de línea } I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi} = \frac{1\,500\,000}{\sqrt{3} \cdot 6\,000 \cdot 0,8} = 180,4 \text{ A}$$

b) La máxima intensidad admisible es $I_{ad} = 255 \cdot 1,12 \cdot 0,8 = 228,48 \text{ A}$ mayor que la intensidad de consumo de la instalación.

2.11-2. Hallar si el cable tripolar de cobre, de sección 50 mm², aislado con polietileno reticulado, 12/20 kV, instalado al aire en bandeja perforada, separado de otro cable a la temperatura ambiente de 45°C, puede alimentar por criterio térmico una instalación de potencia aparente 3 MVA a 20 kV.

El fabricante indica que la intensidad admisible para este cable a 40°C es 190 A. El factor de corrección por temperatura es 0,93 y por instalación en bandeja 0,95.

Solución: La intensidad admisible en el cable es 167,8 A, mayor que el consumo de la instalación, que es de 86,6 A, por lo que es válido el conductor.

2.12. CAÍDA DE TENSIÓN EN LAS LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN

■ Impedancia de la línea

Escogido un conductor de determinada sección, se calcula la impedancia Z de la línea en Ω/km

R : Resistencia del conductor a la temperatura de trabajo, en Ω/km (dato del conductor)

X : Reactancia del conductor en Ω/km (dato del cable conductor).

En las líneas aéreas con conductores unipolares se halla la reactancia calculando el coeficiente de autoinducción.

$$L_k = (k + 4,6 \log \frac{D}{r}) \cdot 10^{-4}$$

L_k : Coeficiente de autoinducción de la línea, en H/km.

D : Separación entre conductores (cm).

r : Radio del conductor (cm).

k : Término de valor 0,5 para conductores macizos y variable para conductores cableados en cuerda. Para los cables de aluminio acero utilizados en M.T., vale 0,53 para 6 conductores de aluminio cableados sobre uno de acero, y 0,64 para 30 conductores de aluminio cableados sobre 7 de acero.

Si las separaciones no son iguales se halla la media geométrica:

$$D = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$$

La reactancia de la línea por conductor en Ω/km $X = 2\pi f L_k$

La impedancia de la línea por conductor en Ω/km $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$

La impedancia total en Ω , se calcula de la forma $Z_L = Z \cdot L$.

L : Longitud total de la línea en km.

La resistencia total en Ω , $R_L = R \cdot L$

La reactancia total en Ω , $X_L = X \cdot L$

El circuito equivalente de una línea monofásica o de una fase de una línea trifásica con carga equilibrada se representa en la figura 2.29.

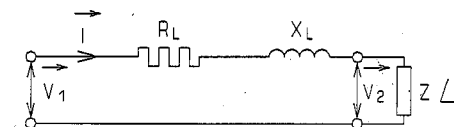


Fig. 2.29

■ Caída de tensión en la línea

La intensidad de la línea I_L (A) según la potencia a transportar:

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_L} = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi}$$

S : Potencia aparente a transportar (kVA).

P : Potencia activa a transportar (kW).

V_L : Tensión de línea (kV).

$\cos \varphi$: Factor de potencia de la línea.

La diferencia de las tensiones de línea entre los dos extremos de la misma se llama caída de tensión, y es consecuencia de la resistencia y reactancia de los conductores.

La caída de tensión de línea en voltios:

$$u = \sqrt{3} I_L L (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

DEMOSTRACIÓN

En el diagrama vectorial del circuito equivalente (fig. 2.30) se representa la ecuación vectorial del circuito.

$$V_1 = V_2 + R_L I + X_L I$$

La caída de tensión

$$u = V_1 - V_2 = DF = DE + EF = R_L I \cos \varphi + X_L I \sin \varphi$$

Utilizando los valores R y X de resistencia y reactancia longitudinales

$$u = R L I \cos \varphi + X L I \sin \varphi = I L (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

En la línea trifásica equilibrada, con valores de línea $u = \sqrt{3} I_L L (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$

Sustituyendo el valor de la intensidad de línea en función de la potencia:

$$u = \frac{P L}{V_L \cos \varphi} (R \cos \varphi + X \sin \varphi) = \frac{P L}{V_L} (R + X \tan \varphi)$$

u : Caída de tensión compuesta o de línea (V).

La caída de tensión en tanto por ciento de la tensión de línea:

$$u\% = \frac{P L}{10 V_L^2} (R + X \tan \varphi)$$

$u\%$: Caída de tensión en tanto por ciento de la tensión de línea (V).

P : Potencia activa a transportar (kW).

V_L : Tensión de línea (kV).

L : Longitud de la línea (km).

R : Resistencia del conductor (Ω/km).

X : Reactancia del conductor (Ω/km).

$\cos \varphi$: Factor de potencia de la línea.

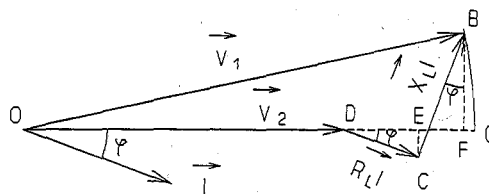


Fig. 2.30

DEMOSTRACIÓN

La caída de tensión porcentual de la tensión de línea:

$$u\% = \frac{100 \cdot u}{V_L} = \frac{100 \cdot P L}{V_L^2} (R + X \tan \varphi)$$

Si la potencia se expresa en kW y la tensión en kV:

$$u\% = \frac{100 \cdot L \cdot 1000 \cdot P}{(1000 \cdot V_L)^2} (R + X \tan \varphi) = \frac{P L}{10 V_L^2} (R + X \tan \varphi)$$

Mediante esta ecuación se obtienen gráficos o ábacos para calcular la caída de tensión en función del momento eléctrico LP , para diferentes valores de tensión, conductor y factor de potencia.

La caída de tensión, según el Reglamento de Verificaciones Eléctricas, en la líneas de suministro de energía no debe sobrepasar el 7% de la tensión nominal.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.12-1. Una instalación que consume 1 MW, con un factor de potencia 0,86 se alimenta mediante una línea trifásica de 6 kV, 50 Hz, con un cable tripolar de cobre, sección 70 mm², aislado con PRC, de longitud 400 m. Calcular la caída de tensión en el conductor, sabiendo que la resistencia longitudinal es de 0,4 Ω/km a la temperatura de trabajo de 90 °C y la reactancia longitudinal 0,1 Ω/km . Dibujar el ábaco de momentos para este conductor.

La tangente del ángulo de desfase entre tensión e intensidad de fase

$$\cos \varphi = 0,86; \varphi = 30,68^\circ; \tan \varphi = 0,593$$

La caída de tensión:

$$u\% = \frac{P L}{10 V_L^2} (R + X \tan \varphi)$$

$$u = \frac{1000 \cdot 0,4}{10 \cdot 6^2} (0,4 + 0,1 \cdot 0,593) = 0,51\%$$

La recta que representa a este conductor en el ábaco de momentos se indica en la figura 2.31.

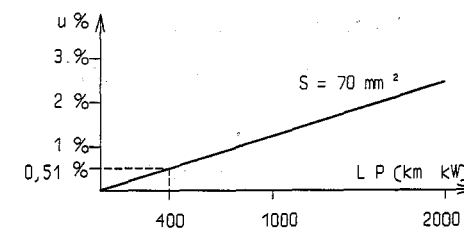


Fig. 2.31

2.12-2. Calcular la longitud máxima de cable tripolar de aluminio, de sección 70 mm², aislado con PRC, 12/20 kV, que alimenta una instalación trifásica a 20 kV, 50 Hz, de consumo 4 MW, con factor de potencia 0,8 inductivo; para que la caída de tensión no sobrepase el 1%. La resistencia longitudinal de cable a la máxima temperatura de trabajo de 90 °C es de 0,57 Ω/km y la reactancia 0,13 Ω/km .

Solución: 1,5 km

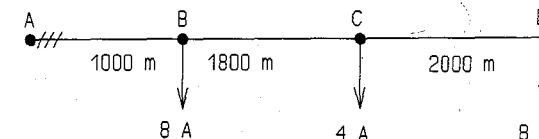


Fig. 2.32

2.12-3. Una línea trifásica de 20 kV, 50 Hz, alimenta con sección uniforme las cargas de la figura 2.32, equilibradas y con factor de

potencia 0,8 inductivo. El conductor es un cable tripolar de cobre de resistencia longitudinal de 0,47 Ω/km y reactancia 0,15 Ω/km . Calcular la caída de tensión total.

La caída de tensión en una línea de una sola carga:

$$u = \sqrt{3} I_L L (R \cos \varphi + X \sin \varphi) = \sqrt{3} (R L I_L \cos \varphi) + \sqrt{3} (X L I_L \sin \varphi)$$

Para líneas de sección uniforme y varias cargas la caída de tensión se halla igual que para líneas de B.T. tomando momentos respecto al origen.

$$u = \sqrt{3} \sum (R L I_L \cos \varphi) + \sqrt{3} \sum (X L I_L \sin \varphi)$$

Considerando constantes R , X y φ :

$$u = \sqrt{3} R \cos \varphi \sum (L I_L) + \sqrt{3} X \sin \varphi \sum (L I_L)$$

$$u = \sqrt{3} \cdot 0,47 \cdot 0,8 (1 \cdot 8 + 2,8 \cdot 4 + 4,8 \cdot 8) + \sqrt{3} \cdot 0,15 \cdot 0,6 (1 \cdot 8 + 2,8 \cdot 4 + 4,8 \cdot 8) = 46,5 \text{ V}$$

$$\text{La caída de tensión porcentual } u\% = \frac{u \cdot 100}{V_L} = \frac{46,5 \cdot 100}{20000} = 0,23\%$$

2.13. POTENCIA MÁXIMA DE TRANSPORTE

La máxima intensidad de línea $I_{Lmáx}$, se halla según la densidad de corriente o la intensidad de corriente permitida.

La potencia aparente máxima de transporte $S_{máx} = \sqrt{3} V_L I_{Lmáx}$

La potencia que puede transportar la línea, dependiendo de su longitud y caída de tensión, se obtiene de la expresión de la caída de tensión.

$$P = \frac{10 V_L^2}{(R + X \operatorname{tg} \varphi) L} u\%$$

Mediante esta ecuación se pueden construir gráficos para hallar la potencia de transporte en función de la longitud de la línea, para distintos conductores, tensión, factor de potencia y caída de tensión.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.13-1. Calcular la potencia máxima, con factor de potencia 0,8 inductivo, que puede transportar una línea trifásica de 6 kV, 50 Hz y longitud 500 m, para que la caída de tensión no exceda del 2%. El conductor es cable tripolar de aluminio, de resistencia longitudinal a la temperatura de trabajo (90 °C) 0,8 Ω/km y reactancia 0,12 Ω/km.

La tangente del ángulo de desfase entre la tensión e intensidad de:

$$\cos \varphi = 0,8; \quad \varphi = 36,87^\circ; \quad \operatorname{tg} \varphi = 0,75$$

La potencia máxima de transporte:

$$P = \frac{10 V_L^2}{(R + X \operatorname{tg} \varphi) L} u\% = \frac{10 \cdot 6^2 \cdot 2}{(0,8 + 0,12 \cdot 0,75) 0,5} = 1\,618 \text{ kW}$$

2.13-2. Una línea trifásica de 20 kV, 50 Hz, longitud 2 km, alimenta una instalación mediante un cable tripolar de cobre de resistencia longitudinal a la temperatura de trabajo de 0,4 Ω/km y reactancia 0,1 Ω/km. Calcular la máxima potencia e intensidad, con factor de potencia 0,9 inductivo, que puede transportar para que la caída de tensión no exceda del 1%.

Solución: 4 460 kW; 143 A.

2.14. PÉRDIDAS DE POTENCIA

La pérdida de potencia en la línea trifásica, por efecto Joule: $P_p = 3 R L I_L^2$

P_p : Pérdida de potencia (W).

R : Resistencia del conductor (Ω/km).

L : Longitud de la línea (km).

I_L : Intensidad de línea (A).

Sustituyendo el valor de la intensidad de línea en función de la potencia de transporte:

$$P_p = \frac{R L P^2}{V_L^2 \cos^2 \varphi}$$

La pérdida en tanto por ciento de la potencia de transporte:

$$P_p \% = \frac{R}{10 V_L^2 \cos^2 \varphi} L P$$

P : Potencia de transporte (kW).

V_L : Tensión de línea (kV).

Mediante esta ecuación se pueden construir gráficos o ábacos para hallar la potencia perdida en función del momento eléctrico LP , para distintos conductores, tensión y factor de potencia de la instalación.

DEMOSTRACIÓN

La intensidad de línea $I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi}$

Sustituyendo en la expresión de la potencia perdida $P_p = \frac{3 R L P^2}{(\sqrt{3})^2 V_L^2 \cos^2 \varphi} = \frac{R L P^2}{V_L^2 \cos^2 \varphi}$

La pérdida de potencia porcentual $P_p \% = \frac{100 \cdot P_p}{P} = \frac{100 \cdot R L P^2}{P V_L^2 \cos^2 \varphi} = \frac{100 R L P}{V_L^2 \cos^2 \varphi}$

Si la potencia se expresa en kW y la tensión en kV:

$$P_p \% = \frac{100 \cdot R \cdot L \cdot 1\,000 \cdot P}{(1\,000 \cdot V_L)^2 \cos^2 \varphi} = \frac{R L P}{10 V_L^2 \cos^2 \varphi}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.14-1. Calcular la pérdida porcentual de potencia en una línea trifásica a 10 kV, 50 Hz, longitud 2 800 m, que alimenta una potencia de 2 000 kW con factor de potencia 0,85 inductivo. El conductor es un cable de aluminio de resistencia longitudinal a la temperatura de trabajo de 0,4 Ω/km.

$$\text{La potencia perdida } P_p \% = \frac{R}{10 V_L^2 \cos^2 \varphi} L P = \frac{0,4}{10 \cdot 10^2 \cdot 0,85^2} 2,8 \cdot 2\,000 = 3,1\%$$

2.14-2. Calcular la longitud máxima que puede tener una línea trifásica a 6 kV, 50 Hz, para alimentar una potencia de 3 000 kW con factor de potencia 0,8 inductivo, con pérdida máxima de potencia del 2%. El conductor de la línea es un cable tripolar de cobre con resistencia longitudinal 0,34 Ω/km.

Solución: 452 m

2.14-3. Calcular la máxima potencia que puede transportar una línea trifásica a 20 kV, 50 Hz, longitud 5 km, para alimentar una instalación con factor de potencia 0,89 inductivo, con pérdida máxima de potencia del 1%. El conductor de la línea es un cable tripolar de aluminio con resistencia longitudinal 0,32 Ω/km.

Solución: 1 980 kW

2.15. SECCIÓN MÍNIMA DE LOS CONDUCTORES PARA SOPORTAR UN CORTOCIRCUITO

■ Cortocircuito tripolar

Las líneas eléctricas deben poder soportar las corrientes de cortocircuito, de corta duración, porque actuarán los elementos de protección al cabo de pocos segundos. El valor elevado de la intensidad tiene dos efectos:

- Aumentar el calor producido en el cable por unidad de tiempo (proporcional al cuadrado de la intensidad de corriente).
- Aumentar las fuerzas entre conductores, por efecto de aumento del campo magnético que rodea el conductor. En los cables de varios conductores, este esfuerzo lo soporta el propio cableado.

El caso de cortocircuito que se considera en el diseño de las protecciones de la instalación es el cortocircuito trifásico tripolar.

■ Corriente de cortocircuito

Para un tiempo de cortocircuito del orden de 1,5 s se considera la intensidad de línea en régimen permanente para cortocircuito tripolar. Su valor eficaz:

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} V_L}$$

I_{cc} : Intensidad eficaz de corriente de fase en el cortocircuito (A).

S_{cc} : Potencia aparente de cortocircuito (VA).

V_L : Tensión de línea (V).

La sección del conductor en función de la intensidad permanente de cortocircuito se calcula teniendo en cuenta:

- El cortocircuito es de muy corta duración.
- La temperatura es la máxima admisible por el aislamiento.
- El calor producido se utiliza en incrementar la temperatura del conductor, no transmitiendo calor alguno al exterior (proceso adiabático).

Según estas condiciones, la sección necesaria para soportar el cortocircuito:

$$s = \frac{I_{cc} \sqrt{t}}{K}$$

s : Sección del conductor (mm²)

t : Tiempo de duración del cortocircuito (s).

K : Constante que depende del conductor y de las temperaturas al inicio y al final del cortocircuito.

La norma UNE 20460 indica como temperatura inicial y final para cables aislados con PVC 70°C y 160°C; para cables aislados con polietileno reticulado (XLPE) o etileno propileno (EPR), 85°C y 220°C. Con estas temperaturas y admitiendo una duración de cortocircuito no superior a 5 segundos los valores utilizados se indican en la tabla 2.16, para cables de B.T.

Tabla 2.16

CONDUCTOR	AISLAMIENTO	K
Cobre.	PVC	115
	XLPE - EPR	135
Aluminio.	PVC	74
	XLPE - EPR	87

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.15-1. Una línea trifásica, de tensión 20 kV, 50 Hz, alimenta una instalación utilizando cables unipolares de aluminio aislados con EPR, 12/20 kV. Calcular:

- Intensidad de cortocircuito si la potencia de cortocircuito en el punto de entronque con la línea de distribución, según la empresa suministradora es de 500 MVA.
- Sección necesaria para soportar el cortocircuito si su duración (según la empresa suministradora) es de 0,2 s y según la norma UNE 21123 las temperaturas inicial y final de cortocircuito son de 90°C y 250°C, con lo que la constante $K=94$.

$$\text{La intensidad de cortocircuito } I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} V_L} = \frac{500\,000\,000}{\sqrt{3} \cdot 20\,000} = 14\,434 \text{ A}$$

$$\text{La sección del conductor } s = \frac{I_{cc} \sqrt{t}}{K} = \frac{14\,434 \cdot \sqrt{0,2}}{94} = 68,67 \text{ mm}^2$$

2.15-2. La intensidad de cortocircuito en un punto de la instalación trifásica de M.T. a 20 kV es 11,547 kA. Calcular:

- Potencia aparente de cortocircuito.
 - Sección necesaria para soportar el cortocircuito si el tiempo de duración del mismo es 0,2 s, el conductor es cable tripolar de cobre aislado con PVC, de constante $K=115$.
- Solución: a) 400 MVA; b) 45 mm²

2.15-3. Calcular la intensidad de cortocircuito tripolar que puede soportar un cable tripolar de cobre 0,6/1 kV, aislado con XLPE, sección 95 mm², si el tiempo de duración del cortocircuito es de 0,3 s y según la norma UNE 21145 las temperaturas inicial y final de cortocircuito son de 90°C y 250°C, con lo que la constante $K=142$.

Solución: 24 629 A

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.2-1. Un cable tetrapolar de cobre con aislamiento de EPR, tensión nominal 1 kV, alimenta a 380/220 V, 50 Hz una instalación que consume 34 kW con un factor de potencia 0,8 inductivo. Calcular:

- Intensidad que consume la instalación, considerando el consumo equilibrado.
- Sección necesaria del conductor si el cable está con una parte empotrada bajo tubo y otra parte expuesta al sol.

Solución: a) 64,57 A; b) 25 mm².

P.2-2. Calcular la sección de los conductores de alimentación de un receptor trifásico equilibrado que consume una intensidad de 45 A con factor de potencia 0,86 en retraso. La línea está formada por tres cables unipolares con conductores de cobre, aislados con PVC para 750 V, en instalación interior bajo tubo empotrado, de longitud 60 m. La tensión de línea es 380 V y la caída de tensión permitida del 1%.

Solución: 25 mm²

P.2-3. En la línea de distribución trifásica de la figura 2.33, tensión de línea 380 V, 50 Hz, con conductores de aluminio trenzados en haz, aislados con PRC. Calcular la sección de los conductores de fase, admitiendo una caída de tensión del 4% y considerando un factor de potencia común para todas las cargas de 0,9 inductivo.

Solución: 95 mm²

P.2-4. La línea trifásica representada en la figura 2.34, está formada por un cable tetrapolar, con conductores de cobre, aislados con polietileno reticulado para 1 kV, en instalación bajo tubo. La tensión de alimentación es 380/220 V, 50 Hz y las secciones están indicadas. Calcular la caída de tensión en los distintos tramos.

Solución: $u_{AD}=0,46\%$, $u_{DG}=0,31\%$, $u_{DF}=0,22\%$

P.2-5. Calcular la caída de tensión en la línea trifásica representada en la figura 2.35. El conductor es de cobre, de sección 25 mm² y la tensión de alimentación es de 380 V.

Solución: 1,32%

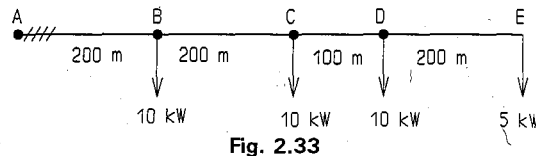


Fig. 2.33

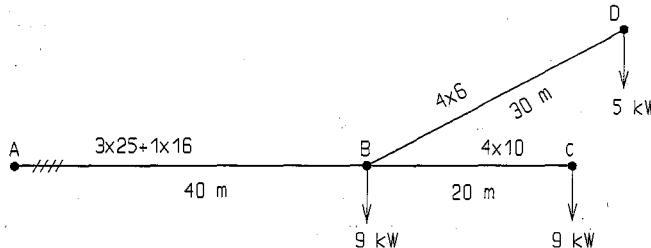


Fig. 2.34

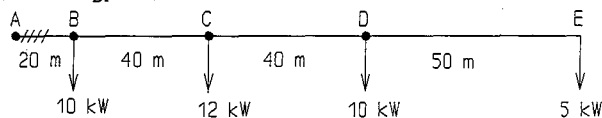


Fig. 2.35

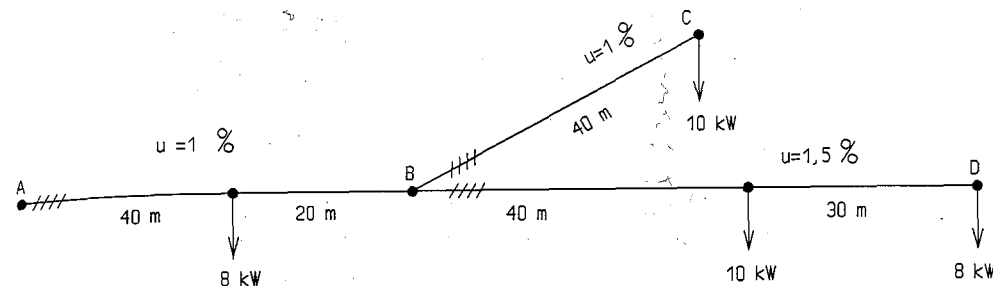


Fig. 2.36

P.2-6. Calcular la sección de los tramos AB, BC y BD de la línea de la figura 2.36, con los valores máximos de caídas de tensión indicados. Los conductores son de cobre en cable tetrapolar, aislado con XLPE, 0,6/1 kV, en instalación bajo tubo. La tensión de línea es trifásica de 380/220 V, y se considera un factor de potencia común para todas las cargas de 0,9 inductivo.

Solución: $s_{AB}=25 \text{ mm}^2$,
 $s_{BC}=6 \text{ mm}^2$, $s_{BD}=10 \text{ mm}^2$

P.2-7. Calcular la sección de la línea trifásica en anillo representada en la figura 2.37. Los conductores son de aluminio, cable tetrapolar, aislado con EPR 1 kV, en instalación enterrada bajo tubo. La tensión de línea es 380 V y la caída de tensión máxima 1%. Se considera 0,8 como factor de potencia común para todas las cargas.

Solución: 25 mm².

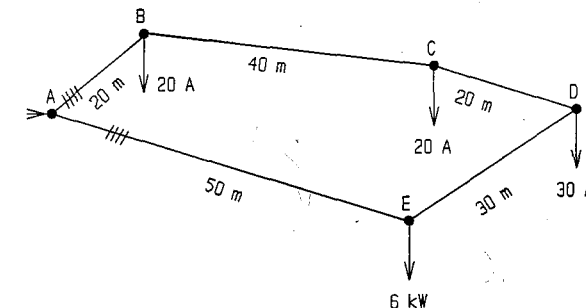


Fig. 2.37

P.2-8. La línea de distribución de corriente continua indicada en la figura 2.38, está formada por conductores de cobre de sección 16 mm². La tensión es de 220 V. Calcular la caída de tensión total.

Solución: 2,1%

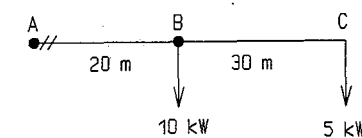


Fig. 2.38

P.2-9. La línea trifásica de 10 kV, 50 Hz, indicada en la figura 2.39, es de sección uniforme. Las cargas son equilibradas y con factor de potencia 0,86 inductivo. El conductor es un cable tripolar de cobre de resistencia longitudinal de 0,4 Ω/km y reactancia 0,1 Ω/km. Calcular la caída de tensión total.

Solución: 0,25%

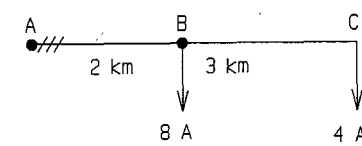


Fig. 2.39

P.2-10. Calcular la potencia máxima, con factor de potencia 0,9 inductivo, que puede transportar a 600 m una línea trifásica de 20 kV, 50 Hz, para que la caída de tensión no exceda del 1%. El conductor es cable tripolar de cobre, de máxima resistencia longitudinal a la temperatura de trabajo 0,5 Ω/km y reactancia 0,12 Ω/km .

Solución: 11 945 kW.

P.2-11. Calcular la longitud máxima que puede tener una línea trifásica para alimentar una instalación que consume 4 000 kW con factor de potencia 0,8 inductivo, con pérdida máxima de potencia del 1% a 20 kV, 50 Hz. La línea está formada por un cable tripolar de cobre con resistencia longitudinal 0,4 Ω/km .

Solución: 1,6 km.

P.2-12. Una línea trifásica de 20 kV, 50 Hz, alimenta una instalación utilizando cables tripolares de cobre aislados con PRC, 15/25 kV. Calcular la sección necesaria para soportar el cortocircuito si su duración es de 0,2 s, la constante K del cable es 143 y la potencia de cortocircuito en el punto de entronque con la línea de distribución es de 450 MVA.

Solución: 40,6 mm².

3

LÍNEAS AÉREAS

3.1. LÍNEA ELÉCTRICA AÉREA

Es el conjunto de conductores sujetos en el aire a aisladores y montados sobre soportes a cierta distancia del suelo, que logran el aislamiento necesario entre los conductores y tierra.

3.2. CABLES DE ALUMINIO ACERO UTILIZADOS EN LAS LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN EN MEDIA TENSIÓN.

Los cables más utilizados en las líneas de distribución de tensión nominal 20 kV son los cables de aluminio-acero (fig. 3.1), porque al tener menos peso que el de cobre y más resistencia mecánica debido al alma de acero, puede tenderse con vanos mayores y menos apoyos.

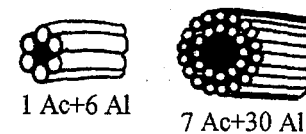


Fig. 3.1

- Designación.** Se designan por las letras LA (alambres de aluminio y acero galvanizado), seguidas por la sección aparente del cable en mm².
- Características.** Los más utilizados son los cables LA-30, LA-56, LA-78 y LA-110, cuyas características, según norma UNE 21-018, se indican en la tabla siguiente:

Tabla 3.1

CARACTERÍSTICAS	DESIGNACIÓN			
	LA-30	LA-56	LA-78	LA-110
Sección aluminio, mm ² .	26,7	46,8	67,4	94,2
Sección acero, mm ² .	4,4	7,8	11,2	22,0
Sección total, mm ² .	31,1	54,6	78,6	116,2
Resistencia eléctrica a 20 °C, Ω/Km .	1,0749	0,6136	0,4261	0,3066
Composición alambres aluminio+acero.	6+1	6+1	6+1	30+7
Diámetro aparente del cable mm.	7,14	9,45	11,34	14
Carga mínima de rotura kp.	1 010	1 670	2 360	4 400
Módulo de elasticidad kp/mm ² .	8 100	8 100	8 100	8 200
Coefficiente de dilatación °C ⁻¹ .	19,1·10 ⁻⁶	19,1·10 ⁻⁶	19,1·10 ⁻⁶	17,8·10 ⁻⁶
Peso kp/km.	107,9	189,1	272	433

3.3. CÁLCULO ELÉCTRICO DE LOS CONDUCTORES EN LAS LÍNEAS AÉREAS DE M.T. CON CABLES DE ALUMINIO ACERO

■ Proceso de cálculo

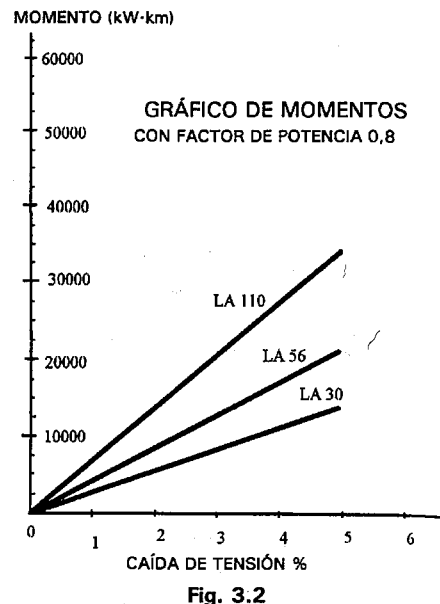
Se elige el conductor de la línea y después se justifica esta elección con el cálculo de:

- Impedancia de la línea.
- Caída de tensión.
- Potencia de transporte que permite la línea.
- Pérdida de potencia en la línea.

■ Elección de los conductores

Las líneas de M.T. suelen ser de tensión nominal 20 kV y los conductores a emplear de aluminio acero.

La elección del conductor puede realizarse según el ábaco de momentos como el indicado en la figura 3.2.



PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.3-1. Una línea aérea de 20 kV, 50 Hz, con una longitud de 2,5 km está formada por tres conductores LA 110 sujetos a apoyos de forma que la distancia entre ellos es de $D_{12}=1,8$ m, $D_{23}=1,8$ m y $D_{31}=3,6$ m. Calcular:

- Coeficiente de autoinducción de la línea, si el diámetro del conductor es 14 mm,
- Reactancia por kilómetro de la línea.
- Impedancia total, sabiendo que la resistencia del conductor es $0,307 \Omega/\text{km}$.

a) Como se indica en el epígrafe 2.12, la separación media entre los conductores:

$$D = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} = \sqrt[3]{1,8 \cdot 1,8 \cdot 3,6} = 2,27 \text{ m}$$

El coeficiente de autoinducción:

$$L_k = (0,53 + 4,6 \log \frac{D}{r}) \cdot 10^{-4} = (0,53 + 4,6 \log \frac{2,27}{0,007}) \cdot 10^{-4} = 0,0012 \text{ H/km}$$

- b) La reactancia de la línea por conductor en Ω/km :

$$X = 2\pi f L_k = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,0012 = 0,377 \Omega/\text{km}$$

- c) La impedancia de la línea por conductor en Ω/km :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{0,307^2 + 0,377^2} = 0,486 \Omega/\text{km}$$

La impedancia total: $Z_T = Z \cdot L = 0,486 \cdot 2,5 = 1,215 \Omega$

3.3-2. Una derivación de una línea de 20 kV, 50 Hz, tiene una longitud de 800 m y se realiza con conductor LA 30. Si tiene un coeficiente de autoinducción de $0,0013 \text{ H/km}$ y una resistencia media a 20°C de $1,075 \Omega/\text{km}$, calcular la impedancia total de la línea.

Solución: $0,92 \Omega$

3.3-3. Calcular la máxima potencia aparente que puede transportar una línea aérea de 20 kV, 50 Hz, con conductores LA 56, de sección $54,6 \text{ mm}^2$, sabiendo que están formados por 6 hilos de aluminio arrollados sobre uno de acero.

La máxima intensidad de línea $I_{L\text{máx}}$, según la densidad de corriente permitida (R.L.A.T. artículo 22), se halla de acuerdo con la siguiente tabla.

Tabla 3.2

Sección nominal mm^2	Densidad de corriente A/mm^2		
	Cobre	Aluminio	Aleación de aluminio
10	8,75		
15	7,60	6,00	5,60
25	6,35	5,00	4,65
35	5,75	4,55	4,25
50	5,10	4,00	3,70
70	4,50	3,55	3,30
95	4,05	3,20	3,00
125	3,70	2,90	2,70
160	3,40	2,70	2,50
200	3,20	2,50	2,30
250	2,90	2,30	2,15
300	2,75	2,15	2,00
400	2,50	1,95	1,80
500	2,30	1,80	1,70
600	2,10	1,65	1,55

La sección $54,6 \text{ mm}^2$ está comprendida entre 50 y 70 mm^2 , por lo que la densidad de corriente estará comprendida entre 4 y $3,55 \text{ A/mm}^2$.

A la diferencia de $70-50=20 \text{ mm}^2$ le corresponde una diferencia de densidad de corriente de $3,55-4=-0,45 \text{ A/mm}^2$. A cada mm^2 de sección, le corresponde:

$$\frac{-0,45}{20} = -0,0225 \text{ A/mm}^2$$

Interpolando entre 50 y $54,6 \text{ mm}^2$, con una diferencia de $4,6 \text{ mm}^2$, a la sección de $54,6$ le corresponde una densidad de corriente de $4-0,0225 \cdot 4,6 = 3,8965 = 3,9 \text{ A/mm}^2$.

Para cables de aluminio-acero la densidad de corriente correspondiente a su sección total como si fuera de aluminio se multiplica por un coeficiente de reducción según la siguiente tabla.

Tabla 3.3

Composición.	6+1	26+7	30+7	54+7
Coeficiente.	0,926	0,926	0,902	0,941

$$I_{L\text{máx}} = s \cdot \delta \cdot \alpha = 54,6 \cdot 3,9 \cdot 0,926 = 197,2 \text{ A}$$

La potencia aparente máxima de transporte:

$$S_{\text{máx}} = \sqrt{3} V_L I_{L\text{máx}} = \sqrt{3} \cdot 20\,000 \cdot 197,2 = 6\,831 \cdot 10^3 \text{ VA} = 6\,831 \text{ kVA}$$

3.3-4. En una línea aérea trifásica de 20 kV, 50 Hz y longitud 3 km, se utilizan tres conductores LA 56. La reactancia media es 0,4 Ω /km y la resistencia media 0,614 Ω /km. Calcular la potencia activa máxima de transporte con factor de potencia 0,8 inductivo, para una caída de tensión del 3%.

Solución: 4 376 kW

3.3-5. Para transportar una carga de 600 kW mediante una línea aérea trifásica de 20 kV, 50 Hz y longitud 4 km, se utilizan tres conductores LA 56. Si la reactancia media es 0,4 Ω /km y la resistencia media 0,614 Ω /km, Calcular:

- Intensidad de línea con factor de potencia 0,8 inductivo.
- Caída de tensión en la línea.

$$a) \text{ La intensidad de línea: } I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi} = \frac{600\,000}{\sqrt{3} \cdot 20\,000 \cdot 0,8} = 21,65 \text{ A}$$

- La caída de tensión:

$$u = \sqrt{3} I_L L (R \cos \varphi + X \sin \varphi) = \sqrt{3} \cdot 21,65 \cdot 4 \cdot (0,614 \cdot 0,8 + 0,4 \cdot 0,6) = 109,68 \text{ V}$$

$$\text{En tanto por cien: } u\% = \frac{109,68 \cdot 100}{20\,000} = 0,55\%$$

3.3-6. Calcular que momento eléctrico en km·kW, produciría en una línea de 20 kV, 50 Hz, con conductor LA 30, de reactancia 0,41 Ω /km y resistencia 1,07 Ω /km una caída de tensión del 2%, con un factor de potencia 0,8 inductivo.

Solución: 5 808 km·kW

3.3-7. Para suministro de energía eléctrica con una potencia de 500 kVA a 20 kV, 50 Hz, en una distancia de 2 km, se utiliza conductor LA 30. La cruceta que soporta los conductores hace que la distancia entre estos sea $D_{12}=1,6$ m, $D_{23}=1,6$ m y $D_{31}=3,2$ m. Calcular:

- Coefficiente de autoinducción de la línea.
- Impedancia de la línea.
- Intensidad que circula por la línea según la potencia de transporte.
- Densidad de corriente en el conductor.
- Caída de tensión en la línea a plena carga, con factor de potencia 0,8 inductivo.
- Intensidad máxima que puede circular por la línea, admitiendo una densidad de corriente de 4,55 A/mm².
- Potencia máxima de transporte con factor de potencia 0,8.

Solución: a) $13,3 \cdot 10^{-4}$ H/km; b) 2,3 Ω ; c) 14,43 A; d) 0,46 A/mm²; e) 0,277 %, f) 131 A, g) 3 630 kW.

3.3-8. Calcular la potencia perdida en una línea aérea de 20 kV, 50 Hz, formada por conductores LA 110, de resistencia 0,307 Ω /km y longitud 4 km, si se transporta una potencia de 800 kW con factor de potencia 0,86 inductivo.

$$\text{La potencia perdida } P_p = \frac{R L P^2}{V_L^2 \cos^2 \varphi} = \frac{0,307 \cdot 4 \cdot 800^2}{20^2 \cdot 0,86^2} = 2\,657 \text{ W}$$

3.3-9. Calcular qué longitud máxima debe tener una línea trifásica de 20 kV, 50 Hz, con conductores LA 56 de resistencia 0,614 Ω /km, por la que circula una intensidad de línea de 80 A con factor de potencia 0,8 inductivo, para que la potencia perdida sea como máximo 2 kW.

Solución: 169 m

3.3-10. Calcular el momento eléctrico que en la línea del problema anterior provocará una pérdida de potencia del 2%, con factor de potencia 0,8 inductivo.

Solución: 8 339 km·kW

3.3-11. Una línea trifásica de 1500 m alimenta un centro de transformación de 1 000 kVA a una tensión de 20 kV. El conductor utilizado es LA 56 y la cruceta que soporta los conductores tiene una distancia entre ellos de $D_{12}=2,05$ m, $D_{23}=2,05$ m y $D_{31}=4$ m. Calcular:

- Impedancia de la línea.
- Caída de tensión porcentual en la línea con factor de potencia 0,8 inductivo.
- Pérdida de potencia en la línea.
- Densidad de corriente en el conductor.

Solución: a) 1,1 Ω ; b) 0,276%; c) 2,3 kW; d) 0,529 A/mm²

3.4. AISLADORES

Aíslan al conductor que forma la línea del apoyo que lo soporta. Se fabrican en porcelana, vidrio y esteatita con resinas epoxi.

Los aisladores se clasifican en varios tipos:

- Aisladores fijos, que pueden ser simples (de una pieza) o compuestos (de varias piezas).
- Aisladores en cadena o suspendidos, que pueden ser de caperuza y badajo (rótula) o aisladores macizos (aisladores tipo motor).
- Aisladores con montura metálica, que llevan piezas metálicas para sujetar al conductor.
- Aisladores pasantes, con un agujero longitudinal para pasar el conductor.
- Aisladores de barra o bastón, que son de gran longitud y sin partes metálicas entre soporte y conductor.
- Aisladores especiales, que pueden ser antiniebla, de costa y de baño de aceite. Presentan gran dificultad a formar arco eléctrico entre conductor y soporte.

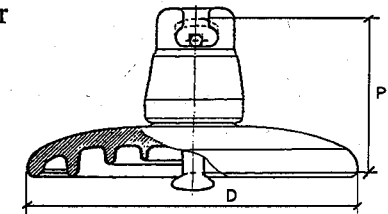


Fig. 3.3

3.5. AISLAMIENTO SUSPENDIDO EN LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN

En las líneas de aéreas de media tensión de 20 kV se utilizan aisladores en forma de campana con caperuza y badajo, como indica la figura 3.3.

Los elementos aisladores son de vidrio y soportan cada uno unos 10 kV. Se consiguen distintos niveles de aislamiento según el tipo de aislador utilizado y el número de ellos que forman la cadena. Los elementos aisladores más utilizados para líneas de 20 kV y sus características se indican en la tabla siguiente:

Tabla 3.4

Designación.	Nivel de aislamiento	Diámetro máximo D (mm)	Paso nominal P (mm)	Tensiones soportadas por un elemento	
				A frecuencia industrial bajo lluvia: Valor eficaz (kV)	A impulso tipo rayo: Valor cresta (kV)
U 40 BS	1	175	100	33	74
U 70 BS	2	255	127	45	105

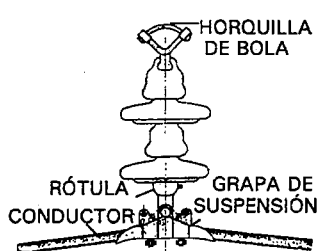


Fig. 3.4

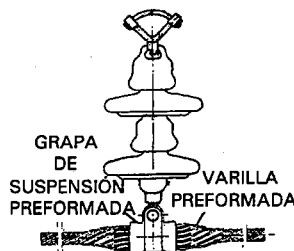


Fig. 3.5

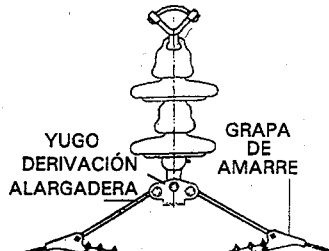


Fig. 3.6

Las cadenas que se forman son de dos tipos:

- 1) *Cadenas de suspensión.* Están formadas por la horquilla de bola (de acero galvanizado) para unir a la cruceta, por dos aisladores y la grapa de suspensión (acero galvanizado). Esta grapa de suspensión del conductor es distinta según la cadena de suspensión sea de suspensión simple (fig. 3.4), cadena de suspensión cruce (fig. 3.5) o de suspensión derivación (fig. 3.6).
- 2) *Cadenas de amarre.* Están formadas por la horquilla de bola que une la cadena a la cruceta, tres aisladores y la grapa de amarre, unida al último aislador de la cadena (fig. 3.7) por una rótula larga. Se utiliza en puntos de anclaje o de fin de línea. Se utilizan también con amarre preformado (fig. 3.8).

Actualmente se utilizan también aisladores sintéticos de composite.

3.6. APOYOS

Son los elementos de la línea aérea que soportan los conductores y demás elementos de la línea separándolos del terreno.

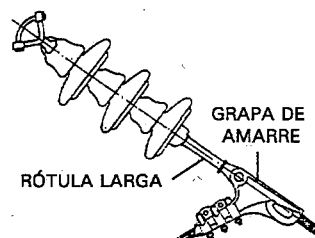


Fig. 3.7

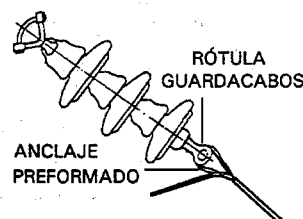


Fig. 3.8

1) Según el tipo de material, pueden ser:

- a) Madera, de pino, abeto o castaño, con tratamiento contra la putrefacción.
- b) Hormigón armado, fabricado con distintas técnicas: vibrado, pretensado y centrifugado.
- c) Metálicos de acero, de forma tubular, de perfiles laminados y de chapa metálica.

Actualmente se utilizan también apoyos de fibra de vidrio.

2) Según la función de los apoyos en la línea, estos se clasifican en:

- a) Apoyos de alineación, que sostienen los conductores y cables de tierra.
- b) Apoyos de ángulo, que sostienen la línea en los vértices de los ángulos del trazado.
- c) Apoyos de anclaje, que proporcionan puntos firmes a la línea.
- d) Apoyos de fin de línea, que soportan las tensiones de toda la línea.
- e) Apoyos especiales, utilizados para cruce de ríos, carreteras, bifurcaciones de línea, etc.

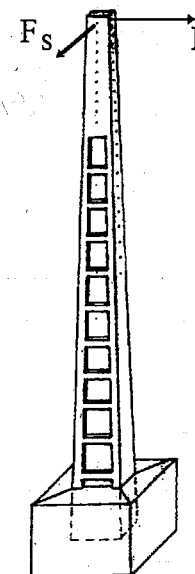


Fig. 3.9

3.7. POSTES DE HORMIGÓN EN MEDIA Y BAJA Tensión

En las líneas de distribución en M.T. y B.T. se suelen utilizar postes de hormigón vibrado y reforzados según la recomendación UNESA 6703B (fig. 3.9).

■ Designación

Se nombran por las letras HV (hormigón vibrado) seguidas del esfuerzo nominal en kp, la letra R (si es poste reforzado) o N (en poste normal), la altura en metros y la palabra UNESA.

Así el poste HV-400-R-11 UNESA, es el poste de hormigón vibrado de esfuerzo nominal 400 kp, reforzado y de altura 11 m.

■ Esfuerzo nominal

El esfuerzo nominal se identifica por el color de que está pintada la cogolla o punta del poste.

El poste normal soporta el esfuerzo nominal según la dirección principal a 0,25 m por debajo de la cogolla.

El poste reforzado soporta el esfuerzo nominal F según la dirección principal a 0,25 m por debajo de la cogolla o un esfuerzo útil $0,9F$ a una distancia de 0,75 m por encima de la cogolla, que representa la posición resultante de los esfuerzos aplicados.

Estos esfuerzos se consideran con un coeficiente de seguridad de 2,5 y aplicados simultáneamente con el esfuerzo resultante de la presión ejercida por el viento de 100 kp/m^2 en su mismo sentido sobre la superficie libre del poste.

■ Esfuerzo secundario

Es el esfuerzo máximo F_s que puede soportar un poste en dirección secundaria aplicado a 0,25 m por debajo de la cogolla con un coeficiente de seguridad igual que para el esfuerzo nominal.

■ Cimentación

Se utiliza para la cimentación hormigón con dosificación de 200 kg/m³ y resistencia mecánica mínima de 120 kp/m². (se utilizan 1350 kp de grava, 675 kp de arena seca, 180 litros de agua y 200 kg de cemento tipo portland P-350). Los macizos de cimentación, con las dimensiones indicadas en la tabla 3.5, quedan a unos 10 cm por encima del terreno y con una pequeña pendiente como vierte-aguas (fig. 3.10).

Tabla 3.5

APOYOS	ALTURA TOTAL m	COLOR DE IDENTIFICACIÓN	CIMENTACIÓN EN TERRENO NORMAL	
			LADO l (m)	ALTURA h _e (m)
HV-160-R	9	NARANJA	0,6	1,2
	11		0,6	1,4
HV-250-R	9	NEGRO	0,6	1,4
	11		0,6	1,5
	13		0,6	1,7
HV-400-R	9	AZUL	0,7	1,4
	11		0,7	1,5
	13		0,7	1,7
HV-630-R	9	ROJO	0,8	1,5
	11		0,8	1,6
	13		0,8	1,7
	15		0,8	1,9
HV-1000-R	9	VERDE	0,8	1,8
	11		0,8	1,9
	13		0,8	1,9
	15		0,8	2

■ Bornes de puesta a tierra de los apoyos

El poste lleva en la cara más estrecha dos bornes de puesta a tierra, con tornillos galvanizados. Uno a unos 2 m por debajo de la cogolla y otro a unos 2 m de la base.

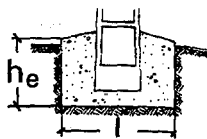


Fig. 3.10

■ Identificación

Situado aproximadamente a 4 m de la base del poste está colocada una placa de identificación (con el nombre del fabricante, fecha de fabricación, número de serie y designación), y en las líneas M.T. una placa de riesgo eléctrico.

También se utilizan actualmente apoyos huecos de hormigón HVH, con menos peso que los apoyos HV.

3.8. APOYOS METÁLICOS DE CELOSÍA PARA MEDIA TENSIÓN

Se utilizan apoyos de celosía metálica en media tensión, como apoyos de anclaje, de ángulo, de cruce y de fin de línea.

Está formado por perfiles laminados de acero montados en celosía de forma tronco piramidal y unidos a los cuatro montantes por tornillos o soldadura eléctrica (fig. 3.11). Todos los materiales féreos están galvanizados en caliente.

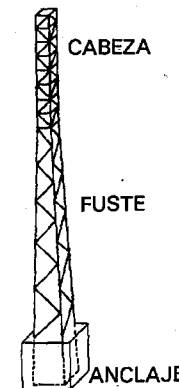


Fig. 3.11

■ Designación

Se nombran por la letra C (apoyo de celosía) seguidas del esfuerzo nominal en kp, la altura en metros y la palabra UNESA.

Así el apoyo C-500-12-UNESA, es el apoyo de celosía de esfuerzo nominal 500 kp, y de altura 12 m.

■ Esfuerzo nominal

Es el esfuerzo horizontal que soporta el apoyo en el extremo superior, según la dirección principal y aplicado simultáneamente con la resultante de la presión del viento y con la acción de las cargas verticales del apoyo.

El esfuerzo secundario es el esfuerzo horizontal que soporta el apoyo según la dirección secundaria y aplicado simultáneamente con las cargas verticales especificadas para el apoyo. Estos esfuerzos se consideran con un coeficiente de seguridad de 1,5.

■ Cimentación

Se utiliza para la cimentación hormigón con una dosificación de 200 kg/m³ y resistencia mecánica mínima de 120 kp/m², igual que en apoyos de hormigón. Los macizos de cimentación, con las dimensiones indicadas en la tabla, quedan a unos 10 cm por encima del terreno (20 cm en terrenos de cultivo) y con la parte superior terminada en punta de diamante con una pequeña pendiente como vierte-aguas (fig. 3.12).

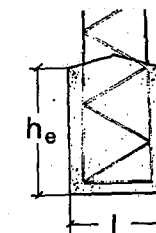


Fig. 3.12

Por encima de la cimentación, en las zonas de pública concurrencia, se utiliza una protección antiescala consistente en una chapa de hierro galvanizado que rodea el apoyo con una altura de unos 2 m (fig. 3.13).

Los apoyos metálicos más utilizados y su cimentación se indican en la tabla siguiente:

Tabla 3.6

APOYO	ALTURA TOTAL m	CIMENTACIÓN EN TERRENO NORMAL	
		LADO l (m)	ALTURA h _c (m)
C-1000	20	1,5	1,8
C-2000	12	1,1	2,1
	14	1,2	2,2
	16	1,3	2,2
	18	1,4	2,2
	20	1,5	2,2
C-3000	12	1,1	2,4
	14	1,2	2,4
	16	1,3	2,4
	18	1,4	2,5
	20	1,5	2,5
C-4500	12	1,1	2,6
	14	1,2	2,6
	16	1,3	2,7
	18	1,4	2,8
	20	1,5	2,8
C-7000	14	1,8	2,7
	16	1,8	2,8
	18	2	2,8
C-9000	14	1,8	2,9
	16	1,8	3
	18	2	3

La base del apoyo se coloca entre 0,1 m y 0,2 m sobre el fondo de la cimentación.

■ Bornes de puesta a tierra de los apoyos

El apoyo lleva un taladro a 0,4 m del suelo, en cada uno de los cuatro montantes, para el tornillo de conexión de puesta a tierra.

■ Placa de riesgo eléctrico

Situada como mínimo a 2 m del suelo se coloca la placa de riesgo eléctrico.

Se utilizan actualmente apoyos de chapa metálica con la denominación CH.

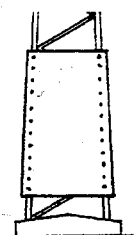


Fig. 3.13

3.9. CRUCETAS

Sujetan los soportes de los aisladores a los apoyos.

Según el tipo de apoyos, las crucetas son de diversos materiales:

LÍNEAS AÉREAS

- En apoyos de madera, se utiliza madera o hierro,
- En apoyos de hormigón, se utiliza acero galvanizado.
- En apoyos metálicos, se utilizan perfiles laminados de acero.

3.10. CRUCETAS PARA APOYOS DE HORMIGÓN EN MEDIA TENSIÓN

Las crucetas utilizadas en postes de hormigón son de varios tipos. Las más utilizadas son de tipo bóveda (fig. 3.14) y de tipo rectas, éstas a su vez son de simple o de doble circuito (fig. 3.15).

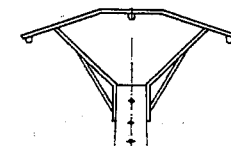


Fig. 3.14

3.11. CRUCETAS PARA APOYOS METÁLICOS EN MEDIA TENSIÓN

Las crucetas utilizadas en apoyos de celosía son de hierro galvanizado y los armados más utilizados son de los tipos:

- Bóveda, utilizada en apoyos de alineación, que puede ser bóveda horizontal (fig. 3.16), utilizada en apoyos de anclaje.
- Horizontal, utilizada en apoyos en ángulo, y cruceta armada en triángulo como indica la figura 3.17.
- Tresbolillo, y para doble circuito, armado en exágono (fig. 3.18).

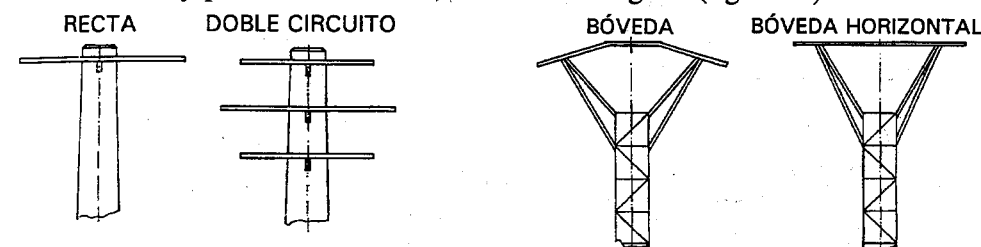


Fig. 3.15

Fig. 3.16

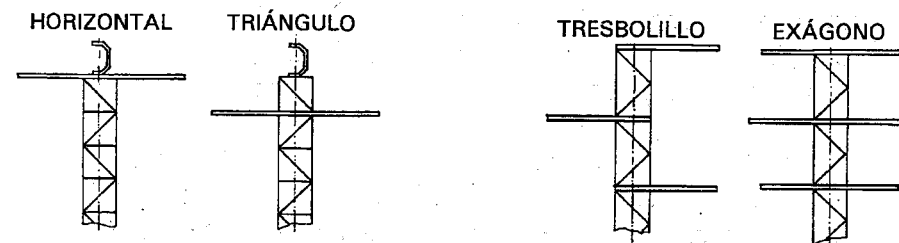


Fig. 3.17

Fig. 3.18

3.12. HERRAJES

Son los soportes de los aisladores, contruidos de acero galvanizado, que sujetan el aislador a la cruceta. En los cables trenzados los herrajes son ganchos de acero galvanizado para amarre o suspensión del haz al apoyo.

La sujeción del herraje se realiza según el tipo de aislador:

Aislador fijo: se une al herraje mediante yeso o cemento, en líneas de media tensión (fig. 3.19) y en baja tensión (fig. 3.20). Estos aisladores rígidos se utilizan en apoyos de madera y están actualmente en desuso.

Aislador de suspensión: se une al herraje mediante horquilla de bola y al conductor mediante rótula, que sostiene la grapa de amarre o de suspensión como indica la figura 3.21.

3.13. ANTIVIBRATORIOS

Para reducir la vibración de los conductores en la línea se utilizan elementos antivibratorios:

- varillas de armar, que son un conjunto de varillas redondas arrolladas en espiral sobre una porción del conductor.
- Amortiguadores, que consisten en unos contrapesos sujetos al conductor. En la figura 3.22 se representa un amortiguador stock-bridge.

3.14. EMPALMES Y DERIVACIONES EN LAS LÍNEAS AÉREAS DE MEDIA TENSIÓN

Se llama empalme a la unión de conductores que asegura su continuidad eléctrica y mecánica (R.L.A.T. artículo 8). Los empalmes no deberán aumentar la resistencia eléctrica del conductor y podrán soportar sin deslizamiento ni rotura el 90% de la carga de rotura del cable empalmado. No se pueden utilizar empalmes por soldadura a tope, ni colocar más de un empalme por vano y conductor excepto caso de reparación de avería.

Se llama conexión a la unión de conductores que asegura su continuidad eléctrica. La conexión no debe aumentar la resistencia eléctrica del conductor. La unión de conductores de distinta sección o naturaleza se realiza en el puente de conexión de las cadenas horizontales de amarre.

Los empalmes a plena tracción para los cables aluminio acero utilizados en las líneas aéreas de media tensión se hacen mediante un manguito de unión por engastado (fig. 3.23). Se utiliza un manguito de acero para unir el cable de acero y después se coloca el manguito exterior de aluminio.



AISLADOR A.T.
Fig. 3.19



AISLADOR B.T.
Fig. 3.20



HORQUILLA
RÓTULA
Fig. 3.21



CONDUCTOR
Fig. 3.22

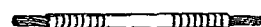


Fig. 3.23

LÍNEAS AÉREAS

Las derivaciones en los cables de aluminio acero se realizan mediante conector a presión o mediante grapa que une por compresión mecánica por medio de tornillos (fig. 3.24).

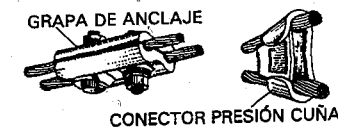


Fig. 3.24

3.15. CÁLCULO MECÁNICO DE CABLES

Un cable que cuelga bajo la acción de su propio peso P está sometido a fuerzas de tracción dirigidas según la tangente a la curva que forma. Considerando un trozo de cable desde el punto más bajo de la curva C hasta otro punto D (fig. 3.25). La tensión en C es una fuerza horizontal T y en D una fuerza T_D tangente al cable en ese punto. Como el trozo de cable está en equilibrio, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre él es nula. De aquí se obtienen las siguientes relaciones:

$$T_D = \sqrt{T^2 + P^2}; \quad T_D \cos \theta = T; \quad T_D \sin \theta = P; \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{P}{T}$$

De estas relaciones se deduce que la tensión horizontal T es constante en todos los puntos, y que la tensión T_D es mínima en el punto más bajo y máxima en uno de los dos soportes.

El cable que cuelga por su propio peso está sometido a una carga distribuida a lo largo de su longitud. Si la carga se considera distribuida a lo largo de una línea horizontal, designando por p el peso por unidad de longitud horizontal y tomando el origen de unos ejes de coordenadas en el punto más bajo C del cable (fig. 3.26), la carga total que soporta el cable entre C y otro punto D de coordenadas (x, y) es $P = px$. Las siguientes relaciones definen la tensión y su dirección en D :

$$T_D = \sqrt{T^2 + p^2 x^2}; \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{px}{T}$$

Como la porción de cable está en equilibrio, la suma de momentos de las fuerzas que actúan sobre él, respecto a un punto debe ser cero. Tomando momentos respecto a D :

$$px \frac{x}{2} - Ty = 0; \quad y = \frac{p}{2T} x^2$$

Ésta es la ecuación de una parábola de eje vertical con vértice en el origen de coordenadas.

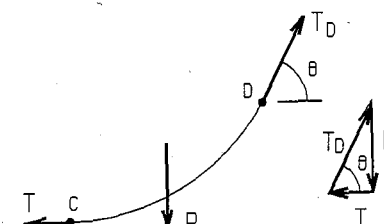


Fig. 3.25

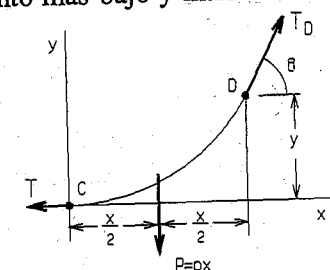


Fig. 3.26

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.15-1. Un vano de una línea aérea con conductores LA 30 es de 110 m. El conductor con un peso 0,108 kp/m, que suponemos distribuido sobre la horizontal, está tendido con una tensión de 70 kp. Calcular:

- Tensión horizontal.
- Ángulo que forma el conductor con la horizontal en el punto de amarre.
 - El peso de la mitad del cable en el vano: $P = p \cdot x = 0,108 \cdot \frac{110}{2} = 5,94$ kp

La tensión horizontal es la tensión en el punto más bajo del cable:

$$T = \sqrt{T_D^2 - P^2} = \sqrt{70^2 - 5,94^2} = 69,75 \text{ kp}$$

- El ángulo que forma el cable en el punto de amarre:

$$\theta = \text{áng} \text{tg} \frac{P}{T} = \frac{5,94}{69,75} = 4,87^\circ$$

3.15-2. Un conductor eléctrico que forma parte de una línea aérea, está tendido sobre un vano horizontal de 80 m. El peso del cable es 0,43 kp/m. Si consideramos que el conductor forma una parábola, calcular la tensión a que está sometido en un extremo si la tensión en el punto más bajo es de 260 kp.

Solución: 260,57 kp.

3.16. CÁLCULO DE LA FLECHA

Se llama flecha f a la mayor distancia vertical entre la recta que une los puntos de amarre del conductor con los puntos de apoyo y el conductor (fig. 3.27). La curva que forma el conductor sometido a su propio peso se llama catenaria; pero para simplificar los cálculos en la práctica esta curva se considera una parábola.

Según la ecuación de la parábola del cable, la flecha en tramo horizontal:

$$f = \frac{p \cdot a^2}{8 \cdot T} \quad (\text{m})$$

p : Peso del conductor con sobrecarga (kp/m).

a : Luz horizontal del vano (m).

T : Tensión horizontal, que permanece constante en cualquier punto de la curva del conductor, e igual a la tensión en el punto más bajo.

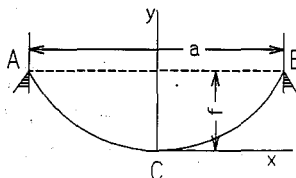


Fig. 3.27

DEMOSTRACIÓN

Considerando el origen de coordenadas en el punto más bajo, la distancia horizontal a un extremo:

$$x = \frac{a}{2}$$

La flecha, igual a la máxima distancia vertical:

$$y = f = \frac{px^2}{2T} = \frac{pa^2}{8T}$$

Se admite como válido este cálculo para vanos menores de 300 m y con apoyos con desnivel menor del 10%.

$$\text{La longitud del cable: } l = a + \frac{8f^2}{3a} = a + \frac{a^3 p^2}{24T^2}$$

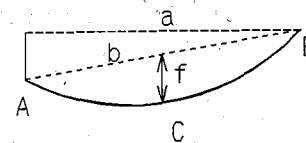


Fig. 3.28

En vanos con apoyos situados a distinto nivel, con luz horizontal a y distancia entre los apoyos b (fig. 3.28), la flecha en el centro del vano se calcula con suficiente aproximación por la fórmula:

$$f = \frac{pab}{8T}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.16-1. Un conductor eléctrico LA 56 está tendido en un vano de 100 m, con un flecha de 1,2 m. Si la carga es de 0,189 kp/m y se considera distribuida sobre la horizontal. Calcular:

- Tensión horizontal.
- Tensión en un extremo.
- Longitud del conductor en el vano.
 - De la fórmula de la flecha se obtiene la tensión horizontal:

$$f = \frac{p \cdot a^2}{8 \cdot T}; \quad T = \frac{p \cdot a^2}{8 \cdot f} = \frac{0,189 \cdot 100^2}{8 \cdot 1,2} = 196,88 \text{ kp}$$

- Considerando la mitad de la parábola que forma el cable, el peso:

$$P = p \cdot \frac{a}{2} = 0,189 \cdot 50 = 9,45 \text{ kp}$$

La tensión en un extremo: $T_D = \sqrt{T^2 + P^2} = \sqrt{196,88^2 + 9,45^2} = 197,1 \text{ kp}$

- La longitud del conductor: $l = a + \frac{8f^2}{3a} = 100 + \frac{8 \cdot 1,2^2}{3 \cdot 100} = 100,04 \text{ m}$

3.16-2. Un conductor LA 110, de peso 0,433 kp/m, está tendido en un vano horizontal de 120 m con una tensión horizontal de 800 kp. Calcular:

- Flecha.
- Tensión máxima.
- Pendiente en un extremo.
- Longitud del conductor.

Solución: a) 0,974 m; b) 800,42 kp; c) 1,86°; d) 120,021 m

3.16-3. Un conductor LA 110 está sujeto a un apoyo de alineación por una cadena de suspensión, siendo los vanos contiguos al apoyo de 100 y 80 m. Si la carga que se supone distribuida horizontalmente es de 0,433 kp/m. Calcular:

- Tensión horizontal, que es igual para los dos vanos, sabiendo que la flecha en el vano de 80 m es de 1,5 m.
- Flecha en el vano de 100 m.

c) Tensión máxima en cada vano.

Solución: a) 231 kp; b) 2,34 m; c) $T_1=232$ kp, $T_2=231,65$ kp.

3.17. ECUACIÓN DEL CAMBIO DE CONDICIONES

La ecuación del cambio de condiciones relaciona la tensión mecánica de un cable, en unas condiciones dadas, con la tensión en otras condiciones distintas.

Consideremos un conductor de sección s , colocado en un vano de luz a , siendo p_1 la carga por unidad de longitud. A una temperatura Θ_1 le corresponde una tensión T_1 ; si varían los valores de p_1 a p_2 y de Θ_1 a Θ_2 , se producirá también una nueva tensión mecánica T_2 .

$$\text{La variación de la longitud del conductor } l_1 - l_2 = \frac{a^3 p_1^2}{24 T_1^2} - \frac{a^3 p_2^2}{24 T_2^2}$$

Esta variación de longitud es debida a los efectos de dilatación producida por la diferencia de temperaturas, $(\Theta_1 - \Theta_2)$, y de elasticidad del cable debido a la diferencia de tensiones mecánicas, $(T_1 - T_2)$.

La variación de longitud debida a la dilatación, siendo α el coeficiente de dilatación lineal, y considerando la luz del vano a aproximadamente igual a la longitud del cable:

$$a\alpha(\Theta_1 - \Theta_2)$$

La variación de longitud debida a la elasticidad, siendo E el módulo de elasticidad del cable (relación entre la carga o tensión mecánica por unidad de sección y la deformación por unidad de longitud):

$$\frac{a}{sE}(T_1 - T_2)$$

$$\text{Entonces, la variación de longitud: } \frac{a^3 p_1^2}{24 T_1^2} - \frac{a^3 p_2^2}{24 T_2^2} = a\alpha(\Theta_1 - \Theta_2) + \frac{a}{sE}(T_1 - T_2)$$

Esta expresión se llama *ecuación del cambio de condiciones*. Suele expresarse en función de la tensión mecánica, de la temperatura y la carga por unidad de longitud, de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} T_2^2(T_2 + A) &= B \\ A &= \frac{s \cdot E \cdot a^2 \cdot p_1^2}{24 \cdot T_1^2} - T_1 - \alpha \cdot s \cdot E (\Theta_1 - \Theta_2) \\ B &= \frac{s \cdot E \cdot a^2 \cdot p_2^2}{24} \end{aligned}$$

T_1 : Tensión inicial (kp).

T_2 : Tensión final después de cambio de condiciones (kp).

Θ_1 : Temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$).

Θ_2 : Temperatura final ($^{\circ}\text{C}$).

p_1 : Carga mecánica inicial (kp/m).

p_2 : Carga mecánica final (kp/m).

a : Longitud del vano (m).

s : Sección del conductor (mm^2).

E : Módulo de elasticidad (kp/ mm^2).

α : Coeficiente de dilatación del conductor ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Se obtiene así para cada temperatura, la tensión de tendido, resolviendo la ecuación del cambio de condiciones. Así se confeccionan tablas de tendido para cada conductor, según la longitud del vano y la temperatura.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.17-1. Un cable conductor LA 30 en un vano horizontal, de luz 120 m, se tiende a 15°C con una tensión mecánica de 71 kp, sin viento en zona B. Calcular:

a) Flecha si la carga está distribuida a lo largo de la horizontal, siendo el peso del conductor $p=0,1079$ kp/m.

b) Tensión a la que estará sometido el cable si la temperatura aumenta a 25°C sin viento, siendo $E=8\,100$ kp/ mm^2 , $\alpha=19,1 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ y la sección $s=31,1$ mm^2 .

c) Flecha en este último caso.

a) Considerando la tensión mecánica de tendido aproximadamente igual a la tensión horizontal.

$$\text{La flecha } f = \frac{p \cdot a^2}{8 \cdot T} = \frac{0,1079 \cdot 120^2}{8 \cdot 71} = 2,74 \text{ m}$$

b) Para calcular la nueva tensión a la que está sometido el conductor a la temperatura $\Theta_2=25^{\circ}\text{C}$ y sin sobrecarga, se utiliza la ecuación del cambio de condiciones.

$$T_2^2(T_2 + A) = B$$

El valor del coeficiente A se calcula por la fórmula:

$$A = \frac{s \cdot E \cdot a^2 \cdot p_1^2}{24 \cdot T_1^2} - T_1 - \alpha \cdot s \cdot E (\Theta_1 - \Theta_2)$$

$$A = \frac{31,1 \cdot 8\,100 \cdot 120^2 \cdot 0,1079^2}{24 \cdot 71^2} - 71 - 19,1 \cdot 10^{-6} \cdot 31,1 \cdot 8\,100 \cdot (15 - 25) = 326$$

El valor del coeficiente B:

$$B = \frac{s \cdot E \cdot a^2 \cdot p_2^2}{24} = \frac{31,1 \cdot 8\,100 \cdot 120^2 \cdot 0,1079^2}{24} = 1759704 = 176 \cdot 10^4$$

La ecuación del cambio de condiciones toma la forma: $T_2^2(T_2 + 326) = 176 \cdot 10^4$

Esta ecuación se resuelve por tanteos, siendo la solución con suficiente aproximación $T_2=67$ Kp.

c) La tensión a la que está sometido el conductor en las nuevas condiciones es:

$$T_2 = t_2 \cdot s = 2,15 \cdot 31,1 = 66,86 \text{ kp} \approx 67 \text{ kp}$$

$$\text{La flecha con esta tensión: } f_2 = \frac{p_2 \cdot a^2}{8 \cdot T} = \frac{0,1079 \cdot 120^2}{8 \cdot 67} = 2,89 \text{ m} \approx 2,9 \text{ m}$$

3.17-2. Una línea eléctrica aérea con conductor LA 56 tiene un vano horizontal de longitud 100 m, en donde el cable conductor está sometido a una tensión de 143 kp a 20°C sin sobrecarga por viento o hielo. Calcular:

- La tensión a que estará sometido el cable si la temperatura baja a 5°C sin sobrecarga sobre el conductor, sabiendo que para este cable de sección $s=54,6 \text{ mm}^2$, el peso $p=0,1891 \text{ kp/m}$, $E=8100 \text{ kp/mm}^2$ y $\alpha=19,1 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
- Flecha del conductor en este caso.

Solución: a) 171,5 kp; b) 1,4 m

3.18. CÁLCULOS MECÁNICOS DE LOS CONDUCTORES DE LA LÍNEA DE M.T.

Las condiciones de cálculo se indican en el capítulo cuarto del Reglamento de Líneas Aéreas de Alta Tensión (R.L.A.T.). El cálculo mecánico se realiza teniendo en cuenta las cargas y sobrecargas que intervienen sobre los elementos que forman la línea aérea.

■ Cargas permanentes

Cargas verticales debidas al peso propio de los elementos que forman la línea: conductores, aisladores, herrajes, apoyos y cimentaciones.

■ Presiones debidas al viento

Se indican las presiones en kp/m^2 sobre los distintos elementos de la línea, considerando un viento de 120 km/h.

- Sobre cables de diámetro igual o inferior a 16 mm, 60 kp/m^2
- Sobre cables de diámetro superior a 16 mm, 50 kp/m^2

Se calcula la sobrecarga por viento $P_v = p_v \cdot d$ (kp/m)

p_v : Presión del viento (kp/m^2).

d : Diámetro del conductor (m).

El peso del conductor con sobrecarga (fig. 3.29) $P_T = \sqrt{P_v^2 + P^2}$ (kp/m)

Siendo P el peso del conductor (kp/m).

■ Sobrecargas motivadas por el hielo

Según la zona, de acuerdo con la altitud:

- Zona A, de altitud sobre el nivel del mar menor de 500 m.
- Zona B, de altitud entre 500 y 1 000 m.
- Zona C, de altitud mayor de 1 000 m.

Se consideran sobrecargas por hielo P_h en las zonas B y C (R.L.A.T. artículo 17) en kp/m.

$$P_h = k\sqrt{d} \quad (\text{kp/m})$$

d : Diámetro del conductor (mm).

k : Constante, de valor 0,18 en zona B y 0,36 en zona C.

El peso con sobrecarga (fig. 3.30) $P_T = P_h + P$ (kp/m).

Siendo P el peso del conductor (kp/m).

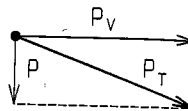


Fig. 3.29



Fig. 3.30

■ Desequilibrio de tracciones

En el tensado de los cables conductores de una línea se equilibra la tensión en los vanos contiguos. Si estos vanos no son de la misma longitud, cuando varían las condiciones de sobrecarga o temperatura, variarán los valores de la tensión mecánica, produciéndose un desequilibrio de tracciones que se transmiten al apoyo.

Los valores de tensión de desequilibrio a considerar según el tipo de apoyo (R.L.A.T. artículo 18).

Apoyos de alineación y ángulo, el 8% de las tracciones unilaterales de todos los cables.

Apoyos de anclaje, el 50% de las tracciones unilaterales de todos los cables.

Apoyos de fin de línea, el 100% de las tracciones unilaterales de todos los cables.

■ Rotura de conductores

En el Reglamento de Alta Tensión (R.L.A.T. 18), se consideran los esfuerzos y su punto de aplicación en el apoyo cuando se produce la rotura de un cable.

■ Esfuerzos resultantes de ángulo

En los apoyos en ángulo se tiene en cuenta el esfuerzo resultante de las tracciones de los cables que están unidos al apoyo.

■ Tracción máxima admisible

Según el Reglamento de Alta Tensión (R.L.A.T. artículo 27), la tracción máxima de los conductores no resultará superior a su carga de rotura dividida por 2,5 si se trata de cables (varios alambres trenzados) o dividida por 3 si se trata de alambres (un solo conductor).

La temperatura de hipótesis, para máxima tensión, se escoge de acuerdo con la altitud por donde transcurre el tendido de la línea, según el Reglamento (R.L.A.T. artículo 27).

Tabla 3.7

Condición	Zona A		Zona B		Zona C	
	Temperatura	Sobrecarga	Temperatura	Sobrecarga	Temperatura	Sobrecarga
Máxima tensión.	-5 °C	Viento	-15 °C	Hielo	-20 °C	Hielo

Cuando la tensión mecánica a que está sometido el conductor es elevada, llegan a producirse, por efecto del viento, fenómenos vibratorios que pueden llegar a romperlo. Para evitar estas vibraciones se limita la tensión mecánica. Según el proyecto tipo UNESA para líneas de M.T. con cables de aluminio-acero se fija que a 15°C de temperatura y sin viento el conductor tenga como máximo una "tensión de cada día" EDS (Every-day-stress) del 15% de su carga de rotura. Para cables de menor sección que el LA-110, se elige EDS inferior al 15%.

El Reglamento de Líneas Aéreas de Alta Tensión no indica valores orientativos de EDS.

■ Flecha máxima

Las flechas máximas se calculan según las hipótesis fijadas por el Reglamento (R.L.A.T. artículo 27).

Tabla 3.8

Condición	Zona A		Zona B		Zona C	
	Temperatura	Sobrecarga	Temperatura	Sobrecarga	Temperatura	Sobrecarga
Máxima flecha	-	-	0 °C	Hielo	0 °C	Hielo
	15 °C	Viento	15 °C	Viento	15 °C	Viento
	50 °C	Ninguna	50 °C	Ninguna	50 °C	Ninguna

■ Vano ideal de regulación

Para el emplazamiento de los apoyos, según las curvas de nivel del terreno por donde discurre la línea, hay que tener en cuenta que las curvas del conductor deben ser porciones de una misma catenaria (fig. 3.31). Los apoyos se van colocando siguiendo las partes elevadas del terreno. Como orientación, en las líneas de M.T. los vanos suelen ser de unos 100 m a 200 m de longitud horizontal o luz.

La igualación de tensiones horizontales en todos los vanos, exige que la línea se dividida en tramos de menos de 3 km, con apoyos de anclaje y cadenas de aisladores de amarre, de manera que la tensión mecánica de los conductores no se transmita de un tramo a otro.

Se procura que todos los tramos tengan longitudes similares, de manera que nunca uno llegue a ser al doble del otro.

Se admite que la tensión a que están sometidos los cables, iguales en todos los vanos que forman un tramo, varían como lo haría el de un vano teórico, llamado "vano ideal de regulación". El vano de regulación a_r en cada tramo para el tendido de la línea se calcula de la forma:

$$a_r = \sqrt{\frac{\sum a^3}{\sum a}}$$

a: Longitud de cada vano en el tramo considerado.

De forma aproximada y según proyecto tipo de UNESA, se puede admitir como vano de regulación:

$$a_r = \text{vano medio} + \frac{2}{3}(\text{vano máximo} - \text{vano medio})$$

Al tener la misma tensión en todos los vanos del tramo, la relación entre la flecha en un vano f y la flecha del vano de regulación f_r es la relación entre el cuadrado de las longitudes de los vanos:

$$\frac{f}{f_r} = \left(\frac{a}{a_r} \right)^2$$

■ Parábola de replanteo

La parábola de replanteo del vano de regulación se traza considerando la flecha máxima. Se representa en papel milimetrado y se lleva sobre el perfil de la línea para comprobar que la altura del conductor sobre el terreno no sea, en el punto más desfavorable de cada vano, inferior a 6 m.

Las escalas mínimas que se utilizan para el trazado en plano de la línea son:

- Horizontal 1:2 000
- Vertical: 1:500

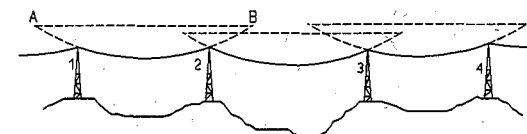


Fig. 3.31

■ Tensión de tendido

La línea está dividida en tramos definidos por los apoyos de anclaje.

Para el tendido de la línea es

necesario hallar el vano ideal de regulación en cada tramo y la tensión mecánica con que debe tenderse el cable.

Para el cálculo de las tablas de tendido se conoce la tensión mecánica en la hipótesis más desfavorable. Aplicando la ecuación de cambio de condiciones puede calcularse la tensión mecánica y la flecha para distintos vanos de regulación y temperaturas (se suelen realizar para temperaturas de 5 °C a 50 °C). El tendido debe realizarse en días sin viento, por lo que en el cálculo no intervienen sobrecargas, siendo la temperatura la única variable. En la tabla 3.9 se representa la tabla de tendido para conductor LA 30 en zona A, con tense máximo 336 daN¹, con vanos y flechas en metros.

Tabla 3.9. Tabla de tendido de conductor LA 30 en zona A con tense máximo 336 daN

V a n o s	Tabla de tendido																						Tensión máxima		
	50 °C		40 °C		35 °C		30 °C		25 °C		20 °C		15 °C		10 °C		5 °C		0 °C		15 °C+v			-5 °C+v	
	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T		f	T
50	0,4	77	0,3	103	0,3	119	0,2	138	0,2	158	0,2	180	0,2	202	0,2	225	0,1	247	0,1	271	0,5	267	0,4	336	
70	0,8	79	0,7	96	0,6	107	0,6	120	0,5	135	0,4	152	0,4	171	0,3	191	0,3	212	0,3	234	1,0	279	0,8	336	
80	1,1	79	0,9	93	0,8	102	0,8	113	0,7	125	0,6	140	0,6	156	0,5	174	0,5	193	0,4	213	1,2	285	1,1	336	
90	1,4	80	1,2	91	1,1	98	1,0	107	0,9	117	0,9	128	0,8	142	0,7	157	0,6	174	0,6	192	1,5	290	1,3	336	
100	1,7	80	1,5	90	1,4	95	1,3	102	1,2	110	1,1	119	1,0	130	0,9	142	0,9	156	0,8	172	1,9	294	1,6	336	
110	2	80	1,8	88	1,8	93	1,7	99	1,6	105	1,5	112	1,4	121	1,3	131	1,2	142	1,1	154	2,2	298	2,0	336	
120	2,4	80	2,2	87	2,1	91	2,0	96	1,9	101	1,8	107	1,7	114	1,6	121	1,5	130	1,4	140	2,6	302	2,4	336	
130	2,8	81	2,6	87	2,5	90	2,4	94	2,3	98	2,2	103	2,1	108	2,0	114	1,9	121	1,8	129	3,1	305	2,8	336	
140	3,3	81	3,1	86	3,0	89	2,9	92	2,8	96	2,6	100	2,5	104	2,4	109	2,3	114	2,2	120	3,5	308	3,2	336	
150	3,7	81	3,5	85	3,4	88	3,3	91	3,2	94	3,1	97	3,0	101	2,9	105	2,8	109	2,7	114	4,0	310	3,7	336	
175	5,1	81	4,9	85	4,8	86	4,7	88	4,6	91	4,4	93	4,3	95	4,2	98	4,1	101	4,0	104	5,4	315	5,0	336	
200	6,6	81	6,4	84	6,3	85	6,2	87	6,1	88	6,0	90	5,9	92	5,8	94	5,6	95	5,5	98	6,9	319	6,6	336	

¹ Se utiliza también como unidad de fuerza en el cálculo de las líneas aéreas el decaNewton, que en la práctica se puede considerar equivalente al kilopondio.

1 kp = 9,81 N = 10 N = 1 daN

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.18-1. Una línea eléctrica a 20 kV discurre a una altitud de unos 800 m con una longitud de 3 km. Se utiliza conductor LA 30. Calcular:

- Coeficiente de seguridad si se utiliza como tense máximo 336 kp.
- Sobrecarga por viento.
- Sobrecarga por hielo.
- Calcular la flecha máxima a 50°C, sin viento, en un tramo de alineación de vano máximo horizontal 110 m y vano medio 80 m. El tense máximo se considera a -15°C con sobrecarga de hielo.

e) Parábola de replanteo.

Los datos necesarios del conductor son:

- Carga mínima de rotura del cable: 1 010 kp.
- Sección del conductor: 31,1 mm².
- Diámetro del conductor: 7,14 mm.
- Peso: 107,9 kp/km = 0,1079 kp/m.
- Módulo de elasticidad: E = 8 100 kp/mm².
- Coeficiente de dilatación: $\alpha = 19,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

a) El coeficiente de seguridad $\frac{1\,010}{336} = 3$

b) La sobrecarga debida a la presión del viento en sentido horizontal:

$$P_v = p_v \cdot d = 60 \cdot 0,00714 = 0,4284 \text{ kp/m}$$

La carga del conductor con la sobrecarga debida al viento:

$$P_T = \sqrt{P_v^2 + P^2} = \sqrt{0,1079^2 + 0,4284^2} = 0,442 \text{ kp/m}$$

c) La sobrecarga debida al hielo: $P_h = k\sqrt{d} = 0,18\sqrt{7,14} = 0,481 \text{ kp/m}$

La carga del conductor con la sobrecarga debida al hielo:

$$P_T = P_h + P = 0,1079 + 0,481 = 0,5889 \text{ kp/m}$$

d) Para el cálculo de la flecha se halla la tensión a 50°C a que está sometido el conductor por la ecuación del cambio de condiciones.

El vano de regulación:

$$a_r = \text{vano medio} + \frac{2}{3}(\text{vano máximo} - \text{vano medio}) = 80 + \frac{2}{3}(110 - 80) = 100 \text{ m}$$

La ecuación del cambio de condiciones $T_2^2(T_2 + A) = B$

El valor del coeficiente A:

$$A = \frac{s \cdot E \cdot a^2 \cdot p_1^2}{24 \cdot T_1^2} - T_1 - \alpha \cdot s \cdot E (\Theta_1 - \Theta_2)$$

$$A = \frac{31,1 \cdot 8\,100 \cdot 100^2 \cdot 0,5889^2}{24 \cdot 336^2} - 336 - 19,1 \cdot 10^{-6} \cdot 31,1 \cdot 8\,100 \cdot (-15 - 50) = 299,2$$

El valor del coeficiente B:

$$B = \frac{s \cdot E \cdot a^2 \cdot p_2^2}{24} = \frac{31,1 \cdot 8\,100 \cdot 100^2 \cdot 0,1079^2}{24} = 1\,222\,016 \approx 122 \cdot 10^4$$

La ecuación del cambio de condiciones toma la forma $T_2^2(T_2 + 299,2) = 122 \cdot 10^4$

Esta ecuación se resuelve por tanteos, siendo la solución con suficiente aproximación $T_2 = 58,4 \text{ Kp}$.

La flecha con esta tensión en el vano máximo:

$$f_2 = \frac{p_2 \cdot a^2}{8 \cdot T} = \frac{0,1079 \cdot 110^2}{8 \cdot 58,4} = 2,79 \text{ m}$$

e) La parábola de replanteo tiene la ecuación que corresponde con la tensión sin sobrecarga para la flecha máxima.

$$y = \frac{px^2}{2T} = \frac{0,1079x^2}{2 \cdot 58,4} = 9,24 \cdot 10^{-4} x^2$$

3.18-2. Un cable LA 56 en un vano horizontal de 100 m, en una altitud de 400 m sobre el nivel del mar, a la temperatura de 15°C con viento tiene de flecha 1,6 m. Calcular:

a) Peso del conductor con sobrecarga.

b) Tensión del cable.

Solución: a) 0,598 kp/m; b) 467 kp

3.18-3. Calcular la carga unitaria del conductor LA 56, si sometido a una tracción de 456 kp en un vano de 120 m, si la flecha es de 2,4 m.

Solución: 0,608 kp/m.

3.18-4. Un tramo recto de una línea aérea trifásica de 20 kV, 50 Hz, se encuentra situada a una altitud de 1 050 m sobre el nivel del mar. Consta de cuatro vanos, de longitudes: 100-90-110 y 100 m. La línea está formada por cable LA 56 de las siguientes características: sección $s = 54,6 \text{ mm}^2$, diámetro 9,45 mm, carga de rotura 1 670 kp, peso 0,1891 kp/m, módulo de elasticidad $E = 8\,100 \text{ kp/mm}^2$ y coeficiente de dilatación $\alpha = 19,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

El tendido de la línea se realiza sin viento y a una temperatura de 30°C. Calcular:

a) Vano de regulación.

b) Peso con sobrecarga de hielo.

c) Coeficiente de seguridad 3 si el tense máximo a -20°C es 556 kp.

d) Tense a la temperatura de tendido.

e) Flecha en el vano de regulación.

f) Flecha de tendido en el vano de 110 m.

$$a) \text{ El vano de regulación: } a_r = \sqrt{\frac{\sum a^3}{\sum a}} = \sqrt{\frac{100^3 + 110^3 + 90^3 + 100^3}{100 + 110 + 90 + 100}} = 100,75 \text{ m}$$

b) En la zona C la sobrecarga de hielo $P_h = k\sqrt{d} = 0,36\sqrt{9,45} = 1,107 \text{ kp/m}$

La carga del conductor con la sobrecarga debida al hielo:

$$P_T = P_h + P = 0,1891 + 1,107 = 1,296 \text{ kp/m}$$

c) El coeficiente de seguridad $m = \frac{1\,670}{556} = 3$

d) El tense a la temperatura de tendido se calcula por la ecuación del cambio de condiciones:

$$T_2^2(T_2 + A) = B$$

El valor del coeficiente A:

$$A = \frac{s \cdot E \cdot a^2 \cdot p_1^2}{24 \cdot T_1^2} - T_1 - \alpha \cdot s \cdot E (\Theta_1 - \Theta_2)$$

$$A = \frac{54,6 \cdot 8 \cdot 100 \cdot 100,75^2 \cdot 1,296^2}{24 \cdot 556^2} - 556 - 19,1 \cdot 10^{-6} \cdot 54,6 \cdot 8 \cdot 100 \cdot (-20 - 30) = 882,6$$

El valor del coeficiente B:

$$B = \frac{s \cdot E \cdot a^2 \cdot p_2^2}{24} = \frac{54,6 \cdot 8 \cdot 100 \cdot 100,75^2 \cdot 0,1891^2}{24} = 6\,688\,667 \approx 669 \cdot 10^4$$

La ecuación del cambio de condiciones toma la forma $T_2^2(T_2 + 882,6) = 669 \cdot 10^4$

Esta ecuación se resuelve por tanteos, siendo la solución con suficiente aproximación $T_2 = 83,2$ Kp.

e) La flecha en el vano de regulación $f_r = \frac{p_2 \cdot a_r^2}{8 \cdot T_2} = \frac{0,1891 \cdot 100,75^2}{8 \cdot 83,2} = 2,88$ m

f) La flecha en el vano de 110 m $f = f_r \cdot \left[\frac{a}{a_r} \right]^2 = 2,88 \cdot \left[\frac{110}{100,75} \right]^2 = 3,43$ m

3.18-5. Un cable conductor LA 56 en un vano de 110 m, tiene de flecha en tramo horizontal 1,7 m en zona B a 15°C. Calcular:

- Tensión horizontal si la carga es el propio peso del cable de valor 0,19 kp/m, distribuida según la horizontal.
- Tensión en un extremo del cable.
- Sobrecarga por viento a 15°C, siendo el diámetro del cable $d = 9,45$ mm.
- Tensión específica de tendido a 15°C con viento, siendo para el cable $s = 54,6$ mm², $E = 8\,100$ kp/mm², $\alpha = 19,1 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹.
- Flecha a 15°C con viento.

Solución: a) 169,04 kp; b) 169,4 kp; c) 0,598 kp/m; d) 396 kp; e) 2,28 m.

3.18-6. El conductor del problema anterior si halla sometido a sobrecarga por hielo a 0°C. Calcular:

- Sobrecarga por hielo.
- Tensión específica a 0°C.
- Flecha a 0°C con hielo.

Solución: a) 0,743 kp/m; b) 502 kp; c) 2,24 m.

3.18-7. Un conductor LA 30 en zona A se tiende con EDS 7 en un tramo con vano de regulación 90 m. Calcular:

- Tensión de tendido a 30°C.
- Flecha a esa temperatura en el vano de regulación.

Los datos necesarios del conductor son:

- Carga mínima de rotura del cable: 1010 kp.

- Sección del conductor: 31,1 mm²
- Diámetro del conductor: 7,14 mm.
- Peso: 107,9 kp/km = 0,1079 kp/m.
- Módulo de elasticidad: $E = 8\,100$ kp/mm².
- Coefficiente de dilatación: $\alpha = 19,1 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹.

a) La tensión EDS a 15°C sin sobrecarga $T_1 = \frac{7}{100} \cdot 1010 = 70,7 \approx 71$ kp

La tensión mecánica a la temperatura de tendido se calcula por la ecuación del cambio de condiciones:

$$T_2^2(T_2 + A) = B$$

El valor del coeficiente A:

$$A = \frac{s \cdot E \cdot a^2 \cdot p_1^2}{24 \cdot T_1^2} - T_1 - \alpha \cdot s \cdot E (\Theta_1 - \Theta_2)$$

$$A = \frac{31,1 \cdot 8 \cdot 100 \cdot 90^2 \cdot 0,1079^2}{24 \cdot 71^2} - 71 - 19,1 \cdot 10^{-6} \cdot 31,1 \cdot 8 \cdot 100 \cdot (15 - 50) = 293,76$$

El valor del coeficiente B:

$$B = \frac{s \cdot E \cdot a^2 \cdot p_2^2}{24} = \frac{31,1 \cdot 8 \cdot 100 \cdot 90^2 \cdot 0,1079^2}{24} = 989\,833 \approx 99 \cdot 10^4$$

La ecuación del cambio de condiciones toma la forma $T_2^2(T_2 + 293,76) = 99 \cdot 10^4$

Esta ecuación se resuelve por tanteos, siendo la solución con suficiente aproximación $T_2 = 53,4$ Kp.

e) La flecha en el vano de regulación $f_r = \frac{p_2 \cdot a_r^2}{8 \cdot T_2} = \frac{0,1079 \cdot 90^2}{8 \cdot 53,4} = 2,05$ m

3.19. CÁLCULO DE APOYOS EN LAS LÍNEAS DE M.T.

■ Hipótesis de cálculo

Según el Reglamento de Alta Tensión (art. 30) se consideran en el cálculo de apoyos varias hipótesis, según sea necesario considerar la sobrecarga por viento (1ª hipótesis), la sobrecarga por hielo (2ª hipótesis), el desequilibrio de tracciones (3ª hipótesis) o la rotura de conductores (4ª hipótesis).

En las líneas de M.T. con cables conductores de aluminio-acero, que tienen carga de rotura inferior a 6600 kp, se prescinde de la 4ª hipótesis en los apoyos de alineación y de ángulo si se verifican simultáneamente las condiciones siguientes:

- Que los conductores tengan un coeficiente de seguridad mínimo de 3.
- Que el coeficiente de seguridad de los apoyos y cimentaciones en la 3ª hipótesis sea el correspondiente a las hipótesis normales (1ª y 2ª hipótesis).
- Que los apoyos de anclaje se coloquen como máximo cada 3 km.

■ Esfuerzo en punta

Los apoyos a utilizar en las líneas aéreas de M.T. están normalizados y quedan definidos por el esfuerzo nominal y la altura. Como apoyos de alineación se suelen

utilizar apoyos de hormigón y como apoyos de ángulo, anclaje y final de línea apoyos metálicos.

Si el esfuerzo nominal de un apoyo es F y su altura H , a otra altura h (fig. 3.32) es capaz de soportar un esfuerzo F_1 , de forma que:

$$F_1 = \frac{F \cdot H}{h}$$

El cálculo de los apoyos consiste en considerar para cada tipo las hipótesis reglamentarias y hallar el esfuerzo máximo a que van a estar sometidos en la hipótesis más desfavorable. Se elige el apoyo cuyo esfuerzo nominal sea superior a ese esfuerzo máximo útil en punta. El esfuerzo útil necesario depende del tipo de apoyo.

Al proyectar una línea se suelen utilizar los apoyos normalizados por la empresa distribuidora de energía eléctrica propietaria de la línea a la que se efectúa la conexión. Para evitar el mantenimiento y conservación de la nueva línea, ésta se suele ceder a la empresa distribuidora.

3.20. APOYOS DE ALINEACIÓN

Considerando un apoyo de alineación de una línea trifásica con cruceta tipo bóveda (fig. 3.3), la disposición de los conductores es la de los vértices de un triángulo isósceles, siendo h_1 la altura de dos de los puntos de sujeción a la cruceta y h_2 la del vértice superior.

■ Esfuerzo transversal

El esfuerzo transversal, perpendicular a la dirección de la línea, que el apoyo soporta, es debido a la acción del viento sobre los conductores, aisladores y sobre el propio apoyo.

Se llama *eolovano* a_e a la semisuma de las longitudes a_1 y a_2 de los vanos que concurren en el apoyo. Éste soporta la acción del viento sobre la suma de los semivanos contiguos:

$$a_e = \frac{1}{2}(a_1 + a_2)$$

La fuerza del viento sobre un conductor en el apoyo $F_v = p_v \cdot a_e \cdot d$

F_v : Fuerza del viento sobre en kp sobre un conductor.

p_v : Presión del viento (kp/m^2).

a_e : Luz del eolovano (m).

d : Diámetro de los conductores (m).

El esfuerzo resultante F_T en punta, despreciando la acción del viento sobre los aisladores y cruceta:

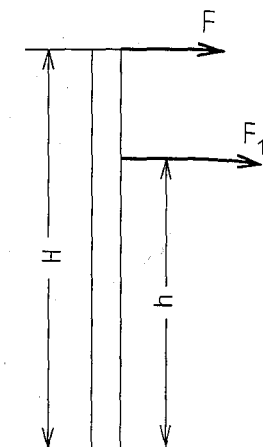


Fig. 3.32

$$F_T = \frac{F_v(2h_1 + h_2)}{H}$$

■ Esfuerzo longitudinal

El esfuerzo en punta F_L en sentido de la dirección de la línea se calcula considerando el desequilibrio de tracciones reglamentario. Siendo $T_{\text{máx}}$ la tensión mecánica máxima del conductor:

$$F_L = \frac{8}{100} \frac{T_{\text{máx}}(2h_1 + h_2)}{H}$$

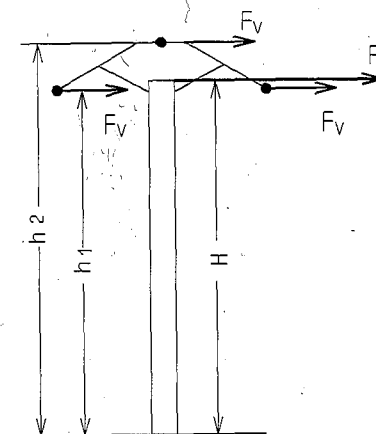


Fig. 3.33

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.20-1. Un apoyo de alineación con cruceta tipo bóveda tiene vanos contiguos de 100 y 80 m de luz. El apoyo es de hormigón HV 400 R11, con altura de empotramiento 1,4 m. Las alturas del punto de amarre de la cadena de aisladores a la cruceta sobre la cogolla del poste son de 1,15 m y 1,55 m. El conductor es LA 30, de diámetro 7,14 mm. Calcular:

- Eolovano.
- Fuerza del viento sobre cada conductor.
- Esfuerzo en punta en sentido transversal, considerando solamente la fuerza del viento sobre los conductores.
- Tense máximo con coeficiente de seguridad 3,5, sabiendo que la carga mínima de rotura para el conductor es de 1010 kp.
- Esfuerzo en punta en sentido longitudinal.

a) El eolovano $a_e = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) = \frac{80 + 100}{2} = 90 \text{ m}$

b) La fuerza del viento sobre los conductores:

$$F_v = p_v \cdot a_e \cdot d = 60 \cdot 7,14 \cdot 10^{-3} \cdot 90 = 38,556 \text{ kp}$$

c) La altura del apoyo sobre el terreno $H = 11 - 1,4 = 9,6 \text{ m}$

La altura de los puntos de amarre de las cadenas de aisladores que soportan los conductores:

$$h_1 = H + 1,15 = 9,6 + 1,15 = 10,75 \text{ m}$$

$$h_2 = H + 1,55 = 9,6 + 1,55 = 11,15 \text{ m}$$

El esfuerzo en punta en sentido transversal:

$$F_T = \frac{F_v(2h_1 + h_2)}{H} = \frac{38,556 \cdot (2 \cdot 10,75 + 11,15)}{9,6} = 131,1 \text{ kp}$$

d) El tense máximo $T_{\text{máx}} = \frac{1010}{3,5} = 288,57 \text{ kp}$

e) El esfuerzo en punta en sentido longitudinal:

$$F_u = \frac{8}{100} \frac{T_{\text{máx}}(2h_1 + h_2)}{H} = 0,08 \cdot \frac{288,57 \cdot (2 \cdot 10,75 + 11,15)}{9,6} = 78,5 \text{ kp}$$

3.20-2. Calcular el esfuerzo horizontal debido a la acción del viento sobre cada conductor LA 56, en un apoyo que está entre dos vanos de 120 y 130 m de luz.

Solución: 70,875 kp.

3.21. APOYOS EN ÁNGULO

Utilizados para sostener los conductores en los vértices de los cambios de alineación.

Si el ángulo que forman las alineaciones es α (fig. 3.34), la fuerza máxima (kp) horizontal a soportar por el apoyo considerando las dos tensiones iguales.

$$F = 2T_{\max} \cos \frac{\alpha}{2}$$

F : Esfuerzo resultante sobre el apoyo (kp).

T_{\max} : Tensión máxima según la hipótesis considerada (kp).

α : Ángulo que forman los vanos que concurren en el apoyo.

■ Esfuerzo transversal

Considerando la acción del viento sobre los conductores de los vanos contiguos y suponiendo la presión del viento en la dirección del esfuerzo resultante:

$$F_v = p_v \cdot \frac{1}{2}(a_1 + a_2) \cdot d \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = p_v \cdot a_e \cdot d \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$$

En el apoyo en ángulo suele utilizarse cruceta recta, con lo que el punto de sujeción a la cruceta estará a una altura h .

$$\text{Esfuerzo en punta en el sentido transversal } F_T = \frac{(2T_{\max} \cos \frac{\alpha}{2} + p_v \cdot a_e \cdot d \cdot \sin \frac{\alpha}{2}) 3h}{H}$$

■ Esfuerzo longitudinal

Según el desequilibrio de tracciones indicado reglamentariamente, para cruceta recta:

$$F_L = \frac{8}{100} \frac{T_{\max} \cdot 3 \cdot h}{H}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.21-1. Se utiliza como apoyo en ángulo el poste de celosía C-2000-12, con empotramiento de 1,8 m y cruceta tipo bóveda horizontal. El cable conductor es LA 30 y el cambio de dirección en el ángulo es de 30° (ángulo de la línea 150°). Los vanos contiguos al apoyo son de 80 y 90 m. Calcular:

- Coefficiente de seguridad, considerando un tense máximo de 336 kp y sabiendo que la carga mínima de rotura del cable es de 1010 kp.
- Esfuerzo resultante sobre el apoyo debido a las tensiones que se consideran iguales a la máxima.

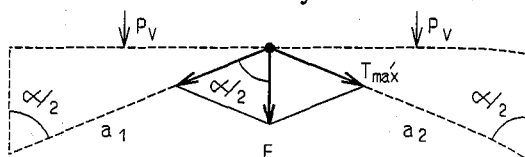


Fig. 3.34

- Esfuerzo debido a la acción del viento sobre los conductores, en la dirección de la resultante de las tensiones.
- Esfuerzo en punta en sentido transversal, considerando la acción del viento sobre los conductores y el esfuerzo resultante de las tensiones. Distancia de la cruceta sobre la punta del poste 1,1 m.
- Esfuerzo en punta en sentido longitudinal.

a) El coeficiente de seguridad $\frac{1010}{336} = 3$

b) El esfuerzo debido a las tensiones de los conductores:

$$F = 2T_{\max} \cos \frac{\alpha}{2} = 2 \cdot 336 \cdot \cos 75^\circ = 174 \text{ kp}$$

c) El eolovano: $a_e = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) = \frac{80 + 90}{2} = 85 \text{ m}$

El esfuerzo debido a la acción del viento sobre los conductores:

$$F_v = p_v \cdot a_e \cdot d \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 60 \cdot 85 \cdot 7,14 \cdot 10^{-3} \cdot \sin 75^\circ = 35,17 \text{ kp}$$

d) La altura del apoyo sobre el terreno $H = 12 - 1,8 = 10,2 \text{ m}$

La altura de los puntos de amarre de las cadenas de aisladores que soportan los conductores:

$$h = H + 1,11 = 11,31 \text{ m}$$

El esfuerzo en punta en sentido transversal:

$$F_T = \frac{(2T_{\max} \cos \frac{\alpha}{2} + p_v \cdot a_e \cdot d \cdot \sin \frac{\alpha}{2}) 3h}{H} = \frac{(174 + 35,17) \cdot 3 \cdot 11,31}{10,2} = 695,8 \text{ kp}$$

e) El esfuerzo en punta en sentido longitudinal:

$$F_L = \frac{8}{100} \frac{T_{\max} \cdot 3 \cdot h}{H} = 0,08 \cdot \frac{336 \cdot 3 \cdot 11,31}{10,2} = 89,4 \text{ kp}$$

3.21-2. Calcular la fuerza horizontal debido a las tensiones de los cables que debe poder soportar un apoyo en el punto en el que la línea trifásica con conductores LA 56 cambia de dirección con un ángulo de 30° . El coeficiente de seguridad utilizado es de 3,5 y la carga de rotura del conductor es de 1670 kp.

Solución: 741 kp.

3.21-3. Una línea de M.T. con conductor La 56 forma un ángulo de 160° en un punto en el que se utiliza un apoyo C-2000-14, con cruceta recta y empotramiento de 2 m. Los vanos contiguos al apoyo son de 120 y 100 m. Calcular:

- Esfuerzo en punta en sentido transversal. Se considera la acción del viento sobre los conductores y el esfuerzo resultante de las tensiones. Diámetro del conductor 9,45 mm, carga mínima de rotura 1670 kp y coeficiente de seguridad 3. La altura de la cruceta sobre el extremo del apoyo es de 1,11 m.
- Esfuerzo en punta en sentido longitudinal.

Solución: a) 835 kp; b) 146 kp.

3.22. APOYOS DE ANCLAJE

■ Esfuerzo transversal

Es el mismo que en el apoyo en alineación o en ángulo, según que el apoyo esté en alineación recta o en un cambio de dirección de la línea.

■ Esfuerzo longitudinal

Según el R.L.A.T. se considera por desequilibrio de tracciones el 50% de las tracciones unilaterales. Para cruceta recta:

$$F_L = \frac{50}{100} \frac{T_{\max} \cdot 3 \cdot h}{H}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.22-1. Un apoyo de anclaje en una alineación recta es de celosía de C-2000-12 con cruceta tipo bóveda recta horizontal y empotramiento 1,8 m. Los vanos contiguos son de 100 y 120 m. El conductor es LA 56 de diámetro 9,45 mm. Calcular:

- Fuerza del viento sobre cada conductor.
- Esfuerzo resultante transversal en punta considerando la fuerza del viento sobre los conductores y sabiendo que la cruceta está a una altura de 1,11 m sobre el extremo del apoyo.
- Esfuerzo en punta en sentido longitudinal considerando una carga mínima de rotura del cable de 1 670 kp y coeficiente de seguridad 3,5.

$$a) \text{ El eolovano } a_e = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) = \frac{120 + 100}{2} = 110 \text{ m}$$

El esfuerzo debido a la acción del viento sobre cada conductor:

$$F_v = p_v \cdot a_e \cdot d = 60 \cdot 110 \cdot 9,45 \cdot 10^{-3} = 62,4 \text{ kp}$$

$$b) \text{ La altura del apoyo sobre el terreno } H = 12 - 1,8 = 10,2 \text{ m}$$

La altura de los puntos de amarre de las cadenas de aisladores que soportan los conductores:

$$h = H + 1,11 = 11,31 \text{ m}$$

El esfuerzo en punta en sentido transversal:

$$F_T = \frac{F_v \cdot 3h}{H} = \frac{62,4 \cdot 3 \cdot 11,31}{10,2} = 207,6 \text{ kp}$$

$$c) \text{ El tense máximo } T_{\max} = \frac{1670}{3,5} = 477 \text{ kp}$$

El esfuerzo en punta en sentido longitudinal:

$$F_L = \frac{50}{100} \frac{T_{\max} \cdot 3 \cdot h}{H} = 0,5 \cdot \frac{477 \cdot 3 \cdot 11,31}{10,2} = 793,36 \text{ kp}$$

3.22-2. Calcular el esfuerzo en punta en sentido longitudinal que soporta un apoyo de anclaje en una línea aérea trifásica con 3 conductores LA 110, con cruceta recta a la altura del extremo del apoyo. La carga de rotura del conductor es 4 400 kp y el coeficiente de seguridad utilizado 3.

Solución: 2 200 kp.

3.23. APOYOS DE FIN DE LÍNEA

Utilizado para poder soportar el tiro de la línea.

■ Esfuerzo transversal

Es el mismo que en el apoyo en alineación, teniendo en cuenta que el viento solo actúa sobre uno de los semivanos y que la cruceta suele ser recta.

■ Esfuerzo longitudinal

Según el R.L.A.T. se considera por desequilibrio de tracciones el 100% de las tracciones unilaterales. Para cruceta recta:

$$F_L = \frac{T_{\max} \cdot 3 \cdot h}{H}$$

La fuerza máxima a soportar por el apoyo se considera el tense máximo de los conductores.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.23-1. En el extremo de una línea con alineación recta de vano de regulación 100 m, se coloca un apoyo de fin de línea C-2000-12, con cruceta de bóveda recta y empotramiento 2,2 m. El conductor es LA 30 de diámetro 7,14 mm y carga mínima de rotura 1 010 kp. Calcular:

- Esfuerzo en punta en sentido transversal, considerando la acción del viento sobre los conductores. Altura de la cruceta sobre el extremo del apoyo 1,1 m.
- Esfuerzo en punta en sentido longitudinal, considerando la tensión máxima 336 kp.
 - El esfuerzo debido a la acción del viento sobre los conductores en el semivano:

$$F_v = p_v \cdot \frac{a_e}{2} \cdot d = 60 \cdot \frac{100}{2} \cdot 7,14 \cdot 10^{-3} = 21,42 \text{ kp}$$

La altura del apoyo sobre el terreno $H = 12 - 2,2 = 9,8 \text{ m}$

La altura de la cruceta sobre el terreno $h = H + 1,1 = 10,9 \text{ m}$

El esfuerzo en punta en sentido transversal:

$$F_T = \frac{F_v \cdot 3h}{H} = \frac{21,42 \cdot 3 \cdot 10,9}{9,8} = 71,47 \text{ kp}$$

$$b) \text{ El tense máximo } T_{\max} = 336 \text{ kp}$$

El esfuerzo en punta en sentido longitudinal:

$$F_L = \frac{T_{\max} \cdot 3 \cdot h}{H} = \frac{336 \cdot 3 \cdot 10,9}{9,8} = 1 121,14 \text{ kp}$$

3.23-2. Calcular la fuerza máxima en sentido longitudinal que debe poder soportar un apoyo de fin de línea, con cruceta recta situada a la altura del extremo del apoyo, para una línea trifásica a 20 kV con conductores LA 56, utilizando un coeficiente de seguridad de 3,5. La carga mínima de rotura del cable conductor es 1 670 kp.

Solución: 1 431,4 kp.

3.24. CARGAS VERTICALES SOBRE LOS APOYOS

Sobre los apoyos actúan verticalmente además de su propio peso, el de conductores, aisladores y crucetas.

El esfuerzo vertical que los conductores transmiten al apoyo se calcula por el *gravivano*.

Se llama *gravivano* a la longitud a_g que hay que considerar para determinar las cargas verticales que le transmiten los conductores al apoyo. Esta longitud es la distancia horizontal entre los puntos vértices de las curvas (catenarias) que forman los conductores del los vanos contiguos al apoyo considerado, como indica la figura 3.35.

En las líneas de B.T y M.T. no se suelen calcular las cargas verticales sobre los apoyos, porque éstos resisten, trabajando a compresión, cargas mucho más grandes que las que se originan en la línea.

3.25. DISTANCIAS DE SEGURIDAD

Las distancias se calculan según el Reglamento de Alta Tensión:

- 1) *Distancias de los conductores al terreno* (R.L.A.T. artículo 25). Es la mínima altura h_{\min} en metros que corresponde a la máxima flecha:

$$h_{\min} = 5,3 + \frac{U}{150}$$

U : Tensión de línea (kV).

La altura mínima es de 6 m. En lugares de difícil acceso esta altura puede ser reducida en un metro. Esta distancia afecta a la altura del apoyo.

- 2) *Distancia de los conductores entre sí* (R.L.A.T. artículo 25).

La separación mínima entre conductores $D_{\min} = k\sqrt{f_{\max} + L_{\text{cad}}} + \frac{U}{150}$

D_{\min} : Distancia entre conductores (m).

f_{\max} : Flecha máxima (m).

L_{cad} : Longitud de la cadena de suspensión en metros. En cadenas de amarre o en aisladores rígidos $L_{\text{cad}}=0$.

U : Tensión nominal de la línea (kV)

k : Coeficiente que depende de la oscilación de los conductores con el viento. Con los valores previstos en el R.L.A.T. $k=0,65$ para los conductores LA 30, LA 56, LA 78, y $k=0,6$ para el conductor LA 110.

Esta distancia afecta a las dimensiones de la cruceta.

- 3) *Distancia entre los conductores y los apoyos* (R.L.A.T. artículo 25).

La distancia mínima d_{\min} (m) entre los conductores y los apoyos: $d_{\min} = 0,1 + \frac{U}{150}$

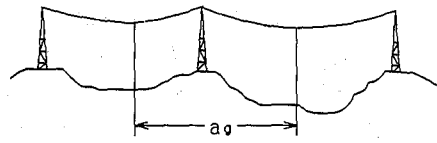


Fig. 3.35

Con un mínimo de 0,2 m. En el caso de cadenas de suspensión se debe calcular la distancia con la oscilación de la cadena; pero escogiendo crucetas normalizadas por la empresa distribuidora se cumple la distancia mínima.

- 4) *Distancias en cruzamientos* (R.L.A.T. artículo 33).
- Con líneas eléctricas y de telecomunicación.
 - Con carreteras y ferrocarriles sin electrificar (mínimo 7 m).
 - Con ferrocarriles electrificados, tranvías o trolebuses (mínimo 3 m).
 - Con teleféricos y cables transportadores (mínimo 4 m).
 - Con ríos y canales.
- 5) *Distancias en paso por zonas* (R.L.A.T. artículo 35).
- Con bosques, árboles y masas de arbolado (mínimo 2 m).
 - Con edificios, construcciones y zonas urbanas.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.25-1. Una línea eléctrica de 20 kV, 50 Hz, discurre por una zona de altitud 800 m, con conductor LA 56. Calcular:

- Distancia mínima de los conductores al terreno.
- Distancia mínima de los conductores entre sí en apoyos de alineación, de longitud de la cadena de aisladores 0,6 m y flecha máxima 3,1 m.
- Distancia mínima entre los conductores y el apoyo.

a) La distancia mínima al terreno: $h_{\min} = 5,3 + \frac{U}{150} = 5,3 + \frac{20}{150} = 5,43 \text{ m}$

Se escoge como altura mínima sobre el terreno de 6 m.

- b) La distancia mínima entre conductores:

$$D_{\min} = K\sqrt{f_{\max} + L_{\text{cad}}} + \frac{U}{150} = 0,65\sqrt{3,1 + 0,6} + \frac{20}{150} = 1,38 \text{ m}$$

- c) La distancia mínima de los conductores al apoyo:

$$d_{\min} = 0,1 + \frac{U}{150} = 0,1 + \frac{20}{150} = 0,23 \text{ m}$$

3.25-2. Calcular la distancia mínima entre conductores en un apoyo de amarre de una línea aérea de 20 kV, con conductor LA 56 y flecha máxima 3,1 m.

Solución: 1,28 m.

3.26. CABLES AISLADOS DE ALUMINIO TRENZADOS EN HAZ UTILIZADOS EN LAS LÍNEAS AÉREAS DE BAJA TENSIÓN

Los cables más utilizados en las líneas de distribución de baja tensión son los cables de aluminio trenzados en haz, en línea tensada (con el neutro de aleación de aluminio), sobre fiador independiente de acero galvanizado (fig. 3.36) o línea posada (fig. 3.37). La acometida suele ser tensada y posada sobre fachada (fig. 3.38).

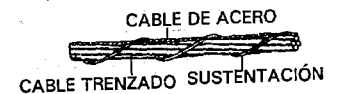


Fig. 3.36

■ Designación

Este tipo de cables, se designan por la letra R (aislamiento de polietileno reticulado), Z (cable trenzado en haz), seguida de la tensión nominal 0,6/1kV (tensión a tierra/tensión entre conductores de fase) y, a continuación, el número de conductores por la sección nominal de los conductores de fase; (si hay conductor neutro de sección reducida se indica ésta después del signo /).

Así, el conductor RZ 0,6/1 kV 3×95 Al /54,6 Alm; significa: conductor aislado con polietileno reticulado, trenzado en haz, de tensión nominal de aislamiento 0,6/1 kV, tres conductores de fase de aluminio de 95 mm² cada uno y un conductor neutro, que sirve de fiador, de sección 54,6 mm² de aleación de aluminio (Almelec).

■ Características

Los conductores más utilizados son de aluminio y algunas de sus características son las que se indican en el cuadro siguiente:

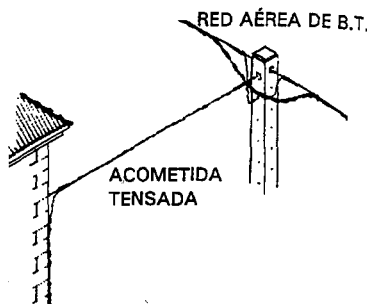
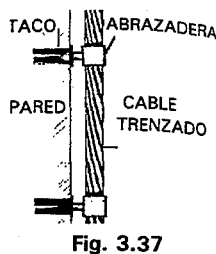


Fig. 3.38

Tabla 3.10

Características	Cable RZ 0,6/1 kV						
	2×16	4×16	2×25	3×25/ 54,6 Alm	3×50/ 54,6 Alm	3×95/ 54,6 Alm	3×150/ 95 Al+22 Ac
Sección conductor de fase mm ² .	16	16	25	25	50	95	150
Carga mínima de rotura kp.	190	190	300	300	600	1 440	1 800
Peso kp/km.	150	300	220	585	810	1 320	2 060
Intensidad admisible a 40 °C A.	75	75	100	110	150	230	305
Resistencia a 20 °C Ω/km.	1,91	1,91	1,20	1,20	0,64	0,32	0,206

Las características del neutro fiador de almelec son: sección 54,6 mm², resistencia a 20 °C 0,63 Ω/km y carga de rotura 1 660 daN.

3.27. SUJECIONES Y ACCESORIOS EN LAS LÍNEAS AÉREAS DE BAJA TENSIÓN

■ Sujeción

Las líneas de B.T. con conductores RZ se sujetan mediante:

- Conjuntos soporte de alineación, con portante de neutro fiador (fig. 3.39) o con suspensión preformada para cable fiador de acero (fig. 3.40). La suspensión preformada para cable fiador de acero (de diámetro 6 mm) se hace con varillas de acero galvanizado. Para neutro fiador la suspensión se hace con varillas de acero aluminizado, recubiertas de aislante neopreno.

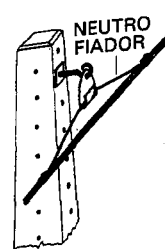


Fig. 3.39

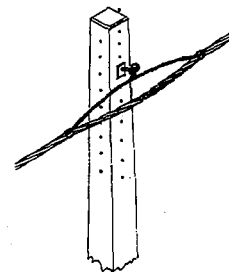


Fig. 3.40

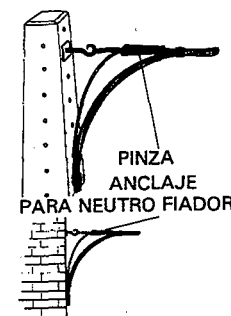


Fig. 3.41

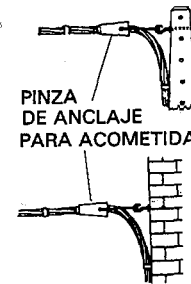


Fig. 3.42

- Conjuntos de amarre, para poste o pared. Son de diversos tipos. En la figura 3.41 se representa el conjunto de amarre con pinza anclaje para neutro fiador. La pinza de anclaje es de acero y aleación de aluminio, con las mordazas de plástico (poliamida). El amarre de acometidas se realiza con pinza de anclaje para acometidas (fig. 3.42).

■ Protección de paso aéreo a subterráneo

En líneas de B.T. y acometidas en poste o fachada se realiza con tubo plástico rígido, hasta una altura de unos 3 m, con capuchón de protección.

3.28. EMPALMES Y CONEXIONES

Se utilizan varios procedimientos:

- Unión por soldadura.
- Unión por compresión mecánica, mediante tornillos.
- Unión por engastado (punzonado o compresión).

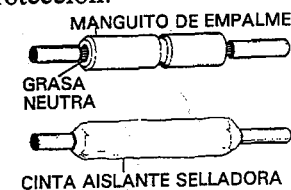


Fig. 3.43

3.29. EMPALMES Y DERIVACIONES EN LAS LÍNEAS AÉREAS DE BAJA TENSIÓN

Según la instrucción MIE BT 003, los empalmes y conexiones de conductores aislados se realizarán con accesorios adecuados resistentes a la intemperie. Las derivaciones se realizarán en la proximidad de los soportes de la línea y no originarán tracción eléctrica sobre la misma.

Los empalmes en las líneas aérea de baja tensión con conductores de aluminio trenzados en haz utilizan manguitos de aleación de aluminio para empalme por compresión mediante punzonado (fig. 3.43), con grasa neutra y cinta aislante selladora. El empalme puede ser para conductores de igual o de distinta sección.

El empalme a plena tracción del neutro, que hace de cable fiador y soporta el peso del cable, se realiza mediante un manguito de aleación de aluminio preaislado para empalme a plena tracción por compresión (fig. 3.44).



Fig. 3.44

Las derivaciones en las líneas aéreas de baja tensión, con conductores de aluminio trenzados en haz se realizan de varias formas:

- Cuña a presión, de aleación de aluminio (fig. 3.45).
- Conector por compresión, de aleación de aluminio (fig. 3.46).
- Grapas de aleación de aluminio (fig. 3.47).

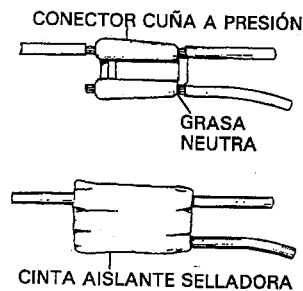


Fig. 3.45

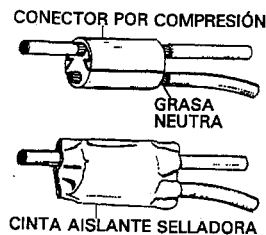


Fig. 3.46

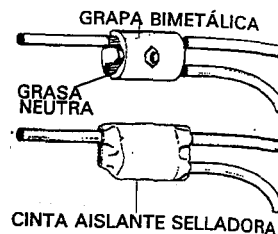


Fig. 3.47

Para la realización de estas derivaciones se utiliza grasa neutra y cinta aislante selladora.

3.30. DERIVACIONES PARA ACOMETIDAS

En las derivaciones para acometidas aéreas, además de grapas de derivación se utilizan conectores de perforación (fig. 3.48), de aleación de aluminio. Para derivaciones a varias acometidas se utiliza caja derivación exterior de poliéster reforzado con fibra de vidrio (fig. 3.49).

Las acometidas de las líneas de B.T. terminan en las *cajas generales de protección*, de material plástico con fusibles. De estas cajas parte la línea repartidora.

- Designación. Según las letras CGP, seguidas de dos números. El primero indica el esquema eléctrico (fig. 3.50) y el segundo indica la intensidad nominal de la base de los fusibles.
- Constitución: Las cajas generales de protección son de material aislante y autoextinguible con cierre y precintado, las entradas y salidas para instalación a intemperie se realizan por la parte inferior. El neutro es seccionable mediante pletina y los fusibles, que se utilizan para los

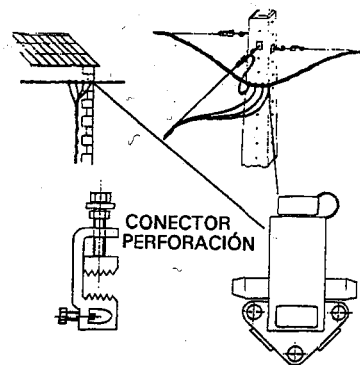


Fig. 3.48

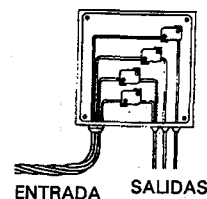


Fig. 3.49

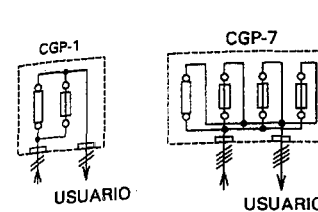


Fig. 3.50

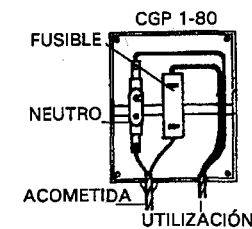


Fig. 3.51

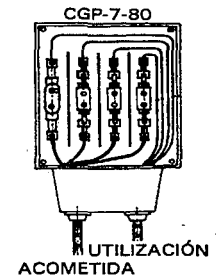


Fig. 3.52

conductores de fase, son cilíndricos para bases de intensidad nominal 40 y 80 A, y de cuchilla para intensidad nominal de 100, 160, 250 y 400 A. Los bornes de conexión son bimetalicos, para conectar conductores de cobre o de aluminio. Las cajas pueden ir montadas en el exterior, con grado de protección IP437 y en el interior con grado de protección IP417. Cada caja tiene una placa identificativa, con el nombre del fabricante, la intensidad y la tensión nominal (440 V), designación, año de fabricación y referencia del fabricante.

- Según la conexión las cajas generales de protección pueden ser monofásicas (fig. 3.51), trifásicas (fig. 3.52) y trifásicas con varias salidas.

3.31. TOMAS DE TIERRA EN LAS LÍNEAS DE B.T.

El neutro se debe conectar a tierra como mínimo cada 500 m (MIE BT 003) a lo largo de la red. Se suele conectar la toma de tierra en los puntos de derivación y los últimos 200 m de cada derivación.

3.32. CÁLCULO ELÉCTRICO EN LAS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN EN BAJA TENSIÓN

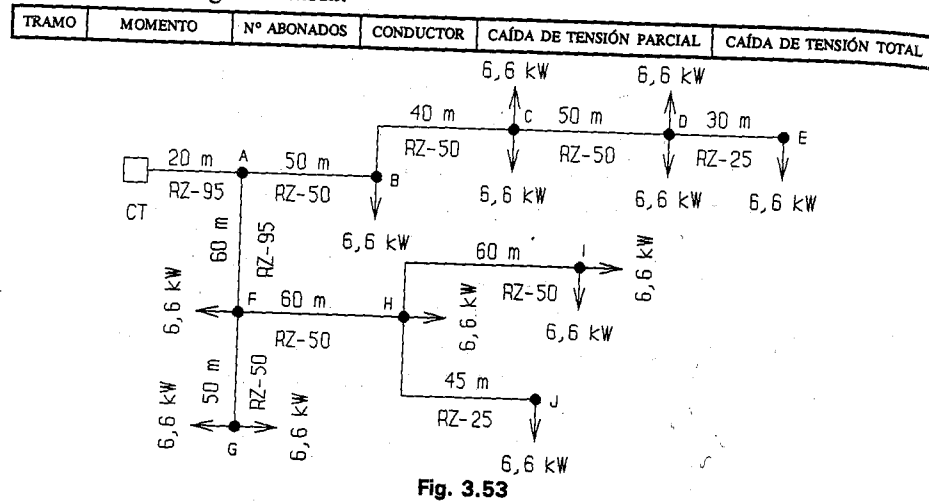
En el cálculo eléctrico, se suele tener en cuenta solamente la resistencia de los conductores. Para mayor exactitud en los cálculos, en líneas largas se ha de tener en cuenta la reactancia. Las líneas de distribución aéreas con conductores trenzados en haz se calculan teniendo en cuenta consumos equilibrados. En caso de desequilibrio se considera para el cálculo el consumo de la fase más cargada como consumo de todas las fases, con lo que la sección está calculada por exceso; pero eso permite que la línea soporte futuras ampliaciones.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.32-1. Se proyecta una red aérea de distribución en B.T. a 380/220 V, para electrificación rural con conductores trenzados en haz, del tipo RZ 0,6/1 kV 3x95 Al+54,6 Alm; RZ 0,6/1 kV 3x25 Al+54,6 Alm y RZ 0,6/1 kV 3x50 Al+54,6 Alm, con apoyos de alineación tipo HV-250-R-11; apoyos en ángulo y fin de línea HV-630-R-11. Vano medio 45 m. La excavación de la cimentación será de 1,6 m de altura. Los cables serán

amarrados en todos los apoyos. El conductor neutro se conectará a tierra en el primer apoyo de la salida del transformador. La toma de tierra del neutro se realiza, mediante conector bimetalico (Cu-Al), con cable RV 0,6/1 kV 50 mm² de cobre, bajo tubo rígido de PVC de diámetro 50 mm. El cable de tierra es de cobre sin aislamiento, de sección 50 mm²; conectado, mediante soldadura de alto punto de fusión, a pica difusora de acero galvanizado de diámetro 22 mm.

El esquema unifilar es el representado en la figura 3.53. Se ha considerado para cada abonado una potencia de 6,6 kW trifásica. Calcular la caída de tensión en los distintos tramos según la tabla:



Se calcula cada tramo de forma independiente, teniendo en cuenta la carga que soporta, por la fórmula:

$$u = \frac{LP}{csV_L}$$

La tensión de línea $V_L = 380$ V y la conductividad para el aluminio $c = 35 \frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2}$

La caída de tensión se puede calcular también directamente en tanto por cien, con la longitud en km y la potencia en kW, según la fórmula, deducida en el capítulo anterior, epígrafe 2.9:

$$u\% = \frac{10^8 \cdot LP}{cV_L^2 \cdot s} = \frac{10^8 \cdot LP}{35 \cdot 380^2 \cdot s} = 19,8 \cdot \frac{LP}{s}$$

Para el momento del tramo CT-A, con toda la potencia de la instalación; $P = 13 \cdot 6,6 = 85,8$ kW. La longitud $L = 20 \text{ m} = 0,02 \text{ km}$.

El momento $LP = 0,02 \cdot 85,8 = 1,716 \text{ km} \cdot \text{kW}$

La caída de tensión parcial en el tramo $u\% = 19,8 \cdot \frac{LP}{s} = 19,8 \cdot \frac{1,716}{95} = 0,36\%$

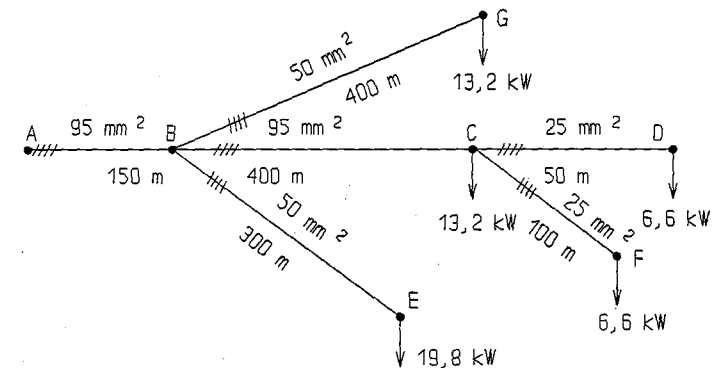
La caída de tensión total en un punto se obtiene sumando las caídas de tensión parciales en los distintos tramos, desde CT hasta el punto. Así se indica en la tabla:

Tabla 3.11

TRAMO	MOMENTO km·kW	Nº ABONADOS	CONDUCTOR	CAÍDA DE TENSIÓN PARCIAL %	CAÍDA DE TENSIÓN TOTAL %
CT-A	1,716	13	RZ 95	0,36	0,36
A-B	1,98	6	RZ 50	0,78	1,14
B-C	1,32	5	RZ 50	0,52	1,66
C-D	0,99	3	RZ 50	0,39	2,05
D-E	0,198	1	RZ 25	0,16	2,21
A-F	2,772	7	RZ 95	0,58	0,94
F-G	0,66	2	RZ 50	0,26	1,2
F-H	1,584	4	RZ 50	0,63	1,57
H-I	0,792	2	RZ 50	0,31	1,88
H-J	0,297	1	RZ 25	0,24	1,81

3.32-2. La línea aérea de la figura 3.54 está construida con conductores de aluminio trenzados en haz con las secciones indicadas. Se considera un consumo trifásico equilibrado. La tensión es de 380/220 V, 50 Hz. Calcular la caída de tensión en los puntos G, D, F y E.

Solución: $u_{AG} = 3,94\%$; $u_{AD} = 4,31\%$; $u_{AF} = 4,57\%$; $u_{AE} = 4,2\%$



3.33. CÁLCULO MECÁNICO DE CABLES AISLADOS DE ALUMINIO TRENZADOS EN HAZ EN LÍNEAS AÉREAS DE BAJA TENSIÓN

■ Conductores

Los conductores RZ 0,6/1 kV, normalizados para líneas de distribución en B.T. con conductores trenzados, según el proyecto tipo UNESA, se indican en la tabla siguiente:

Tabla 3.12

Denominación	3x25/54,6 Alm	3x50/54,6 Alm	3x95/54,6 Alm	3x150/95,41+22 Ac
Diámetro del haz (mm)	31,09	36,85	45,05	47,44
Peso (kp/m)	0,585	0,810	1,320	2,202

Las características de mecánicas de los fiadores se indican en la tabla 3.13.

Tabla 3.13

Material	Sección nominal (mm ²)	Carga de rotura (kp)	Coefficiente de dilatación lineal (°C ⁻¹)	Módulo de elasticidad (kp/mm ²)
Almelec	54,6	1 660	23	6 200
Acero	22	2 800	11,5	18 500

■ Hipótesis de cálculo

Como tensión máxima del haz en las condiciones más desfavorables se escoge un coeficiente de seguridad mínimo de 2,5, con lo que será como máximo 664 kp para el neutro de almelec y de 1 120 kp para el fiador de acero, para las hipótesis más desfavorables de la tabla siguiente según el R.B.T. (MIE-BT 003):

Tabla 3.14

Condición	Zona A (Altitud < 500 m)		Zona B (Altitud entre 500 y 1 000 m)		Zona C (Altitud > 1 000 m)	
	Temperatura	Sobrecarga (kp/m ²)	Temperatura	Sobrecarga (kp/m)	Temperatura	Sobrecarga (kp/m)
Máxima tensión	15 °C	Viento de 50	0 °C	Hielo de $0,18\sqrt{d}$	0 °C	Hielo de $0,36\sqrt{d}$
	0 °C	Viento de 50/3	-	-	-	-

■ Sobrecargas

Las sobrecargas se calculan según la altitud del terreno donde se sitúa la línea:

1) Zona A (viento).

Se calcula la sobrecarga por viento $P_v = p_v \cdot d$ (kp/m)

p_v : Presión del viento (kp/m²): 50 kp/m² a 15 °C o 50/3 kp/m² a 0 °C

d : Diámetro del conductor (m)

El peso del conductor con sobrecarga $P_T = \sqrt{P_v^2 + P^2}$ (kp/m)

Siendo P : Peso del conductor (kp/m).

2) Zona B (Hielo).

Se calcula la sobrecarga por hielo $P_h = k\sqrt{d}$ (kp/m)

d : Diámetro del conductor (mm)

k : Constante, de valor 0,18 en zona B y 0,36 en zona C.

El peso con sobrecarga $P_T = P_h + P$ (kp/m)

■ Flecha máxima

Según el Reglamento de Baja Tensión (MIE-BT 003), la flecha máxima de los conductores se calcula según las siguiente hipótesis:

Tabla 3.15

Condición	Zona A (Altitud < 500 m)		Zona B (Altitud entre 500 y 1 000 m)		Zona C (Altitud > 1 000 m)	
	Temperatura	Sobrecarga (kp/m ²)	Temperatura	Sobrecarga (kp/m)	Temperatura	Sobrecarga (kp/m)
Máxima flecha	50 °C	Ninguna	50 °C	Ninguna	50 °C	Ninguna
	-	-	0 °C	Hielo de $0,18\sqrt{d}$	0 °C	Hielo de $0,36\sqrt{d}$

■ Tablas de tendido

Las tablas de tenses y flechas de tendido según los vanos y el conductor se realizan aplicando los valores correspondientes de las diversas hipótesis a la ecuación del cambio de condiciones. En la siguiente tabla se representa la tabla de tendido para conductor RZ 0,6/1 kV 3x95 Al/54,6 Alm, considerando una tensión máxima en zona A de 315 daN, con vanos y flechas en metros.

Tabla 3.16. Tabla de tendido para conductor RZ 0,6/1 kV 3x95 Al/54,6 Alm con tense máximo 315 daN

V a n o s	Tensiones máximas				Tabla de tendido																	
	15°C + v		0°C + v/3		0°C		5°C		10°C		15°C		20°C		30°C		40°C		50°C			
	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f		
10	284	0,11	315	0,06	308	0,05	275	0,06	244	0,07	216	0,08	191	0,09	152	0,11	125	0,13	106	0,16		
15	315	0,23	297	0,14	282	0,13	257	0,14	235	0,16	215	0,17	198	0,19	170	0,22	149	0,25	133	0,28		
20	315	0,41	250	0,30	229	0,29	215	0,31	203	0,33	192	0,34	182	0,36	166	0,39	152	0,43	142	0,47		
25	315	0,65	225	0,53	202	0,51	194	0,53	187	0,55	180	0,57	174	0,59	164	0,63	155	0,67	147	0,70		
30	315	0,93	212	0,81	187	0,79	182	0,81	178	0,83	174	0,86	170	0,88	162	0,91	156	0,95	150	0,99		
35	315	1,27	204	1,14	179	1,13	176	1,15	173	1,17	170	1,19	167	1,21	162	1,25	157	1,29	152	1,33		
40	315	1,66	199	1,53	174	1,52	172	1,54	169	1,56	167	1,58	165	1,60	161	1,64	157	1,68	154	1,72		
50	315	2,59	193	2,46	169	2,45	167	2,47	166	2,49	164	2,51	163	2,53	160	2,57	158	2,61	156	2,65		
60	315	3,65	190	3,60	166	3,59	165	3,61	164	3,63	163	3,65	162	3,67	160	3,71	158	3,75	157	3,79		
70	315	5,08	188	4,95	164	4,93	163	4,95	163	4,97	162	5,00	161	5,02	160	5,06	159	5,10	157	5,14		
80	315	6,63	187	6,50	163	6,49	162	6,51	162	6,53	161	6,55	161	6,57	160	6,61	159	6,65	158	6,69		

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.33-1. Calcular el peso del conductor con sobrecarga a 15 °C en un cable RZ 0,6/1 kV 3x50 Al/54,6 Alm en una instalación a 300 m sobre el nivel del mar.

La sobrecarga debida al viento $P_v = p_v \cdot d = 50 \cdot 0,03685 = 1,8425$ kp/m

El peso del conductor con sobrecarga:

$$P_T = \sqrt{P_v^2 + P^2} = \sqrt{1,8425^2 + 0,810^2} = 2,0127 \text{ kp/m}$$

3.33-2. Calcular el peso del cable RZ 0,6/1 kV 3x95 Al/54,6 Alm en una instalación aérea en una zona situada a 600 m sobre el nivel del mar, teniendo en cuenta la sobrecarga por hielo.

Solución: 2,528 kp/m.

3.33-3. La tensión de tendido en un vano horizontal de 40 m con cable de aluminio trenzado en haz RZ 0,6/1 kV 3x95 Al/54,6 Alm es de 167 kp. Calcular la flecha.

$$\text{La flecha en tramo horizontal } f = \frac{p \cdot a^2}{8 \cdot T} = \frac{1,32 \cdot 40^2}{8 \cdot 167} = 1,58 \text{ m}$$

3.33-4. Observada la flecha en un tramo horizontal de 35 m a 15 °C en una zona situada a 700 m sobre el nivel de mar, con cable RZ 0,6/1 kV 3×50 Al/54,6 Alm, resulta ser de 0,88 m. Calcular la tensión de tendido.

Solución: 141 kp.

3.34. CÁLCULO DE LOS APOYOS EN LÍNEAS AÉREAS DE BAJA TENSIÓN

La resistencia mecánica del apoyo está dada por la fuerza horizontal "esfuerzo útil" que es capaz de resistir aplicada al punto de instalación de amarre, con el coeficiente de seguridad reglamentario y deducida la fuerza de la presión del viento sobre el propio apoyo.

Los apoyos, que generalmente están normalizados, quedan definidos por el esfuerzo nominal o "esfuerzo libre en punta" y el esfuerzo secundario, además de la altura.

Se utilizan en B.T. postes de hormigón armado vibrado. De forma excepcional se utilizan en B.T. apoyos metálicos galvanizados.

■ Altura del apoyo

Las alturas de los apoyos se fijan teniendo en cuenta la topografía del terreno, según el R.B.T. (MIE-BT 003) y las flechas según los vanos. La longitud total del apoyo se fija después de definida la altura libre necesaria y la cimentación, según los esfuerzos a que está sometido.

■ Esfuerzos que actúan sobre los apoyos

El R.B.T. indica las hipótesis a tener en cuenta para el cálculo mecánico de apoyos (MIE-BT 003).

En las líneas con conductores trenzados, donde los vanos son cortos y la forma de sujeción al apoyo muy simple, se puede prescindir de las cargas verticales y las diferencias de tenses.

- *Apoyos de alineación.* Se tiene en cuenta la sobrecarga de 50 kp/m², debido a la presión del viento sobre el cable, considerando la semisuma de los vanos.
- *Apoyos de ángulo.* Considerando iguales las tensiones en los dos lados del apoyo, la resultante de estas tensiones en el plano horizontal produce un esfuerzo resultante sobre el apoyo (fig. 3.55).

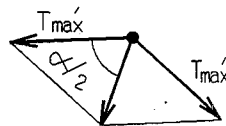


Fig. 3.55

El esfuerzo resultante se calcula según la fórmula: $F = 2T_{\max} \cos \frac{\alpha}{2}$

F: Esfuerzo resultante sobre el apoyo (kp).

T_{\max} : Tensión máxima según la hipótesis considerada (kp).

α : Ángulo que forman los vanos que concurren en el apoyo.

Este esfuerzo se incrementa si se considera la acción del viento sobre los semivanos contiguos al apoyo.

- *Apoyos de fin de línea.* Se tiene en cuenta el tense máximo elegido para el cable y el esfuerzo útil mínimo del apoyo se determina en función de este tense:

$$F = T_{\max}$$

- *Apoyos de derivación.* El esfuerzo útil se calcula hallando la resultante de las tensiones de los cables que se amarran al apoyo. Si se considera la presión del viento sobre los semivanos que concurren en el apoyo, este esfuerzo hay que componerlo con la resultante de las tensiones del cable.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.34-1. Calcular la fuerza resultante sobre un apoyo en el que una línea con cable RZ 0,6/1 kV 3×50 Al/54,6 Alm, forma un ángulo de 130°. En la línea se considera un tense máximo de 315 kp y se desprecia la acción del viento sobre el cable.

$$\text{La fuerza resultante } F = 2T_{\max} \cos \frac{\alpha}{2} = 2 \cdot 315 \cdot \cos 65^\circ = 266 \text{ kp}$$

3.34-2. Calcular el esfuerzo útil mínimo del apoyo de final de línea para cable RZ 0,6/1 kV 3×95 Al/54,6 Alm si el tendido se realiza admitiendo el tense máximo con el coeficiente de seguridad 5.

Solución: 332 kp.

3.35. CRUZAMIENTOS, PROXIMIDADES Y PARALELISMOS EN LAS LÍNEAS DE B.T.

Las líneas deben cumplir las condiciones marcadas por el Reglamento de B.T. (MIE BT 003) y las disposiciones legales que otros organismos competentes pueden imponer cuando sus instalaciones quedan afectadas por las líneas eléctricas.

En el cruzamiento con la línea aérea de A.T. la línea de B.T. debe pasar por debajo, con una distancia mínima vertical D en metros entre conductores de:

$$D = 1,5 + \frac{U + L_1 + L_2}{100}$$

U : Tensión nominal de la línea de A.T. (kV).

L_1 : Distancia horizontal entre el punto de cruce y el apoyo más próximo de la línea de A.T. (m).

L_2 : Distancia horizontal entre el punto de cruce y el apoyo más próximo de la línea de B.T. (m).

En vías con circulación rodada la distancia mínima a la línea es de 6 m.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.35-1. Calcular la distancia entre una línea de B.T. y una línea de M.T. de 20 kV, si la distancia entre el punto de cruce y el apoyo más próximo de B.T. es de 10 m y con el apoyo más próximo de A.T. es de 40 m.

$$\text{La distancia } D = 1,5 + \frac{U + L_1 + L_2}{100} = 1,5 + \frac{20 + 40 + 10}{100} = 2,2 \text{ m}$$

3.34-2. Una línea aérea de 380/220 V se cruza con otra de 20 kV en un punto en el que el apoyo más próximo de la línea de M.T. está a 50 m y el de la línea de B.T. a 15 m. Calcular la distancia mínima entre las dos líneas.

Solución: 2,35 m

3.36. CIMENTACIONES

Sobre al apoyo actúan fuerzas exteriores que tienden a volcarlo. Este momento de vuelco está contrarrestado por las fuerzas estabilizadoras que el terreno transmite al apoyo empotrado, originando un momento estabilizador.

La cimentación de los apoyos de hormigón y metálicos, se realiza mediante un macizo de hormigón de forma prismática y sección cuadrada (fig. 3.56).

- La altura mínima de empotramiento suele calcularse:

$$h_e = \frac{H_t}{15} + 0,5$$

h_e : Altura de empotramiento (m).

H_t : altura total del poste (m).

- El momento de vuelco M_v (m·t), aplicado al punto O de giro del macizo viene dado por:

$$M_v = F(H + \frac{2}{3}h_e)$$

F: Fuerza en la cogolla del apoyo en toneladas (t).

H: Altura útil del apoyo (m).

h_e : Profundidad de empotramiento (m).

- El momento estabilizador es el resultado del momento estabilizador del terreno y del bloque de hormigón que forma el empotramiento M_0 , y del momento estabilizador del las cargas verticales M_b .

El momento estabilizador del terreno y del bloque de hormigón M_0 , en metros·toneladas (m·t), por el método suizo:

$$M_0 = 0,139 \cdot K_T \cdot l \cdot h_e^4 + 0,88 \cdot l^3 \cdot h_e$$

K_T : Coeficiente de compresibilidad del terreno a la profundidad de 2 m en kp/cm³, según la clase de terreno ($K_T = 12$ kp/cm³ para terreno normal).

l: Lado de la base de hormigón (m).

El momento estabilizador M_b (m·t), de las cargas verticales:

$$M_b = 0,4 \cdot p_c \cdot l$$

p_c : Peso del apoyo, cruceta, aisladores y conductor en toneladas.

El momento de vuelco debe ser menor que el momento estabilizador total. Con un coeficiente de seguridad mínima 1,5, (R.L.A.T. artículo 31), se verifica:

$$\frac{M_0 + M_b}{M_v} \geq 1,5$$

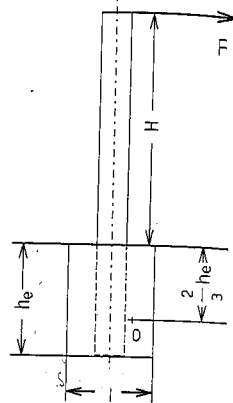


Fig. 3.56

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.36-1. En una línea de M.T. se utiliza como apoyo de alineación el poste de hormigón HV-400-R de altura total 13 m. Calcular:

- Altura aproximada de empotramiento.
- Momento de vuelco.
- Momento estabilizador para terreno normal, utilizando como lado de la base de hormigón en la cimentación 1 m y considerando las cargas verticales iguales al peso del bloque de hormigón, de 2,4 t/m³.
- Coeficiente de seguridad.

- La altura mínima de empotramiento:

$$h_e = \frac{H_t}{15} + 0,5 = \frac{13}{15} + 0,5 = 1,37 \text{ m} \approx 1,4 \text{ m}$$

- La altura del poste sobre el terreno $H = 13 - 1,4 = 11,6$ m

El momento de vuelco:

$$M_v = F(H + \frac{2}{3}h_e) = 0,4 \cdot (11,6 + \frac{2}{3} \cdot 1,4) = 5,01 \text{ m·t}$$

- El momento estabilizador del terreno y bloque de hormigón:

$$M_0 = 0,139 \cdot K_T \cdot l \cdot h_e^4 + 0,88 \cdot l^3 \cdot h_e = 0,139 \cdot 12 \cdot 1 \cdot 1,4^4 + 0,88 \cdot 1 \cdot 1,4 = 7,64 \text{ m·t}$$

El momento estabilizador de las cargas verticales:

$$M_b = 0,4 \cdot p_c \cdot l = 0,4 \cdot (1 \cdot 1 \cdot 1,4 \cdot 2,4) \cdot 1 = 1,34 \text{ m·t}$$

El momento estabilizador total $M_e = M_0 + M_b = 7,64 + 1,34 = 8,98 \text{ m·t}$

- El coeficiente de seguridad al vuelco $\frac{M_0 + M_b}{M_v} = \frac{8,98}{5,01} = 1,79 > 1,5$

3.36-2. Un apoyo de una línea de M.T. está empotrado 2 m en un macizo de hormigón y tiene una altura sobre el terreno de 11 m. Calcular:

- Momento de vuelco para una fuerza horizontal en la cogolla de 630 kp.
- Momento estabilizador del terreno, de composición normal, y del bloque de hormigón, siendo el lado de la base cuadrada del macizo de hormigón 1 m.
- Momento estabilizador de las cargas verticales considerándolas iguales al bloque de hormigón, de peso 2,4 t/m³
- Coeficiente de estabilidad.

Solución: a) 7,77 m·t; b) 28,45 m·t; c) 1,92 m·t; d) 3,9.

3.37. PUESTA A TIERRA DE LOS APOYOS

Los apoyos metálicos y de hormigón se conectan a tierra por los bornes que contienen al efecto, mediante conductor de tierra y picas (fig. 3.57). El conductor de tierra es de cobre sin aislamiento de 50 mm² de sección, su tendido se hace por una zanja de profundidad unos 0,8 m y se une a la pica por una grapa de conexión. La pica de tierra es cilíndrica lisa; la más utilizada es de acero cobreado de 2 m de longitud, pudiendo prolongarse mediante tramos roscados.

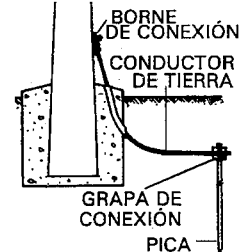


Fig. 3.57

La resistencia a tierra no debe ser superior a $20\ \Omega$. En zonas de pública concurrencia se utiliza una toma de tierra en anillo, con cable enterrado a la distancia de 1 m de las aristas del empotramiento (R.L.A.T. artículo 26).

Las autoválvulas y los herrajes de las líneas de M.T. así como el neutro de las líneas de baja tensión se conectan también a tierra (fig. 3.58).

Las derivaciones para toma de tierra en redes de baja tensión se realizan con conector o grapa bimetálicos (fig. 3.59).

3.38. CIMENTACIÓN Y ELEVACIÓN DE APOYOS

- La *excavación* (cilíndrica o prismática) se hace habitualmente de forma mecánica, mediante excavadoras o perforadoras
- La *elevación* de los apoyos puede hacerse:
 - En apoyos de madera o de hormigón, manualmente mediante caballetes y pértigas; pero habitualmente se realiza mediante grúas autopropulsadas.
 - La elevación de apoyos formados por estructuras metálicas, puede realizarse: montando la estructura en el suelo y elevándola completa mediante pluma y torno, con uno de los extremos sujeto a la cimentación, o haciendo la elevación de la estructura metálica que forma el apoyo montándola por tramos.

Después de la elevación del apoyo se procede al compactado del terreno extraído y al hormigonado.

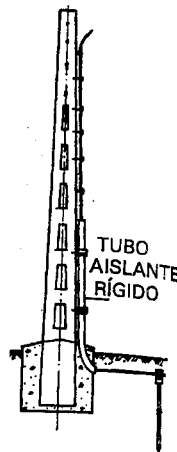


Fig. 3.58



Fig. 3.59

3.39. TENDIDO DE CABLES

En cables de poco peso y vanos pequeños, con conductor RZ para B.T., el tendido se efectúa desenrollando la bobina a mano.

En cables de gran diámetro y vano amplio, el tendido se realiza:

- Desenrollado sin tensión mecánica: las bobinas van montadas en un vehículo, de forma que al moverse éste el cable queda tendido en el suelo por gravedad;

posteriormente se suben los conductores al punto de sujeción. No es válido este tendido para crucetas de bóveda.

- Desenrollado con tensión mecánica: las bobinas se sostienen fijas y se tira del cable mediante cabrestante.

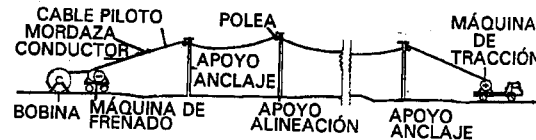


Fig. 3.60

El tendido se realiza después de 15 días como mínimo de la cimentación de los apoyos.

3.40. TENSADO DE CABLES

Se realiza:

- Manualmente*, en líneas de poco peso y pequeños vanos, realizándose el tendido vano a vano mediante un tensor de palanca.
- Mecánicamente*, en líneas con grandes vanos y cables de mucho peso, mediante cabrestante y máquina freno, sujetos los cables a las crucetas mediante poleas (fig. 3.60).

La tensión mecánica del cable será según las tablas de tendido de acuerdo con la temperatura ambiente y se observa mediante dinamómetro o mediante observación ocular de la flecha (fig. 3.61).

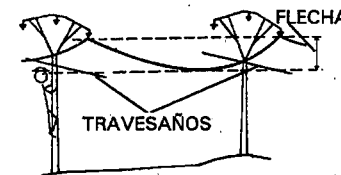


Fig. 3.61

3.41. INSTALACIÓN DE LÍNEAS AÉREAS DE MEDIA TENSIÓN CON CONDUCTORES DE ALUMINIO ACERO

La secuencia de operaciones, después de la colocación y cimentación de apoyos es la siguiente:

- Colocar sobre las crucetas las cadenas de aisladores, colgando de éstas unas poleas de aluminio, de diámetro 25 a 30 veces el diámetro del cable.
- Tender el cable conductor.
 - Antes del tendido del conductor se colocan protecciones provisionales de madera en cruces con carreteras, ferrocarriles, otras líneas, etc. de forma que los conductores queden, durante el tendido, por encima de las protecciones. Suelen ser de madera.
 - El cable guía, sujeto a la máquina de tracción arrastra al conductor sobre las poleas. Cuando el conductor ha pasado por todas las poleas, en el primer apoyo del tramo se retira la polea y se coloca la grapa de amarre.
 - En el tendido, los empalmes del conductor deben ir en los puentes de las grapas de amarre de los apoyos de ángulo o anclaje.
- Tensar el cable según la tensión de tendido y el vano de regulación observando la flecha.
- Sacar las poleas de tendido y sujetar el conductor a los aisladores, mediante grapas.

3.42. INSTALACIÓN DE LÍNEAS AÉREAS DE BAJA TENSIÓN

■ Red tensada sobre apoyos

Se utilizan apoyos de hormigón, según la siguiente tabla:

Tabla 3.17

Conductor	Tensión máxima (kp)	Vano máximo (m)	Apoyo fin de línea resistencia (kp)/altura (m)
RZ 0,6/ 1kV 3×25 Al+54,6 Alm	315	45	400/9
RZ 0,6/ 1kV 3×50 Al+54,6 Alm	500	50	630/9
RZ 0,6/ 1kV 3×95 Al+54,6 Alm	500	50	630/9
RZ 0,6/ 1kV 3×150 Al+95 Al	500	50	1 000/9

Los apoyos de alineación tendrán de resistencia mínima 160 kp.

Secuencia de montaje de los conductores:

- Sujetar a los apoyos los ganchos y anclajes previstos.
- Realizar el tendido del cable. Se recomienda la utilización de poleas de madera o aluminio de diámetro mínimo 23 veces el de los cables con ancho y profundidad de la garganta no inferiores a 1,5 veces el diámetro del haz de cables.
- Efectuar el tense del cable según la tabla de tendido y el vano de regulación.
- Separar del haz los fiadores o neutros portantes para realizar, a continuación el amarre (el amarre debe ser 24 horas después del tendido para que se igualen las tensiones en los vanos por las oscilaciones del cable).

■ Red posada sobre fachada

Secuencia de montaje de los conductores:

- Realizar los taladros para los soportes con intervalos de 50 a 70 cm, como mínimo a 30 cm de la techumbre o esquina del edificio.
- Colocar los soportes sobre la pared del edificio.
- Efectuar el tendido del cable, situándolo en los soportes y cerrando éstos a continuación.

3.43. SEÑALIZACIÓN DE SEGURIDAD EN LAS LÍNEAS AÉREAS

Consiste en la colocación de indicadores de peligro en cada apoyo de las líneas de primera categoría y en las que pasen por zonas muy frecuentadas.

En las proximidades de los aeropuertos se pintan de rojo y blanco los apoyos y se colocan en los conductores lámparas de descarga para señalización nocturna.

3.44. APERTURA DE CALLES EN ZONAS DE ARBOLADO PARA LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN

Para evitar interrupciones del servicio y los posibles incendios producidos por el contacto de ramas o troncos de árboles en los conductores de la línea (artículo 35 del R.L.A.T.), cuando la línea pasa por zonas de bosque o arbolado se establece, mediante la indemnización correspondiente, una zona de tala de árboles, corte de ramas y desbrozado. La zona suele ser una calle de 16 m de ancho.

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.3-1. Una derivación trifásica de longitud 1 200 m alimenta un centro de transformación de 630 kVA a una tensión de 20 kV. El conductor utilizado es LA 56 y la cruceta que soporta los conductores tiene una distancia entre ellos de $D_{12}=2$ m, $D_{23}=2$ m y $D_{31}=4$ m. Calcular:

- Reactancia de la línea.
 - Impedancia de la línea.
 - Caída de tensión porcentual en la línea a plena carga con factor de potencia 0,8 inductivo.
 - Pérdida de potencia en la línea.
 - Densidad de corriente en el conductor.
- Solución: a) 0,493 Ω ; b) 0,944 Ω ; c) 0,14%; d) 731 W; e) 0,33 A/mm².

P.3-2. Un cable conductor LA 56 está tendido en un vano horizontal de 80 m, en zona A y sin viento, con una flecha de 1 m. Si la carga es de 0,189 kp/m y se considera distribuida sobre la horizontal. Calcular:

- Tensión horizontal.
 - Tensión en un extremo.
 - Longitud del conductor en el vano.
- Solución: a) 151,2 kp; b) 151,4 kp; c) 80,03 m.

P.3-3. Una línea eléctrica a 20 kV, con cable conductor LA 56, discurre a una altitud de unos 600 m con una longitud de 4 km. Calcular:

- Sobrecarga por viento.
 - Sobrecarga por hielo.
 - Tense a 50 °C, sin viento, en un tramo de alineación de vano máximo horizontal 100 m y vano medio 70 m. El tense máximo de 415 kp se considera a -15 °C con sobrecarga de hielo.
 - Flecha máxima con el tense anterior.
- Solución: a) 0,5977 kp/m; b) 0,7424 kp/m; c) 88 kp; d) 2,18 m.

P.3-4. Un apoyo de alineación con cruceta tipo bóveda tiene vanos contiguos de 120 y 90 m de luz. El apoyo es de hormigón HV 400 R11, con altura de empotramiento 1,5 m. Las alturas del punto de amarre de la cadena de aisladores a la cruceta sobre la cogolla del poste son de 1,15 m y 1,55 m. El conductor es LA 56, de diámetro 9,45 mm. Calcular:

- Fuerza del viento sobre cada conductor.
 - Esfuerzo en punta en sentido transversal, considerando solamente la fuerza del viento sobre los conductores.
 - Tense máximo con coeficiente de seguridad 3,2, sabiendo que la carga mínima de rotura para el conductor es de 1 670 kp.
 - Esfuerzo en punta en sentido longitudinal.
- Solución: a) 59,54 kp; b) 202,75 kp; c) 522 kp; d) 142,2 kp.



LÍNEAS SUBTERRÁNEAS

P.3-5. Una línea aérea trifásica de 20 kV, con conductor LA 30 forma un ángulo de 110° en un punto en el que se utiliza un apoyo C-2000-12, con empotramiento de 2,2 m y cruceta recta, de altura sobre la punta del poste de 1 m. Los vanos contiguos al apoyo son de 100 y 70 m. Calcular el esfuerzo en punta en sentido transversal, considerando la acción del viento sobre los conductores y la tensión debida a las tracciones que se consideran iguales a la máxima. Diámetro del conductor 7,14 mm, carga mínima de rotura 1010 kp y coeficiente de seguridad 3.

Solución: a) 1375 kp.

P.3-6. Calcular el esfuerzo en punta en sentido longitudinal que soporta un apoyo de anclaje en una línea aérea trifásica con cable conductor LA 56, y cruceta recta a la altura del extremo del apoyo. La carga de rotura del conductor es 1670 kp y el coeficiente de seguridad utilizado 3.

Solución: 835 kp.

P.3-7. Calcular la caída de tensión más desfavorable en la línea aérea de la figura 3.62, construida con conductores de aluminio trenzados en haz con las secciones indicadas. Se considera el consumo como instalación trifásica equilibrada. La tensión es de 380/220 V.

Solución: $u_{AD} = 5,42\%$

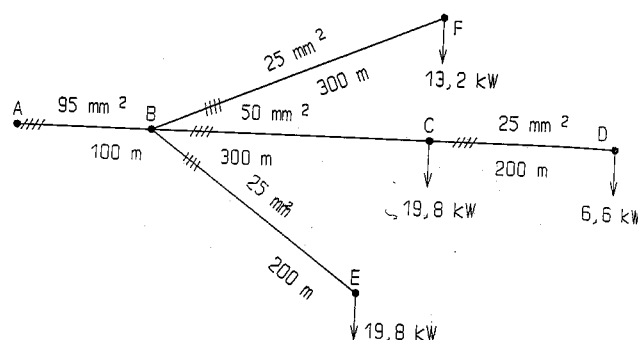


Fig. 3.62

P.3-8. Una instalación aérea de B.T. situada en una zona de altitud 700 m sobre el nivel del mar, está sometida a sobrecarga por hielo. Calcular el peso unitario del cable trenzado RZ 0,6/1 kV 3×95 Al/54,6 Alm.

Solución: 2,53 kp/m.

P.3-9. Una línea aérea de B.T. con cable RZ 0,6/1 kV 3×95 Al/54,6 Alm, forma un ángulo de 120° . Calcular la fuerza resultante sobre el apoyo en ángulo, sabiendo que se considera un tense máximo de 400 kp y se desprecia la acción del viento sobre el cable.

Solución: 400 kp.

P.3-10. En una línea aérea de M.T. se utiliza como apoyo de alineación el poste de hormigón HV-630-R de altura total 13 m y altura de empotramiento 1,8 m. Calcular:

a) Momento de vuelco.

b) Momento estabilizador para terreno normal, utilizando como lado de la base de hormigón 1 m y considerando el peso de las cargas verticales 4,23 toneladas.

c) Coeficiente de seguridad.

Solución: a) 7,81 m; b) 20,82 m·t; c) 2,67.

4.1. LÍNEAS SUBTERRÁNEAS

Se utilizan en líneas de distribución en M.T. para núcleos urbanos y en líneas de B.T.

4.2. CABLES SUBTERRÁNEOS

Los conductores eléctricos son de cobre recocido o aluminio semiduro, cableados a base de hilos redondos (cuerda) para conductores unipolares. Para secciones iguales o mayores a 50 mm^2 en cables multipolares se utilizan cuerdas sectoriales. La resistividad del aluminio es 1,64 veces mayor que la del cobre; pero a igualdad de resistencia eléctrica entre conductores el peso del aluminio es la mitad del de cobre.

La disposición de los cables de M.T. es la siguiente: el conductor recubierto de una capa semiconductor revestido de aislante, con una pantalla de cobre, un relleno y una armadura metálica; todo ello protegido por una cubierta.

El cable puede ser unipolar (de una sola alma) y multipolar (de varias almas, con su propio aislante y pantalla). El cable multipolar sin pantallas sólo se utiliza para tensiones hasta 15 kV (cables de campo no radial). Los aislantes empleados son: papel impregnado y termoplásticos (PVC) hasta 20 kV; termoestables (PRC o XLPE) hasta 100 kV.

Se utilizan aislantes especiales en cables antillama y en cables resistentes a ambientes determinados.

Las *pantallas*, realizadas habitualmente con hilos de cobre, mallas de cobre o hojas de aluminio, tienen por objeto mejorar la distribución del campo eléctrico en el cable y evitar influencias de éste con campos eléctricos exteriores. Para mejorar la distribución del campo eléctrico se utilizan también capas semiconductoras entre el conductor y el aislante, y entre éste y la pantalla.

Las *armaduras*, realizadas habitualmente de fleje de acero, van colocadas sobre el aislamiento para protección mecánica del cable conductor.

Las *cubiertas* de los cables protegen las armaduras metálicas contra la corrosión y la acción de agentes químicos. Si la armadura es de plomo la cubierta no es necesaria. Actualmente la mayoría de las cubiertas se hacen de materiales termoplásticos.

4.3. CABLES AISLADOS SUBTERRÁNEOS PARA MEDIA TENSIÓN

En las líneas subterráneas de media tensión se utilizan varios tipos de cables:

■ Cables de aislamiento seco

El cable más utilizado es de aluminio.

- 1) *Composición.* Cuerda de hilos de aluminio recubierto de pantalla semiconductora, aislamiento plástico, pantalla semiconductora, pantalla de cobre y cubierta de PVC (fig. 4.1).

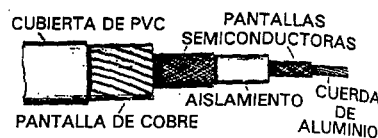


Fig. 4.1

- 2) *Designación.* Se designan por tres letras (la primera indica el aislamiento, la segunda la pantalla y la tercera el material de la cubierta), seguidas por la tensión nominal, la composición del cable con su sección y la sección de la pantalla¹.

Así el cable DHV 12/20 kV 1x240 kAl+H 16, es el cable con aislamiento de etileno propileno (D), pantalla (H), cubierta de PVC (V), tensión nominal 12/20 kV, unipolar de 240 mm² de sección, forma circular (k), aluminio y sección de la pantalla 16 mm².

- 3) *Características.* Las principales características de los conductores más utilizados se indican en la tabla siguiente:

Tabla 4.1

CARACTERÍSTICAS	CABLES RHV/DHV 12/20 kV			
	1x95 Al	1x150 Al	1x240 Al	1x400 Al
Sección nominal (mm ²).	95	150	240	400
Espesor nominal de aislamiento (mm).	5,5	5,5	5,5	5,5
Diámetro exterior aproximado (mm).	30	33	37	47
Número de alambres del conductor.	15	15	30	53
Radio mínimo de curvatura (mm).	420	480	560	680
Peso aproximado (kp/km).	910	1140	1540	2300
Nivel de aislamiento a impulsos (kV).	125	125	125	125
Intensidad admisible al aire a 40 °C (A).	245	320	435	580
Intensidad admisible enterrado a 25 °C (A).	250	315	415	530
Intensidad admisible en cortocircuito con duración 0,1 s (kA).	27,9	44,1	70,5	117,6
Resistencia máxima a 20 °C (Ω/km).	0,320	0,206	0,125	0,078
Capacidad (μF/km).	0,235	0,257	0,310	0,360
Reactancia inductiva (Ω/km).	0,119	0,110	0,104	0,097

La temperatura máxima de trabajo de estos cables es de 90 °C y en cortocircuito de duración inferior a 5 s 250 °C.

¹ Ver tabla 1.3

■ Cables de papel impregnado

- 1) *Composición.* Cable trifásico con conductores de cobre o aluminio, aislados con papel aceitado (fig. 4.2), cubierta común de plomo y cubierta exterior de PVC.

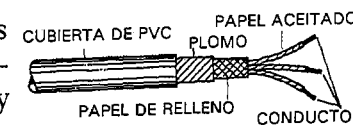


Fig. 4.2

- 2) *Designación.* Se designan por tres letras (la primera indica el aislamiento de papel (P), la segunda la cubierta de plomo (P) y la tercera la cubierta exterior (V), seguidas por la tensión nominal y la composición del cable con su sección y material conductor. Así el cable PPV 12/15 kV 3x95 Cu, es el cable con aislamiento de papel impregnado, cubierta de plomo y cubierta exterior de PVC, 12/15 kV de tensión nominal, tripolar de cobre de 95 mm² de sección.
- 3) *Características.* Las principales características de los conductores más utilizados son las indicadas en la tabla siguiente:

Tabla 4.2

CARACTERÍSTICAS	PPV 12/15 kV	
	3x95 Cu	3x150 Al
Sección nominal (mm ²).	95	150
Número de hilos.	19	37
Diámetro exterior (mm).	57	59
Radio mínimo de curvatura (cm).	114	60
Intensidad nominal al aire a 40 °C (A).	215	195
Intensidad nominal enterrado a 25 °C (A).	125	235
Intensidad admisible de cortocircuito de duración 0,5 s (kA).	9,3	15
Resistencia máxima a 20 °C (Ω/km).	0,19	0,206

La temperatura máxima de trabajo de estos cables es de 70 °C

4.4. CÁLCULO DE LÍNEAS SUBTERRÁNEAS DE MEDIA TENSIÓN

Los cables de M.T. en distribución trifásica designan su *tensión* por dos cifras separadas por una barra, U₀/U. La primera tensión U₀ indica el valor eficaz de la tensión simple fase-tierra de la red eléctrica, que corresponde a la tensión entre el conductor y la pantalla del cable. La segunda tensión U, indica el valor eficaz de la tensión compuesta de la línea. La tensión nominal del cable para M.T. se elige según la tensión máxima de la red y su sistema de puesta a tierra.

Para la tensión de aislamiento de los cables, las líneas se clasifican en dos categorías:

- 1ª Categoría: Redes que en caso de defecto de una fase a tierra no van a funcionar nunca un período mayor de 8 horas.
- 2ª Categoría: Redes que no están incluidas en el caso anterior.

La elección de la tensión de aislamiento del cable para redes de segunda categoría requiere un aislamiento y un coste más elevado, pero permite la utilización del cable con una fase a tierra más que por períodos breves de tiempo. En las líneas de M.T., de tensión nominal 20 kV, se utilizan cables de tensión nominal 12/20 kV o 15/25 kV.

La *intensidad admisible en régimen permanente*, en condiciones normales de servicio, se indica para 40 °C al aire y 25 °C de temperatura ambiente en instalación enterrada. Si las condiciones de instalación son distintas a las normales se utilizan factores de corrección.

La elección de la *sección* del cable de M.T. se realiza calculando:

- Intensidad de corriente que circula por el conductor.
- Intensidad de cortocircuito a que está sometido el conductor. (La sección necesaria para poder soportar el cortocircuito se estudió en el epígrafe 2.15).
- Caída de tensión en el conductor. (La caída de tensión en M.T. se estudió en el epígrafe 2.12).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

4.4-1. Una línea subterránea trifásica, de tensión 20 kV, alimenta un centro de transformación con un transformador de 400 kVA a una distancia de 350 m. Se utilizan cables unipolares tipo DHV 12/20 kV 1x95 k Al, que admiten en instalación enterrada 250 A. Calcular:

- Intensidad de línea para funcionamiento a plena carga del transformador.
- Intensidad de cortocircuito si la potencia de cortocircuito en el punto de entronque con la línea de distribución, según la empresa suministradora es de 450 MVA.
- Sección necesaria para soportar el cortocircuito si su duración (según la empresa suministradora) es de 0,2 s y la constante K del cable según el fabricante es de 94.
- Caída de tensión a plena carga en la línea, con un factor de potencia 0,8 inductivo, si la resistencia del cable es de 0,32 Ω/km y la reactancia 0,119 Ω/km.

$$a) \text{ Intensidad de línea a plena carga en el primario } I_{L1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} V_L} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 20} = 11,55 \text{ A}$$

b) La intensidad de cortocircuito:

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} V_L} = \frac{450 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 12\,990 \text{ A} = 12,99 \text{ kA}$$

c) La sección necesaria para soportar el cortocircuito:

$$s = \frac{I_{cc} \sqrt{t}}{K} = \frac{12\,990 \cdot \sqrt{0,2}}{94} = 61,8 \text{ mm}^2$$

d) La caída de tensión de línea:

$$u = \sqrt{3} I_{L1} L (R \cos \varphi + X \sin \varphi) = \sqrt{3} \cdot 11,55 \cdot 0,35 \cdot (0,32 \cdot 0,8 + 0,119 \cdot 0,6) = 2,29 \text{ V}$$

$$\text{En tanto por cien } u\% = \frac{2,29 \cdot 100}{20 \cdot 10^3} = 0,011\%$$

4.4-2. Una línea subterránea, con cables unipolares RHV 12/20 kV 1x150 k Al alimenta a 20 kV, un transformador de 1000 kVA, a una distancia del punto de entronque con la línea de distribución en M.T. de 560 m. Calcular:

- Sección necesaria para soportar el cortocircuito, si en el punto de entronque la potencia de cortocircuito es de 300 MVA. La duración del cortocircuito se considera 0,3 y la constante K del cable 94.
- Caída de tensión en la línea a plena carga, con factor de potencia 0,8 inductivo, si la resistencia de la línea es 0,21 Ω/km y la reactancia 0,11 Ω/km.

Solución: a) 50,46 mm²; b) 6,55 V.



MANGUITO EMPALME POR COMPRESIÓN

Fig. 4.3

4.5. EMPALME, DERIVACIÓN Y TERMINAL

Se utilizan kits que contienen los elementos de montaje con sus accesorios y la información técnica.

Los empalmes y derivaciones se realizaban en cajas metálicas (de hierro en trifásica y de plomo en monofásica). Actualmente se realizan en cajas de plástico.

La unión de una línea aérea con otra subterránea se hace en caja terminal de interior o de intemperie.

4.6. EMPALMES SUBTERRÁNEOS EN MEDIA TENSIÓN

a) *Empalme con cable de aislamiento seco.* Para el cable RHV se utiliza

manguito de empalme por compresión con aplicación de distintas cintas conductoras y aislantes para la reconstrucción del aislamiento del conductor (fig. 4.3).

MANGUITO EMPALME PUNZONADO

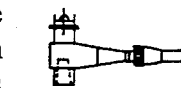


Fig. 4.4

Se utilizan actualmente los empalmes con piezas premoldeadas. Formados por un conjunto de piezas que constituyen un "kit" de empalme. Después de unir el cable con un manguito, al retirar el núcleo interior del cuerpo del empalme de caucho-silicona, éste se contrae realizando el sellado del cable. Este empalme con cuerpo retráctil en frío se utiliza hasta 36 kV para cables con aislamiento seco.

b) *Empalme mixto.* Para conexión de cable tripolar con aislamiento de papel impregnado con tres cables unipolares de aislamiento seco (fig. 4.4), suele hacerse con vertido de resina en frío.

c) *Conectores enchufables.* Empalme premoldeado que facilita la unión de un cable aislado a otro cable o a un terminal de un equipo eléctrico (fig. 4.5). En estos conectores se distinguen cuatro partes: conductor, apantallamiento interno, aislamiento y apantallamiento externo.



DERIVACIÓN ENCHUFABLE

Fig. 4.5

Con estos conectores se pueden montar distintos tipos de derivaciones y se utilizan mucho para la conexión del cable al terminal del transformador, formado por un pasatapas también enchufable. La instalación de los conectores puede ser en el interior o en el exterior, sin necesidad de herramientas especiales, encintado o material de relleno. Se utilizan hasta una tensión de 24 kV.

4.7. TERMINALES DE CABLES SUBTERRÁNEOS PARA MEDIA TENSIÓN

El manguito terminal es el elemento utilizado para conectar los extremos de los cables subterráneos a los equipos eléctricos o a las líneas. Hay que distinguir que los terminales sean para recinto interior o para exterior, destinados a la conexión de líneas aéreas con subterráneas.

Los terminales son distintos según sean para cable de aislamiento seco o para cables de papel impregnado. Todos llevan un cono deflector (componente del terminal que unido a la pantalla o envoltente metálica del cable, en el punto donde esta termina, reduce el gradiente de potencial en ese punto).

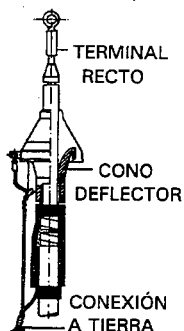


Fig. 4.6

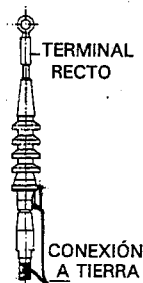


Fig. 4.7

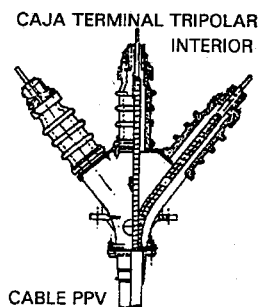


Fig. 4.8

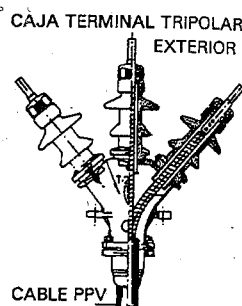


Fig. 4.9

Los terminales más utilizados, según el tipo de cable, son:

- Cable de aislamiento seco. Se utilizan terminales preformados, sin aislamiento de porcelana (fig. 4.6). El terminal exterior lleva aletas (fig. 4.7) para aumentar la longitud de la línea de fuga de una descarga de contorno del terminal.
- Cables de papel impregnado, en los que se necesita aportación de calor. Las cajas terminales constan de aisladores de porcelana rellenos de mezcla aislante según el tipo de aislamiento del cable (fig. 4.8). En los terminales de exterior el aislador de porcelana dispone de aletas para alargar la línea de fuga de una descarga de contorno del aislador (fig. 4.9).

Actualmente se utilizan *terminales retráctiles en frío* hasta tensiones de 45 kV, mediante una pieza de caucho-silicona, que se realizan de la forma siguiente:

- En cable de aislamiento seco la instalación se realiza una vez pelada la cubierta y la pantalla de cobre. Se coloca la pieza terminal y se retira la cinta de su núcleo, con lo que la pieza se retrae adaptándose al cable y garantizando un cierre estanco. En terminales de exterior se sellan los extremos de la pieza con cinta de silicona.
- En cable de aislamiento de papel impregnado se utilizan también terminales retráctiles, convirtiendo previamente el aislante de la terminación a seco mediante cinta aislante y tubo termorretráctil de polivinilo (se retrae al aplicarle una fuente de calor). A continuación se sigue el mismo proceso que para el cable de aislamiento seco.

4.8. CABLES SUBTERRÁNEOS PARA LÍNEAS DE BAJA TENSIÓN

Se utilizan, generalmente, conductores de aluminio con aislamiento plástico de polietileno reticulado PRC o XLPE.

- 1) *Composición:* Cuerda de aluminio, aislamiento de PRC y cubierta exterior de PVC (fig. 4.10).
- 2) *Designación:* Se designan con dos letras (la primera indica el aislamiento R y la segunda la cubierta exterior V), seguidas por la tensión nominal, composición del cable, sección y material conductor. Así el cable RV 0,6/1 kV 1x95 Al, es el conductor de aislamiento de PRC, cubierta de PVC, tensión nominal 0,6/1 kV, unipolar de aluminio con 95 mm² de sección.
- 3) *Características:* Las principales características de los conductores más utilizados son las indicadas en la tabla siguiente:

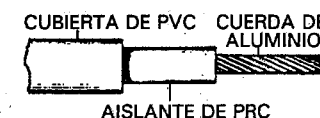


Fig. 4.10

Tabla 4.3

CARACTERÍSTICAS	RV 0,6/1 kV				
	1x25 Al	1x50 Al	1x95 Al	1x150 Al	1x240 Al
Sección nominal (mm ²).	25	50	95	150	240
Número mínimo de alambres del conductor.	6	6	15	15	30
Espesor radial de aislamiento (mm).	0,9	1,1	1,2	1,4	1,7
Diámetro exterior aproximado (mm).	11,1	13,7	17,8	21,8	27,1
Peso aproximado (kg/km).	160	247	434	646	1 008
Intensidad admisible enterrado 40 °C (A).	125	180	260	330	420
Intensidad admisible bajo tubo (A).	100	144	208	264	344
Intensidad admisible en cortocircuito con duración de 0,5 s (kA).	3,3	5,6	12,54	19,8	31,68
Resistencia máxima a 20 °C (Ω/km).	1,2	0,64	0,32	0,206	0,125

Se utilizan también cables trifásicos con conductor de cobre o aluminio, aislados con PRC y cubierta de PVC.

4.9. CÁLCULO DE LÍNEAS SUBTERRÁNEAS DE BAJA TENSIÓN

En el cálculo de líneas subterráneas de B.T. se suele considerar solamente la resistencia de los conductores. En cálculos de más exactitud no se debe despreciar las reactancias de autoinducción y de capacidad de los cables. El cálculo se realiza por caída de tensión, considerando la intensidad admisible en los conductores enterrados (MIE BT 007) de cobre o aluminio.

Los conductores son unipolares o multipolares, de tensión nominal no inferior a 1 000 V y sección no inferior a 6 mm² para el cobre y 10 mm² para el aluminio, según la instrucción MIE BT 005.

Las conexiones con derivaciones se protegen con fusibles, siempre que exista una reducción en la intensidad admisible. En las derivaciones de pequeña longitud, como acometidas, se admiten fusibles al final de la derivación. El Reglamento de Baja Tensión (MIE BT 006) indica la condiciones de la instalación y distancias de cruzamientos, proximidades y paralelismos con otras instalaciones y vías de comunicación.

La sección del conductor para soportar una intensidad de cortocircuito I_{cc} admitida en estos conductores de tensión 0,6/1 kV, para una duración del mismo no superior a 5 s y de modo que la temperatura no alcance más de 250 °C, se puede calcular, de acuerdo con las normas UNE, igual que para los cables de M.T. (epígrafe 2.15):

$$S = \frac{I_{cc} \sqrt{t}}{K}$$

La sección del conductor a utilizar debe ser superior a la sección necesaria para soportar el cortocircuito.

En las instalaciones interiores o receptoras de B.T. muy alejadas del centro de transformación no se suele calcular el cortocircuito, porque se considera que la temperatura no alcanza valores peligrosos en el tiempo que tardan en actuar las protecciones.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

4.9-1. Calcular la sección de los distintos tramos de la línea de distribución trifásica indicada en la figura 4.11. La línea está formada por cable unipolar con conductor de aluminio aislado con polietileno reticulado 0,6/1 kV, para instalación enterrada bajo tubo. La tensión de línea es 380 V y la caída de tensión máxima es la indicada en cada tramo. Se considera un factor de potencia unidad para todas las cargas y la temperatura de 25 °C.

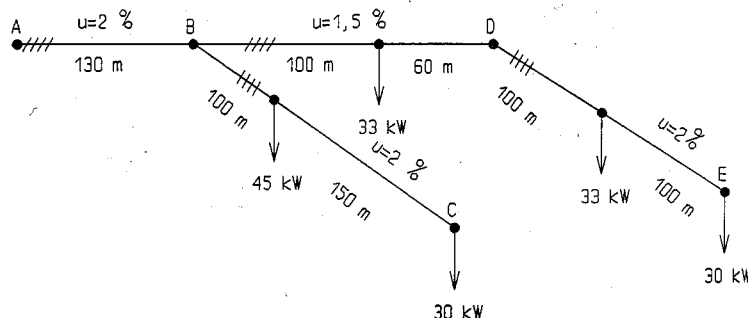


Fig. 4.11

La caída de tensión en el tramo AB $u_1 = \frac{2 \cdot 380}{100} = 7,6 \text{ V}$

Considerando en el punto B toda la carga conectada a este punto fuera del tramo $33 + 33 + 30 + 30 + 45 = 171 \text{ kW}$.

La sección: $s_1 = \frac{LP_1}{cu_1 V_L} = \frac{130 \cdot 171 \cdot 1000}{35 \cdot 7,6 \cdot 380} = 219,9 \text{ mm}^2$

Según la instrucción MIE BT 007 la sección normalizada inmediatamente superior a la calculada es 240 mm², que admite, a la temperatura ambiente de 25 °C, la intensidad de $430 \cdot 0,8 = 344 \text{ A}$ bajo tubo (tabla 2.9).

La intensidad que circula por el tramo AB es la intensidad total:

$$I_{L1} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos \varphi} = \frac{171 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 1} = 259,8 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 240 mm² por lo que se elige para el tramo AB esta sección $3 \times 240 + 1 \times 120$.

La caída de tensión en el tramo BD $u_2 = \frac{1,5 \cdot 380}{100} = 5,7 \text{ V}$

La sección $s_2 = \frac{\sum (LP)_2}{cu_2 V_L} = \frac{100 \cdot 33 \cdot 1000 + 160 \cdot 63 \cdot 1000}{35 \cdot 5,7 \cdot 380} = 176 \text{ mm}^2$

Según el R.B.T. (MI BT 007), la sección normalizada inmediatamente superior es de 185 mm², que admite una intensidad de 300 A bajo tubo (tabla 2.9).

La mayor intensidad que circula por el tramo BD es la intensidad total que parte de B hacia D.

$$I_{L2} = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos \varphi} = \frac{96 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 1} = 146 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 185 mm², por lo que se elige para el tramo BD esta sección.

La caída de tensión en el tramo DE $u_3 = \frac{2 \cdot 380}{100} = 7,6 \text{ V}$

La sección $s_3 = \frac{\sum (LP)_3}{cu_3 V_L} = \frac{100 \cdot 33 \cdot 1000 + 200 \cdot 30 \cdot 1000}{35 \cdot 7,6 \cdot 380} = 92 \text{ mm}^2$

Según el R.B.T. (MI BT 007), la sección normalizada inmediatamente superior es de 95 mm², que admite una intensidad de $260 \cdot 0,8 = 208 \text{ A}$ bajo tubo (tabla 2.9).

La mayor intensidad que circula por el tramo DE es la intensidad total de la derivación.

$$I_{L3} = \frac{P_3}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos \varphi} = \frac{63 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 1} = 95,72 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 95 mm², por lo que se elige para el tramo DE esta sección $3 \times 95 + 1 \times 50$.

La caída de tensión en el tramo BC $u_3 = \frac{2 \cdot 380}{100} = 7,6 \text{ V}$

$$\text{La sección } s_4 = \frac{\sum (LP)_4}{cu_3 V_L} = \frac{100 \cdot 45\,000 + 250 \cdot 30\,000}{35 \cdot 7,6 \cdot 380} = 118,7 \text{ mm}^2$$

Según el R.B.T. (MI BT 007), la sección normalizada inmediatamente superior es de 120 mm², que admite una intensidad de 295·0,8=236 A bajo tubo (tabla 2.9).

La mayor intensidad que circula por el tramo BC es la intensidad total de la derivación.

$$I_{L4} = \frac{P_4}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos \varphi} = \frac{75 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 1} = 114 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 120 mm², por lo que se elige para el tramo BC esta sección 3×120+1×70.

4.9-2. La línea trifásica de distribución en B.T. representada en la figura 4.12, está formada por un cable tetrapolar con conductores de aluminio, aislados con polietileno reticulado, 0,6/1 kV, en instalación enterrada bajo tubo. La tensión es de 380/220 V y las secciones están indicadas en la figura. Calcular la caída de tensión desde el origen a los puntos E, D y G.

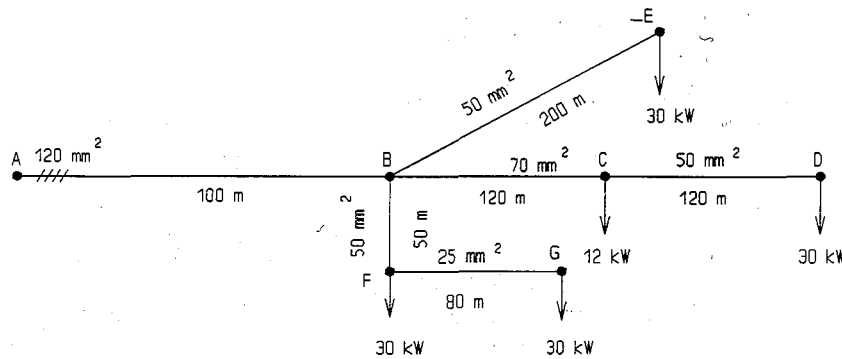


Fig. 4.12

Solución: $u_{AE}=4,55\%$, $u_{AD}=5,03\%$, $u_{AG}=5,27\%$

4.9-3. Calcular la sección de la línea trifásica cerrada representada en la figura 4.13. Los conductores son de aluminio, cable tetrapolar aislado con XLPE, 0,6/1 kV, en instalación enterrada bajo tubo. La tensión de línea es 380 V y la caída de tensión máxima 2%. Factor de potencia 1, común para todas las cargas.

Solución: 70 mm²

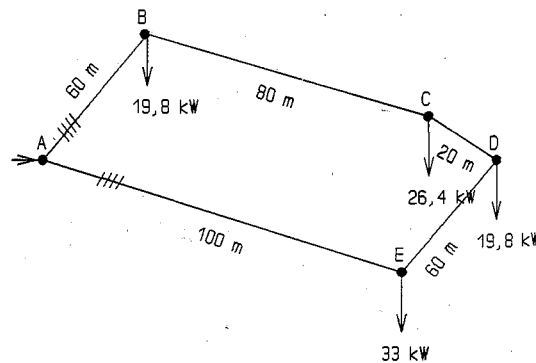


Fig. 4.13

4.10. EMPALMES Y DERIVACIONES EN B.T.

Los empalmes y derivaciones en las líneas subterráneas de B.T. se realizan:

- *Con vertido de resina.* en cajas de empalme o derivación subterráneas (fig 4.14), de material plástico con relleno de resina epoxi o similar.

Los kits de conexión están formados por dos medias protecciones acopladas entre sí, ajustables al diámetro exterior del cable y rellenas de mezcla aislante.

- *Retráctiles.* Los empalmes y derivaciones se protegen también con un cuerpo termorretráctil. La conexión se realiza con manguito o grapa de conexión cubierta con masilla aislante. La protección exterior termorretráctil está recubierta en su interior por un adhesivo que se derrite por la aplicación de calor, de forma que el cuerpo se retrae sellando perfectamente la conexión (fig 4.15). Estos materiales termorretráctiles tienen una gran resistencia mecánica y elevada resistencia a los agentes atmosféricos.

Para las terminaciones de los cables se utilizan también manguitos termorretráctiles (fig. 4.16).

Se fabrican también empalmes con cuerpo de protección retráctil en frío.



Fig. 4.14

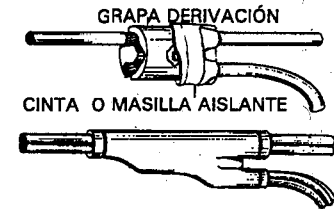


Fig. 4.15

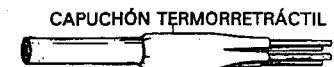


Fig. 4.16

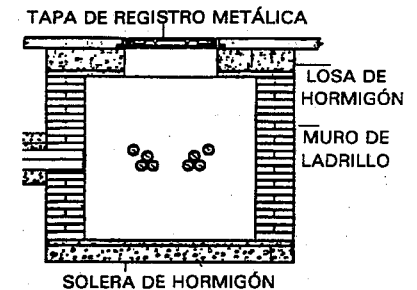


Fig. 4.17

4.11. REGISTRO O ARQUETA

Son pozos construidos de ladrillo y de hormigón empleados en las líneas subterráneas con conductor bajo tubo para montaje, realización de empalmes, derivaciones y terminales.

4.12. ARQUETAS DE REGISTRO PARA CANALIZACIONES SUBTERRÁNEAS DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN

Son pozos de sección rectangular construidos con muros de ladrillo macizo enlucido interiormente con mortero de cemento (fig. 4.17), solera de hormigón armado, losa de hormigón armado y tapa metálica.

La arqueta de registro puede ir bajo calzada o bajo acera. Se construyen en tramos rectos, separadas entre sí unos 25 m, y en los puntos de cambio de dirección de la línea. Las dimensiones de las arquetas son según las normas de la empresa suministradora de energía y se suelen construir con una longitud de 1,5 m en el sentido de tendido de la línea.

4.13. ARMARIOS DE URBANIZACIÓN

Las derivaciones en redes subterráneas de M.T. y la centralización de contadores de urbanizaciones se realizan en armarios de chapa de acero galvanizado colocados sobre el suelo con una base de hormigón (fig. 4.18). Según las necesidades de la urbanización son de distintas dimensiones.

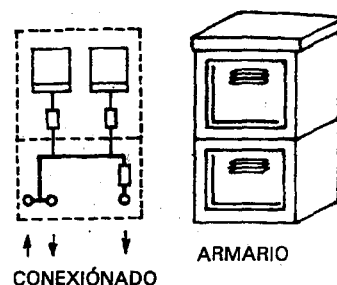


Fig. 4.18

4.14. EXCAVACIÓN Y PREPARACIÓN DE LA ZANJA

Para realizar la canalización subterránea se empieza por la excavación de la zanja con una profundidad que varía de 75 a 140 cm según las características de la canalización, mediante excavadoras, zanjadoras o martillos neumáticos.

Si el cable se entierra directamente se coloca en el fondo de la zanja una capa de arena.

Si el suelo es pavimentado o en cruzamiento de calzada los cables se colocan bajo tubo. Al construir la canalización se deja un alambre o cuerda dentro del tubo para limpieza del mismo y tendido del cable.

4.15. SEÑALIZACIÓN DE LÍNEAS SUBTERRÁNEAS

Se efectúa mediante una cinta de plástico enterrada a lo largo de la zanja, a más de 30 cm del cable y entre 10 y 30 cm de la superficie (fig. 4.19).

4.16. RELLENADO DE LA ZANJA

Se realiza vertiendo la tierra excavada y apisonándola. Si el cable va directamente enterrado, debajo de este se coloca una capa de arena fina de unos 10 cm, y por encima del cable otra capa de arena o tierra cribada de unos 30 cm de espesor. Sobre esta va una protección mecánica (ladrillos) y la cinta de señalización. El compactado de la tierra será manual los primeros 20 cm y luego se realizará mecánicamente por capas de 10 cm de espesor.

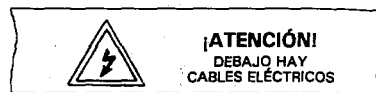


Fig. 4.19

4.17. ZANJAS Y CANALIZACIONES EN MEDIA TENSIÓN

Las zanjás se abren con una anchura de unos 60 cm y una profundidad mayor de 1 m y menor de 1,40 m, según el número de cables.

La canalización se realiza de varias formas:

- Cable directamente enterrado en zanja, sobre arena de río, con protección de rasilla o ladrillo y cinta de señalización (fig. 4.20)
- Bajo tubo de plástico o de fibrocemento, cuando se necesite protección mecánica. Los tubos de fibrocemento van unidos entre sí con corchete de cemento y la zanja lleva cinta de señalización (fig. 4.21). El diámetro interior del tubo es como mínimo dos veces el diámetro del cable o conjunto de cables contenidos, siendo su valor mínimo 15 cm. En la canalización cada tubo puede contener un cable tripolar, tres unipolares o un cable unipolar.

- En cruce de calzada. La canalización en zona urbana será bajo acera. El cruce de calzada se realiza perpendicular al eje de la misma, bajo tubo hormigonado como indica la figura 4.22.
- Canalización en galería. La galería puede ser visitable, cuando tiene dimensiones suficientes para el paso del personal, o registrable, cuyas dimensiones no permiten la circulación del personal y con tapas de registro que necesitan medios mecánicos para su manipulación. En las galerías

no se permiten canalizaciones de gas. Puede ir la canalización de agua siempre que se garantice que un escape en la misma no puede afectar al resto de la instalación, aunque no es recomendable. En la galería debe haber renovación de aire para evitar acumulaciones de gas y condensaciones. En las galerías visitables se instalan las canalizaciones eléctricas de potencia y cables de control y comunicaciones. Los cables van sujetos sobre soportes o bandejas, que como todos los elementos metálicos se conectan a la red de tierra de la galería. En las galerías registrables se instalan las canalizaciones eléctricas de media y baja tensión, de alumbrado, de control y de comunicación. Puede llevar también canalización de agua; pero las partes deben quedar estancas una vez colocada la tapa de cierre.

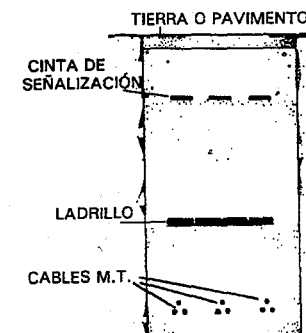


Fig. 4.20

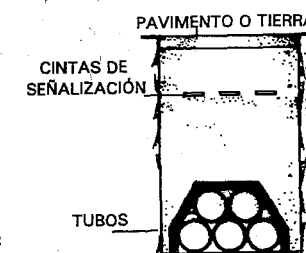


Fig. 4.21

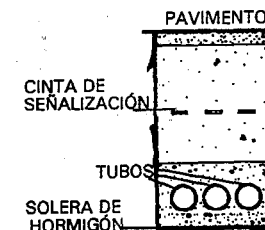


Fig. 4.22

4.18. ZANJAS Y CANALIZACIONES EN BAJA TENSION

Las *zanjas* se abren con una anchura de 60 cm y una profundidad mayor de 60 cm (MIE BT 006) y de 0,8 m en cruce de calzada.

La *canalización* se realiza de varias formas:

- Cable directamente enterrado en zanja, sobre arena de río, con protección de rasilla o ladrillo y cinta de señalización (fig. 4.23).
- Bajo tubo de plástico o de fibrocemento, cuando se necesite protección mecánica. El diámetro interior mínimo de los tubos es el doble del diámetro del cable, no siendo menor de 10 cm.
- El cruce de calzada, suele ir bajo tubo hormigonado y la zanja con cinta de señalización (igual que en M.T.).
- Canalización en galería. Pueden ir los cables sobre bandeja o sujetos por palomilla, en galerías visitables o registrables.

Las proximidades y paralelismos entre conducciones subterráneas se indican en la instrucción MIE BT 006. La distancia mínima con canalizaciones de A.T. es de 0,25 m y con otras canalizaciones 0,2 m.

4.19. TENDIDO DE CABLES

Los cables se suministran habitualmente en bobinas de madera, que para el tendido del cable se colocan en un apoyo que les permita girar.

Formas de tendido. El tendido se realiza sujetando el cable por una mordaza o manguito mediante el cual se ejerce la tracción y puede efectuarse de varias formas:

- Por gravedad desde un vehículo en marcha que se mueva a lo largo de la zanja.
- Tendido a mano sobre rodillo, en cables de poco peso, con tiro manual mediante manguito de arrastre (fig. 4.24).
- Tendido mecánico con rodillos accionados por motores.
- Tendido por medio de torno o cabrestante. Es el sistema más utilizado. La cuerda de tracción se sujeta al cable por medio de unas mordazas de arrastre, que consiste en un disco taladrado, en el que se introducen los conductores y se sujetan mediante tornillos. La tracción se ejerce desde un extremo de la zanja y en el otro extremo se halla la bobina (fig. 4.25). El mismo sistema se utiliza para el tendido en tubos o en galerías (fig. 4.26). Los esfuerzos de tracción del cable no deben sobrepasar los 5 kp/mm² para

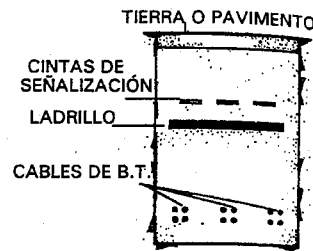


Fig. 4.23

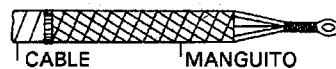


Fig. 4.24

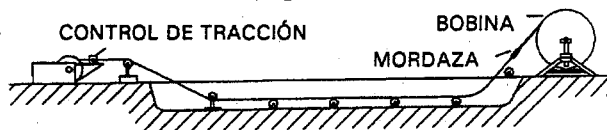


Fig. 4.25

conductores de cobre y la mitad para conductores de aluminio. Según el proyecto tipo UNESA la tracción máxima para cables tripolares no debe sobrepasar los 4 daN/mm² para el cobre y 2,5 daN/mm² para el aluminio.

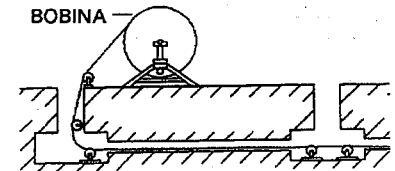


Fig. 4.26

El tendido no debe efectuarse a temperatura inferior a 0°C por la rigidez mecánica del aislante, que puede deteriorarse.

Radio de curvatura. La curvatura excesiva del cable puede dar lugar a deformaciones con deterioro de los aislantes. El fabricante del cable recomienda el radio mínimo de curvatura r en la canalización, que depende del diámetro del cable D y del diámetro del conductor d .

1) Para baja tensión $r=10D$

2) Para media tensión:

- Con cable de aislamiento de papel impregnado o cable unipolar de aislamiento seco:

$$r=10(D+d)$$

- Con cable tripolar de aislamiento seco $r=7,5(D+d)$

Según proyecto tipo UNESA el radio de curvatura durante el tendido para cables de M.T. no debe ser inferior a $20D$.

Comprobación. Después de efectuado el tendido se comprueba el aislamiento del cable y la continuidad de los conductores.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

4.19-1. En la canalización subterránea con conductor RV 0,6/1 kV 1×150 Al, calcular el radio de curvatura mínimo si el diámetro del conductor es de 21,8 mm.

El radio de curvatura $r=10D = 10 \cdot 21,8 = 218 \text{ mm} = 0,218 \text{ m}$

4.19-2. Calcular el mínimo radio de curvatura en una canalización subterránea para un cable RHV 12/20 kV 1×240 Al (ver diámetro en la tabla 4.1).

Solución: 0,56 m

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.4-1. Una línea subterránea, con cables unipolares RHV 12/20 kV 1×150 Al, alimenta a 20 kV, un transformador de 1 000 kVA, a una distancia del punto de entronque con la línea de distribución en M.T. de 1,5 km. Calcular:

- Sección necesaria para soportar el cortocircuito, si en el punto de entronque la potencia de cortocircuito es de 400 MVA, el tiempo de actuación de las protecciones 0,2 s y la constante del cable $K=94$.

- b) Caída de tensión en la línea a plena carga, con factor de potencia 0,9 inductivo, si la resistencia de la línea es $0,21 \Omega/\text{km}$ y la reactancia $0,11 \Omega/\text{km}$.
Solución: a) 55 mm^2 ; b) $17,77 \text{ V}$.

P.4-2. Con conductores de aluminio unipolares, aislados con XLPE en instalación enterrada bajo tubo, se alimenta con una longitud de 400 m a un transformador de 630 kVA , con un factor de potencia 0,8 inductivo a una tensión 20 kV . La caída de tensión admisible 2% y la temperatura del terreno 25°C . La resistencia del cable a la temperatura máxima 90°C es de $0,56 \Omega/\text{km}$ y la reactancia $0,13 \Omega/\text{km}$. El tiempo de disparo de las protecciones es de $0,2 \text{ s}$. Calcular:

- a) Sección necesaria para soportar el cortocircuito si la potencia de cortocircuito es de 450 MVA y la constante del cable $K=94$.
b) Caída de tensión en la línea con el conductor adoptado a la máxima temperatura de trabajo 90°C .

Solución: a) $61,8 \text{ mm}^2$; b) $6,63 \text{ V}$

P.4-3. Calcular la sección de los conductores de aluminio unipolares, aislados con XLPE en instalación enterrada bajo tubo, que alimentan con una longitud de 75 m a una instalación trifásica de consumo 44 kW con factor de potencia 0,8 inductivo a una tensión $380/220 \text{ V}$. La caída de tensión admisible 2% y la temperatura del terreno 25°C .

Solución: 35 mm^2 .

P.4-4. Calcular la sección de la línea trifásica representada en la figura 4.27. Los conductores son de aluminio, unipolares, aislados con XLPE, para 1 kV , en instalación enterrada bajo tubo. La tensión de línea es 380 V y la caída de tensión máxima admisible 2% . Se considera un factor de potencia común para todas las cargas de 0,9 inductivo.

Solución:
 70 mm^2 .

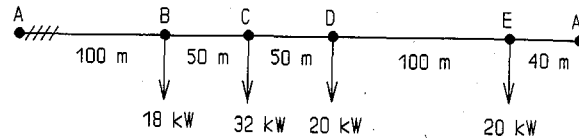


Fig. 4.27

P.4-5. Calcular la caída de tensión en los tramos AB, BC y BD de la línea subterránea indicada en la figura 4.28, con las secciones indicadas. Los conductores son unipolares de aluminio, aislados con XLPE y la tensión $380/220 \text{ V}$.

Solución: a) $u_{AB}=1,42\%$; $u_{BC}=1,19\%$; $u_{BD}=0,95\%$

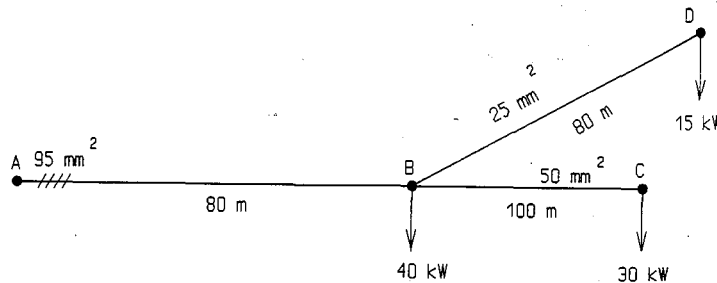


Fig. 4.28

5

APARAMENTA Y PROTECCIÓN

5.1 APARAMENTA ELÉCTRICA

Es el conjunto de aparatos que se utilizan para protección, conexión y desconexión de los circuitos eléctricos.

Según su ubicación los aparatos pueden ser:

- Aparato de *maniobra* o conexión. Intercalado en un circuito principal o de potencia.
- Aparato de *mando*. Intercalado en un circuito auxiliar o de mando.

Los aparatos de maniobra según su actuación pueden ser:

- *Manuales*. Necesitan ser accionados manualmente por el usuario.
- *Automáticos*. Actúan automáticamente en función del valor de una magnitud física.

5.2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS APARATOS ELÉCTRICOS

Los *parámetros característicos más utilizados en la aparamenta eléctrica* en general son:

- Valor nominal: Valor de las magnitudes indicadas para el aparato por el fabricante, y con las que puede funcionar permanentemente sin que provoquen efectos perjudiciales. Tensión, intensidad y frecuencia.

En alta tensión se especifica tensión nominal y tensión nominal más elevada (máxima tensión que debe soportar el aparato en condiciones normales de utilización). Se indican en MIE RAT 04 del Reglamento de Centrales, Subestaciones y Centros de Transformación. Tabla 5.1 para M.T.

Tabla 5.1

TENSIÓN NOMINAL DE LA RED (kV)	TENSIÓN MÁS ELEVADA PARA EL MATERIAL (kV)
3	3,6
6	7,2
19	12
15	17,5
20*	24
30	36
45	52
66*	72,5

(*) Valores de uso preferente en redes de distribución públicas.

En alta tensión se especifica el nivel de aislamiento. Viene indicado a frecuencia industrial (50Hz) y a impulsos tipo rayo (1,2/50 μ s), según la instrucción MIE RAT 12. Tabla 5.2 para media tensión (grupo A, tensión mayor de 1 kV y menor de 52 kV)).

Tabla 5.2

TENSIÓN MÁS ELEVADA PARA EL MATERIAL (kV eficaces)	TENSIÓN SOPORTADA NOMINAL A LOS IMPULSOS TIPO RAYO (kV cresta)		TENSIÓN SOPORTADA NOMINAL DE CORTA DURACIÓN A FRECUENCIA INDUSTRIAL (kV eficaces)
	Lista 1	Lista 2	
3,6	20	40	10
7,6	40	60	20
12	60	75	28
17,5	75	95	38
24	95	125	50
36	145	170	70

La elección de la lista 1 se hace según las consideraciones de la instrucción MIE RAT 12. Cuando sea necesario un alto grado de seguridad se utiliza el material correspondiente a la lista 2.

- Valor asignado. Valor de una magnitud establecida para un determinado funcionamiento del aparato.
- Intensidad límite térmica. Valor eficaz de la intensidad de corriente circulando durante un tiempo (1 a 3 s) a partir del cual los efectos térmicos de la corriente pueden dañar el aparato. La apartamentada debe soportar el afecto térmico de la intensidad de cortocircuito.
- Intensidad límite dinámica. Valor de la intensidad de corriente máxima o de pico, a partir de la cual los esfuerzos electrodinámicos pueden deteriorar el aparato. Los esfuerzos electrodinámicos dependen del cuadrado del valor máximo o de pico de la intensidad de corriente. La apartamentada debe soportar los esfuerzos electrodinámicos de la intensidad de cortocircuito

Los parámetros característicos de los aparatos de maniobra son:

- Poder de corte: Intensidad eficaz máxima que es capaz de cortar o interrumpir el aparato.
- Poder de cierre: Valor máximo o de pico de la intensidad de corriente que es capaz de soportar el aparato en el cierre del circuito.

5.3. INTERRUPTOR

Aparato mecánico de conexión que permite establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales y sobrecargas. Soporta durante un tiempo la intensidad de cortocircuito. Su poder de corte es suficiente para poder cortar la intensidad nominal, pero no la de cortocircuito. Se llama también interruptor en carga.

5.4. INTERRUPTOR AUTOMÁTICO

Aparato mecánico de conexión capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales, así como de establecer, soportar durante un tiempo y cortar corrientes de cortocircuito.

■ Constitución

El interruptor automático está constituido fundamentalmente por las siguientes partes:

- 1) *Contactos.* Conjunto de contactos fijos y móviles que al unirse o al separarse establecen la conexión o el corte de corriente.
- 2) *Cámara de extinción de arco.* Para la extinción del arco producido por la maniobra. En los interruptores automáticos de B.T. el arco se suele establecer en el aire, pero en los de intensidad nominal elevada la maniobra de los contactos se establece en exafluoruro de azufre (gas muy aislante) o en el vacío. En los interruptores automático de M.T. la maniobra de los contactos en aire se usa cada vez menos, utilizándose el vacío, exafluoruro de azufre, aceite y aire comprimido.
- 3) *Mecanismo de apertura y cierre de los contactos.* Dispositivo que permite la apertura o cierre de los contactos de forma manual o automática.
- 4) *Disparadores.* Dispositivo que unido al aparato de maniobra permite la apertura o el cierre de los contactos liberando el mecanismo de retención.

- Disparadores directos o primarios (fig. 5.1). Recorridos por la intensidad de corriente principal. Cuando la intensidad de corriente en el circuito sobrepasa un valor determinado el disparador actúa.

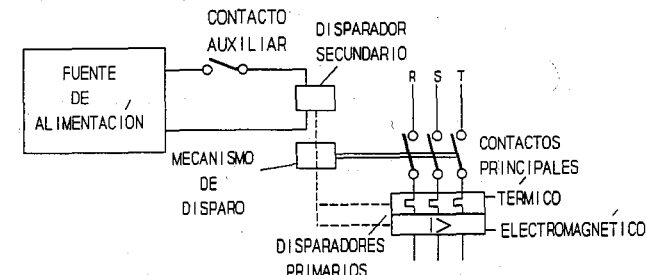


Fig. 5.1

- Disparador electrotérmico: está constituido esencialmente por una lámina bimetálica. Cuando la intensidad toma un valor elevado, la lámina bimetálica se calienta deformándose y haciendo actuar el mecanismo. Protege contra sobrecargas.
- Disparador electromagnético: está constituido esencialmente por un electroimán. Cuando la intensidad toma un valor muy elevado, la fuerza del electroimán aumenta y hace actuar el mecanismo. Protege contra intensidades de cortocircuito. Cuando la intensidad de actuación de los disparadores es ajustable se le llama intensidad de regulación.
- Disparadores indirectos o secundarios. Están conectados en un circuito auxiliar o de mando.

- Disparador de emisión de corriente. Actúan cuando pasa corriente por su bobina.
- Disparador de mínima tensión. Actúan cuando la tensión que alimenta su bobina baja de un determinado valor.

Los disparadores indirectos actúan sobre el interruptor automático por la acción de pulsadores o relés (aparato que al variar una magnitud física actúa sobre otros dispositivos) permitiendo el mando a distancia.

■ Funcionamiento

El interruptor automático se utiliza para maniobra y protección. Por su elevado poder de corte puede desconectar automáticamente corrientes de sobrecarga o cortocircuito antes de que se produzcan efectos perjudiciales.

■ Características

Las características del interruptor, además de sus valores nominales, expresan sus características constructivas: número de polos, disparadores, clase de corriente, etc. Las curvas características más utilizadas son:

- Curva de disparo (fig. 5.2). Indica los tiempos de actuación de los disparadores directos en función de la intensidad de corriente $I(t)$. En la práctica la curva es doble, indicando unos márgenes de actuación. Si los disparadores son ajustables para distintas posibilidades de regulación, la curva indica el cambio de características.
- Curva de la energía disipada (fig. 5.3) en función de la intensidad de corriente de cortocircuito.

Un interruptor es limitador si la corriente de cortocircuito se extingue durante la primera semionda de corriente, limitando así la energía disipada.

5.5. INTERRUPTOR MAGNETOTÉRMICO

Es el pequeño interruptor automático (PIA), utilizado en B.T.

■ Constitución

Son aparatos modulares con distinto número de polos: unipolares, bipolares, tripolares y tetrapolares. Tienen incorporados un disparador térmico y otro magnético, actuando sobre un dispositivo de corte la lámina bimetálica y el electroimán. Normalmente no admiten disparadores indirectos. Se fabrican con diversos sistemas de montaje, para colocación en cuadro, para montaje saliente, etc., y los sistemas de conexión más usados son por tornillo y conexión enchufable.

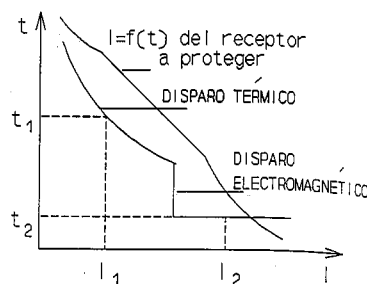


Fig. 5.2

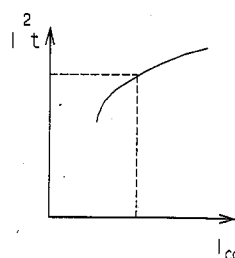


Fig. 5.3

■ Funcionamiento.

La maniobra se realiza con corte al aire. Para sobreintensidades pequeñas y prolongadas actúa la protección térmica y para sobreintensidades elevadas actúa la protección magnética.

■ Características

La intensidad asignada es de 6 a 125 A, la tensión hasta 400 V en corriente continua o alterna, frecuencia 50 o 60 Hz y poder de corte de 1,5 a 25 kA.

Las curvas características de disparo (fig. 5.4), están normalizadas según la norma UNE EN 60898.

La intensidad de disparo que provoca la actuación del disparador térmico es de 1,45 veces la intensidad nominal en un tiempo menor de 1 hora.

El disparo electromagnético tiene unos márgenes de actuación según el tipo de curva (tabla 5.3).

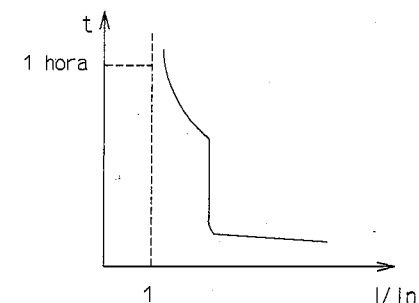


Fig. 5.4

Tabla 5.3

TIPO DE CURVA	MARGEN INFERIOR ($t > 0,1$ s)	MARGEN SUPERIOR ($t < 0,1$ s)
B (Para líneas largas).	$3I_n$	$5I_n$
C (Para líneas en general).	$5I_n$	$10I_n$
D (Para intensidad de arranque elevada).	$10I_n$	$20I_n$

Se utilizan magnetotérmicos con curva ICP-M, para interruptores de control de la potencia contratada en instalaciones de B.T. Para la protección de líneas que alimentan equipos a semiconductores se utilizan magnetotérmicos de curva tipo A.

Calibres de los pequeños interruptores automáticos (PIA):

- Tensiones nominales: 220, 380 V o 230, 400 V
- Intensidades nominales: 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63 A

Calibres de los interruptores automáticos de potencia:

- Tensiones nominales: 220, 380, 500, 660 V
- Intensidades nominales: ...40, 63, 80, 100, 125, 160, 250 A..

5.6. SECCIONADOR

Es un aparato mecánico de conexión, que por razones de seguridad, en posición abierta asegura una distancia de seccionamiento que satisface unas condiciones especificadas. Solamente debe utilizarse para abrir o cerrar un circuito cuando no circula corriente.

■ Constitución

Los seccionadores utilizados en M.T. son de dos tipos: de cuchillas giratorias (fig. 5.5) o de cuchillas deslizantes.

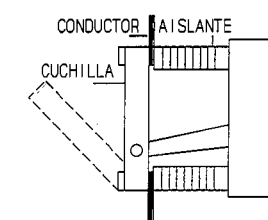


Fig. 5.5

En M.T. se utiliza el seccionador bajo carga o interruptor seccionador (fig. 5.6). Es un interruptor que en posición abierta satisface las condiciones de aislamiento de un seccionador, pudiendo maniobrar con la intensidad nominal de servicio.

■ Funcionamiento

Su función es hacer visible, por seguridad, la apertura de los circuitos. El accionamiento puede ser con pértiga, y en instalaciones con mando a distancia por motor o por aire comprimido.

Se utilizan también seccionadores de puesta a tierra de las líneas como medida de protección, cuando están desconectadas.

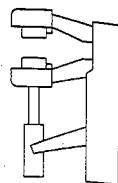


Fig. 5.6

■ Características

El seccionador se caracteriza por no tener ni poder de corte ni poder de cierre.

El seccionador de puesta a tierra, por la posibilidad de presencia de tensión debido a cualquier fallo de la instalación, debe tener poder de cierre, porque al conectar a tierra pone la línea en cortocircuito.

5.7. FUSIBLE

El fusible o cortacircuito es el aparato de conexión que provoca la apertura del circuito en el que está instalado, por fusión, debido al calentamiento de uno o varios elementos destinados a este fin, cortando la corriente cuando ésta sobrepasa un determinado valor durante un tiempo.

■ Constitución

- Base portafusible. Es la parte fija que conecta con la instalación a través de unos bornes de conexión y contiene los soportes del cartucho fusible.
- Cartucho fusible. Formado por los contactos, cartucho aislante (porcelana o vidrio) con material extintor (excepto los de calibre muy pequeño) y elemento fusible. Algunos tipos de cartuchos tienen un indicador de fusión, consistente en un percutor de señalización que sale al exterior cuando el fusible funde.

El conductor fusible es un hilo metálico redondo o una cinta de sección rectangular, que funde rápidamente por sobreintensidad. El material utilizado habitualmente es cobre o plata.

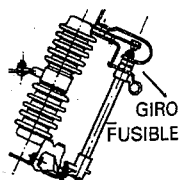


Fig. 5.7

■ Funcionamiento

Cuando circula corriente por el elemento fusible, este se calienta por efecto Joule, elevando su temperatura. Si la corriente es muy elevada, la temperatura puede alcanzar el punto de fusión del elemento conductor, que comienza a fundirse. El material extintor que rodea el elemento fusible condensa los vapores metálicos producidos en la fusión, facilitando la extinción del arco que se forma.

En líneas aéreas de M.T. se utiliza también el fusible de expulsión seccionador (fig. 5.7). El elemento fusible está unido a una trencilla de conexión de cobre. En

el momento de producirse la fusión se produce la expulsión de la trencilla y la base portafusible se desconecta de la conexión superior, girando y dejando un corte visible.

■ Características

Los fusibles tienen un alto poder de corte, que suele ser mayor de 100 kA, su tensión asignada debe coincidir con la de la base portafusible, y su corriente asignada es muy variable según su utilización.

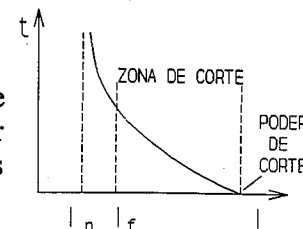


Fig. 5.8

Las curvas características más utilizadas son las curvas tiempo-corriente, que dan el tiempo de prearco o de funcionamiento en función del valor eficaz de la corriente (fig. 5.8). La intensidad convencional de fusión (I_f) es el valor eficaz de intensidad que provoca la fusión en un tiempo determinado. Para el fusible de B.T. tipo gG la intensidad convencional de fusión es 1,6 veces la intensidad nominal del fusible $I_f = 1,6 I_n$.

Los fusibles limitadores o de alto poder de ruptura (A.P.R.) funden antes de que la corriente alcance el valor de pico (en un tiempo inferior a 10 ms). Utilizan como elemento de fusión varios hilos de plata en paralelo.

5.8. FUSIBLES DE B.T.

Los fusibles de B.T. se designan con dos letras, según la zona de corte.

Primera letra:

- g: De uso general, capaz de cortar todas las intensidades de corriente desde su valor convencional de fusión $1,6 I_n$ a su poder de corte.
- a: De acompañamiento, capaz de cortar las intensidades de corriente desde 3 a $4 I_n$ hasta su poder de corte.

Segunda letra:

- G: De uso general. Cables y conductores eléctricos.
- M: Protección de aparatos de maniobra y mando de motores.
- R: Protección de circuitos con semiconductores.
- B: Minería.

• Características de las bases portafusibles:

Tensiones nominales: 220, 380, 500, 600 V.

Intensidades nominales: 16, 20, 32, 40, 63, 80, 100, 160, 250, 400, 630, 800, 1 000 A.

• Características de los fusibles:

Tensiones nominales: 220, 380, 500, 600 V.

Intensidades nominales: 2, 4, 6, 10, 12, 16, 20, 25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1 000 A.

Poder mínimo de corte nominal

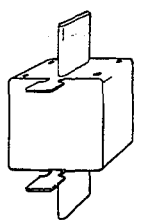
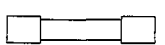
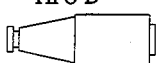
Fusible tipo industrial (modelo de cuchillas o cilíndrico) 50 kA

Fusible tipo doméstico (modelo tipo D) 20 kA

• *Modelos y tamaños de cortacircuitos fusibles.*

Se indican en la tabla siguiente:

Tabla 5.4

MODELO	TAMAÑO	INTENSIDAD NOMINAL DE LAS BASES
 DE CUCHILLAS	00	100 A
	0	160 A
	1	250 A
	2	400 A
	3	630 A
	4	1 000 A
 CILÍNDRICOS	(diámetro en mm x longitud en mm)	20 A
	10x38	
	14x51	50 A
	22x58	100 A
 TIPO D	D01	16 A
	D02	63 A
	D03	100 A

5.9. CONTACTOR

Aparato de conexión con una sola posición de reposo (habitualmente con contactos principales normalmente abiertos). Accionado a distancia y capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales del circuito, incluidas las sobrecargas en servicio.

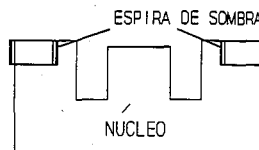


Fig. 5.9

■ Constitución de un contactor electromagnético

- Circuito de mando, formado por un electroimán con circuito magnético con una parte fija y otra móvil y bobina de excitación. Si el circuito de mando está alimentado por corriente alterna, el circuito magnético lleva una espira (fig. 5.9) en cortocircuito (espira de sombra) para evitar la vibración que se produce al pasar el flujo magnético alterno por su valor nulo. En la espira se induce una f.e.m. que da origen a una corriente inducida y crea un flujo desfasado con el del electroimán y, como consecuencia, nunca el flujo resultante es nulo.
- Contactos principales. Contactos que permiten el corte o restablecimiento de corriente en el circuito principal. Unos son fijos y otros móviles, sujetos mecánicamente al elemento móvil del electroimán. Deben tener gran resistencia mecánica para soportar muchas conexiones y desconexiones, y también alta conductividad, por lo que se recubren habitualmente de plata y níquel.
- Contactos auxiliares. Contactos que abren o cierran el circuito de mando, actuando sobre la bobina del contactor. Los contactos auxiliares normalmente

abiertos actúan igual que los contactos principales, cerrando el circuito auxiliar cuando se cierra el circuito principal. Los contactos auxiliares normalmente cerrados actúan a la inversa del circuito principal, abriendo el circuito auxiliar cuando el circuito principal se cierra.

Actualmente se utilizan autómatas programables para el mando de los contactores, por lo que se utilizan menos los contactos auxiliares.

El contactor puede llevar un disparador o "relé térmico" para la apertura del circuito.

Los contactores pueden ser de corriente continua o alterna, de B.T. o de M.T. La maniobra de los contactos principales se hace en al aire en B. T., y en vacío o en exafluoruro de azufre en M.T.

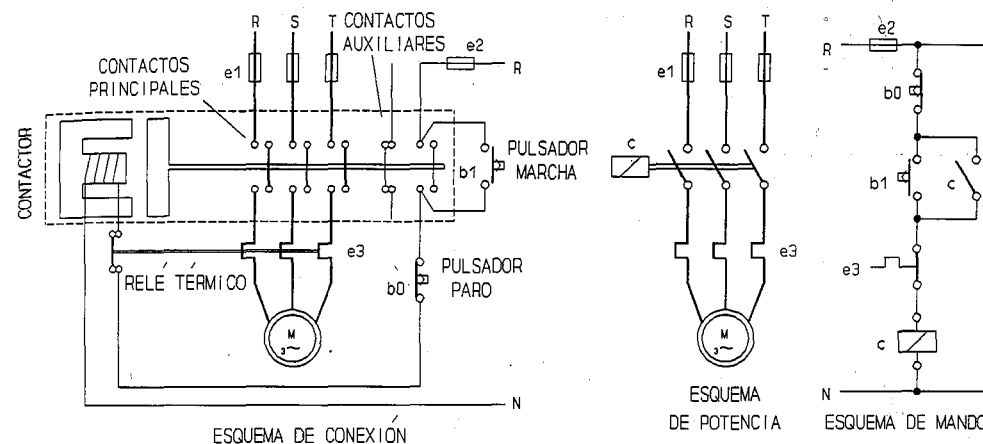


Fig. 5.10

■ Funcionamiento

Al conectar a una tensión la bobina del contactor, que está en estado de reposo (manteniendo los contactos principales abiertos por medio de unos muelles), se crea un flujo magnético que atrae la parte móvil del circuito magnético y, como consecuencia, cierra los contactos principales y auxiliares normalmente abiertos, mientras que abre los contactos auxiliares normalmente cerrados (fig. 5.10). Al desconectar la bobina los muelles hacen volver la parte móvil a la posición de reposo.

El contactor permite efectuar un gran número de maniobras, mediante mando eléctrico a distancia, por lo que se utiliza en instalaciones de automatización, especialmente para el mando de motores.

■ Características

Las principales características que definen un contactor son: número de contactos principales y auxiliares, naturaleza de la corriente del circuito principal y del auxiliar, medio de corte, tensión de empleo, tensión de aislamiento, intensidad de

empleo, intensidad térmica convencional (máxima intensidad de corriente que un contactor puede soportar en servicio de 8 horas), poder de cierre y de corte.

Para la elección del contactor hay que tener en cuenta la naturaleza del equipo que va a conectar (motor, cargas no inductivas, etc) y el tipo de servicio.

Los servicios asignados son:

- Servicio de 8 horas. El contactor permanece accionado un tiempo igual o inferior a 8 horas, con intensidad constante, alcanzando el equilibrio térmico con el ambiente.
- Servicio continuo o ininterrumpido. El contactor permanece accionado un tiempo superior a 8 horas.
- Servicio temporal. El contactor permanece accionado un tiempo pequeño, sin alcanzar el equilibrio térmico, para pasar durante un tiempo largo a la posición de reposo, adquiriendo el contactor la temperatura ambiente.
- Servicio intermitente. El contactor abre y cierra periódicamente en una sucesión de ciclos de maniobra sin que se alcance el equilibrio térmico. Según el número de maniobras por hora los contactores se clasifican en clases (tabla 5.5).

Tabla 5.5

CLASE	Nº DE MANIOBRAS POR HORA
0,03	3
0,1	12
0,3	30
1	120
3	300
10	1 200

Según la naturaleza de la carga se definen unas categorías de empleo o servicio. Para corriente alterna se indican en la tabla 5.6.

Tabla 5.6

CATEGORÍA	APLICACIONES CARACTERÍSTICAS
AC-1	Cargas no inductivas o débilmente inductivas
AC-2	Motores de anillos, arranque, inversión de marcha
AC-3	Motores de rotor en cortocircuito. arranque, desconexión a motor lanzado.
AC-4	Motores de rotor en cortocircuito: arranque, marcha a impulsos, inversión de marcha.
Por inversión de marcha se entiende la parada o la inversión rápida del sentido de rotación del motor permutando las conexiones de alimentación mientras el motor está girando. Por marcha a impulsos se entiende el uno o varios cierres breves y frecuentes del circuito del motor, para conseguir pequeños desplazamientos del mecanismo accionado.	

En el contactor se definen unos parámetros de desgaste.

- Endurancia eléctrica. Número de ciclos de maniobras en carga que soporta el contactor en las condiciones dadas por las normas.
- Endurancia mecánica. Número de maniobras que soporta el contactor en vacío.

5.10. PROTECCIÓN DE LAS INSTALACIONES CONTRA SOBRECARGAS

Se produce una sobrecarga en un circuito eléctrico cuando la intensidad que circula es superior a la admisible o nominal (sobrecorriente), sin que haya defecto de aislamiento.

■ Causas de las sobrecargas

Son principalmente:

- Fenómenos transitorios debidos al funcionamiento de algunos receptores.
- Sobreutilización de los receptores, que están sobrecargados, suministrando más potencia de la nominal.
- Sobreutilización de la instalación, que tiene conectada receptores con más potencia de la prevista.

■ Efecto de las sobrecargas

La sobrecarga produce en los conductores elevación de la temperatura, que puede ser superior a la admisible, ello implica el deterioro de los aislantes y la disminución del tiempo de utilidad de los cables.

■ Protección frente a sobrecargas

Los aparatos utilizados en B.T. para protección contra sobrecargas son: interruptor automático, interruptor magnetotérmico, fusibles y contactor combinado con relé térmico.

El aparato de protección debe desconectar antes de que se alcance la máxima temperatura admisible. Según la norma UNE 20 460, el aparato protege contra sobrecargas a un conductor si se verifican las siguientes condiciones:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \quad I_2 \leq 1,45 I_Z$$

I_B : Intensidad de empleo o utilización.

I_n : Intensidad nominal del aparato o intensidad de ajuste en los aparatos que tengan esta posibilidad.

I_Z : Intensidad máxima admisible en el conductor.

I_2 : Intensidad convencional de funcionamiento del aparato de protección (intensidad convencional de fusión en los fusibles e intensidad convencional de disparo en interruptores automáticos).

En la protección por interruptor magnetotérmico normalizado se cumple siempre la segunda condición porque $I_2 = 1,45 I_n$, por lo que se debe verificar solamente la primera condición.

En la protección por fusible tipo gG, se cumple que $I_2 = 1,6 I_n$, por lo que deben verificarse las dos condiciones.

Los dispositivos de protección contra sobrecargas se instalan en el origen de los circuitos y en los puntos donde se produzca una reducción de la intensidad admisible. Si la línea está protegida en el origen contra cortocircuitos la protección contra sobrecargas puede situarse en cualquier punto. Se recomienda no utilizar protección contra sobrecargas en circuitos que al desconectarse de forma imprevista

pueden originar peligro, como excitación de máquinas rotativas, electroimanes de elevación de material, etc.

Cuando en una distribución trifásica el conductor neutro sea de sección menor que los de fase, debe estar también protegido contra sobrecargas. La actuación del dispositivo de protección no tiene necesariamente que provocar el corte del neutro, sino de los conductores de fase.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

5.10-1 Una línea de alimentación a un cuadro de fuerza está formada por 4 conductores unipolares de cobre, de sección 6 mm^2 , aislados con PVC, 750 V, canalización bajo tubo a 40°C . Calcular:

- Intensidad admisible por los conductores.
- Calibre del magnetotérmico necesario para proteger la línea contra sobrecargas si la intensidad que circula por los conductores de fase es $21 \text{ A} = I_n$.
- Si es correcta la protección de la línea con fusible tipo gG de 25 A.
 - De acuerdo con el R.B.T. y la tabla 2.12, para la sección 6 mm^2 la intensidad admitida a 40°C es de $26 \text{ A} = I_z$.
 - El calibre del interruptor magnetotérmico es de $25 \text{ A} = I_n$, que cumple la condición $21 \text{ A} \leq 25 \text{ A} \leq 26 \text{ A}$.
 - El fusible gG de 25 A cumple la primera condición $21 \text{ A} \leq 25 \text{ A} \leq 26 \text{ A}$. En este fusible la intensidad convencional de funcionamiento $I_2 = 1,6 \cdot I_n = 1,6 \cdot 25 = 40 \text{ A}$. La segunda condición indica que el valor máximo de la intensidad de funcionamiento de la protección $I_2 = 1,45 \cdot I_z = 1,45 \cdot 26 = 37,7 \text{ A} < 40 \text{ A}$. El fusible de 25 A no es válido para la protección de la línea.

5.10-2 Una línea de dos conductores unipolares de cobre, de sección 10 mm^2 , aislados con PVC, 750 V, en canalización bajo tubo, conduce una corriente de intensidad 31 A. Esta línea se deriva de una línea de mayor sección, protegida por un interruptor magnetotérmico de 50 A. Calcular:

- Si la derivación está protegida por el interruptor magnetotérmico.
 - Calibre del fusible necesario para la protección.
- Solución: a) No, por ser el calibre superior a la intensidad permitida por el conductor, 40 A; b) 32 A.

5.10-3 Un cable tetrapolar de cobre, aislado con XLPE, 0,6/1 kV, de sección 16 mm^2 , en instalación trifásica al aire, se utiliza para alimentar a 380 V, 50 Hz, una potencia de 30 kW, con factor de potencia 0,86. Calcular:

- Intensidad que circulará por el cable.
 - Calibre del interruptor automático para proteger el cable contra sobrecargas.
- Solución: a) 53 A; b) 63 A

5.10-4 Un interruptor automático de intensidad nominal 125 A y relé térmico regulable contra sobrecargas entre 94 y 125 A, se utiliza para la protección contra sobrecargas de una línea, formada por cable tetrapolar de cobre aislado con PVC a 1000 V en

instalación enterrada bajo tubo. La sección del conductor es de 35 mm^2 . La instalación consume una potencia de 55 kW a 380 V, 50 Hz, con factor de potencia 0,9. Calcular:

- Intensidad permitida por el conductor según la instrucción MIE BT 007.
- Caída de tensión en la línea de longitud 50 m.
- Intensidad que circula por la línea.
- Entre qué valores se puede regular el relé térmico.

Solución: a) 120 A; b) 3,7 V; c) 92,85 A; d) 94 a 120 A.

5.11. PROTECCIÓN DE LAS INSTALACIONES CONTRA CORTOCIRCUITOS

El cortocircuito es una conexión de poca impedancia entre dos puntos entre los que existe una diferencia de potencial, dando lugar a una corriente de intensidad muy elevada.

■ Causas de los cortocircuitos

Son principalmente fallos de aislamiento de la instalación o fallos en los receptores conectados, por avería o conexión incorrecta.

■ Efectos de los cortocircuitos

- Efectos térmicos: La corriente muy elevada produce calentamiento de los conductores por efecto Joule. En el cortocircuito, por su pequeña duración, el calor producido se utiliza exclusivamente en elevar la temperatura del conductor (que alcanza su temperatura máxima admisible en milisegundos) sin ceder calor al exterior, provocando la destrucción del conductor.
- Efectos electrodinámicos: Las fuerzas de atracción o de repulsión que aparecen entre conductores por efecto del campo magnético creado a su alrededor por la corriente que los recorre, son directamente proporcionales al producto de esas corrientes e inversamente proporcionales a la distancia entre los conductores. Las corrientes de cortocircuito, de valor muy elevado hacen que estas fuerzas electrodinámicas sean también elevadas, pudiendo destruir las barras de conexión.

■ Protección contra cortocircuitos

Se utilizan principalmente interruptores automáticos y fusibles, pudiendo utilizarse también la combinación de fusible-interruptor automático, y fusible-contacto-relé térmico.

La condición de protección es que el dispositivo de protección actúe, cortando la corriente de cortocircuito, antes de que la instalación resulte dañada por efecto térmico o electrodinámico.

En la *protección con interruptor automático*, los criterios de protección son:

- Poder de corte del interruptor mayor que la máxima intensidad de cortocircuito (cortocircuito al principio de la línea). $PdC > I_{ccmáx}$
- Intensidad de cortocircuito mínima (cortocircuito al final de la línea) mayor que la intensidad de regulación del disparador electromagnético. $I_{ccmín} > I_a$

- El interruptor debe cortar la corriente de cortocircuito en un tiempo inferior a aquel que hace tomar al conductor una temperatura superior a su temperatura límite. Así en el cortocircuito el conductor no llegará a la temperatura máxima admisible. La intensidad de cortocircuito máxima debe ser menor que la intensidad que corresponde a la energía disipada admisible en el conductor $I_{ccm\acute{a}x} < I_b$.

La energía disipada admisible en el conductor $(I^2t)_{adm}$, puede calcularse en función de una constante K y de la sección s del conductor en mm². $(I^2t)_{adm} = K^2 s^2$.

La constante K depende del material conductor y del aislante. Los valores utilizados se indican en la tabla 2.16.

Calculada la energía disipada admisible en el conductor, llevando este valor a la curva característica de la energía disipada por el interruptor en cortocircuito (fig. 5.11) se obtiene el valor de la intensidad I_b .

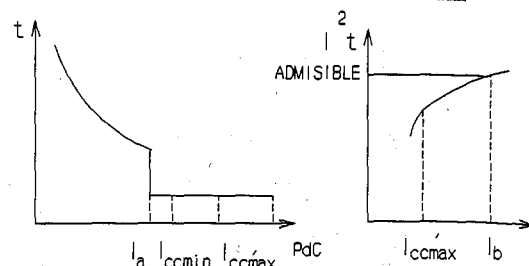


Fig. 5.11

En la *protección con fusible*, los criterios de protección son:

- Poder de corte del fusible mayor que la máxima intensidad de cortocircuito (cortocircuito al principio de la línea). $PdC > I_{ccm\acute{a}x}$.
- Intensidad de cortocircuito mínima (cortocircuito al final de la línea) mayor que la intensidad mínima a la que el fusible protege al conductor. $I_{ccm\acute{i}n} > I_a$.

Los fusibles, por su rapidez de actuación, limitan mucho la energía disipada en cortocircuito. Deben escogerse de calibre ligeramente superior a la intensidad de utilización de la línea I_b .

La *protección mediante fusible-interruptor automático en serie*, se escoge en ocasiones por razones de economía. El fusible protege frente a cortocircuitos de gran intensidad, y el interruptor protege contra sobrecargas y cortocircuitos con intensidad de valor moderado.

La *protección mediante la combinación de fusible-contactor y relé térmico*, se utiliza en la protección de motores. El fusible protege contra cortocircuitos y el contactor con el relé térmico protegen contra sobrecargas. El fusible debe resistir sin fundirse la corriente de arranque del motor.

Los dispositivos de protección se sitúan en el origen de la instalación y en los puntos donde se produzca una reducción de la corriente admisible. Los dispositivos protegen la parte de la instalación situada a continuación de ellos siguiendo el sentido de la alimentación (aguas abajo).

5.12. CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO

En una línea trifásica el cortocircuito puede ser de los tipos:

- Cortocircuito trifásico, entre las tres fases.
- Cortocircuito entre dos fases.
- Cortocircuito entre fases y tierra.

El cortocircuito trifásico simétrico entre las tres fases es el que se utiliza para el cálculo, considerando el circuito equivalente de una fase.

El valor eficaz de la intensidad de cortocircuito simétrica I_{cc} es el cociente entre la tensión de fase de la red y la impedancia Z_{cc} del circuito de defecto.

$$I_{cc} = \frac{V_L}{\sqrt{3} Z_{cc}}$$

V_L : Tensión de línea.

El valor de la intensidad de pico o de choque I_s de la corriente inicial de cortocircuito es variable. Se puede calcular por un coeficiente de choque x , que depende de la relación entre la resistencia y reactancia de cortocircuito.

$$I_s = x\sqrt{2} I_{cc}$$

Considerando el valor 1,8 como más desfavorable $I_s = 1,8\sqrt{2} I_{cc} = 2,55 I_{cc}$.

■ Cálculo de la intensidad de cortocircuito en la red de distribución de M.T.

La Empresa suministradora de energía indica la potencia de cortocircuito S_{cc} en el punto de conexión de la acometida en M.T. con la red de distribución. Esta potencia sirve de base para el cálculo de la intensidad de cortocircuito I_{cc} , como se indicó en el párrafo 2.15. Siendo V_L la tensión de línea de la red.

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} V_L}$$

La impedancia por fase de la red de distribución se puede calcular en función de la potencia de cortocircuito.

$$Z_f = \frac{V_L/\sqrt{3}}{I_{cc}} = \frac{V_L \cdot V_L}{\sqrt{3} \cdot I_{cc} \cdot V_L} = \frac{V_L^2}{S_{cc}}$$

La intensidad de cortocircuito en un punto de la línea de acometida de M.T. se calcula sumando la impedancia de la acometida a la de la línea de distribución.

■ Cálculo de la intensidad de cortocircuito en B.T.

Se considera como caso más desfavorable que la impedancia de la línea de distribución es la del transformador de alimentación a la línea de B.T., de manera que el transformador mantendría la tensión de alimentación en cualquier condición de carga.

La intensidad de cortocircuito en un punto de la red de B.T. se calcula sumando a la impedancia del transformador la impedancia de la red hasta el punto de defecto.

La impedancia de los conductores que forman la instalación viene dada por los fabricantes de los cables en función del tipo de cable y de su longitud.

5.13. ELECCIÓN DE UN INTERRUPTOR AUTOMÁTICO

Tal como se indicó en la protección general contra sobrecargas y cortocircuitos, en la elección del interruptor automático se siguen los siguientes criterios:

a) *Protección contra sobrecargas.* Eligiendo las relaciones:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \quad I_2 \leq 1,45 I_Z$$

b) *Protección contra cortocircuitos.* Eligiendo las relaciones:

$$PdC > I_{ccm\acute{a}x} \quad I_{ccm\acute{i}n} > I_a$$

La condición de que el interruptor debe cortar la corriente de cortocircuito en un tiempo muy pequeño, para que en el cortocircuito, el conductor no llegue a su temperatura máxima admisible, se cumple con los aparatos existentes, especialmente con el interruptor automático limitador.

Para la protección contra cortocircuitos los interruptores se colocan al principio de la instalación a proteger y en los puntos donde se produzca una reducción de la corriente admisible.

Para el interruptor automático de cabecera, en el secundario del transformador de distribución (en transformadores de 1000 kVA o de menor potencia), es suficiente un poder de corte de 35 kA.

El interruptor automático secundario, colocado en serie con el interruptor de cabecera a través de la línea de enlace, debe tener un poder de corte mínimo de 10 kA (fig. 5.12).

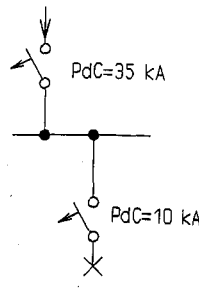


Fig. 5.12

5.14. SELECTIVIDAD EN LAS PROTECCIONES CONTRA SOBREINTENSIDADES

Existe selectividad entre dos dispositivos de protección contra sobreintensidades conectados en serie, si al producirse un defecto, desconecta el dispositivo situado más cerca del lugar donde se produjo, no afectando a la protección situada en el escalón superior (aguas arriba).

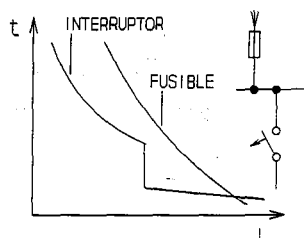


Fig. 5.13

■ **Selectividad entre fusible situado en el escalón superior (aguas arriba) y el interruptor automático en el escalón inferior (aguas abajo)**

1) *En sobrecarga:* hay selectividad si la corriente de actuación del fusible es superior a la intensidad de regulación del disparador electromagnético (I_2) del interruptor automático (fig. 5.13).

2) *En cortocircuito:* hay selectividad si la intensidad de cortocircuito es inferior a la corriente de fusión del fusible (en un tiempo de unos 0,01 s).

■ **Selectividad entre interruptor automático situado en el escalón superior y el situado en el escalón inferior**

1) *En sobrecarga:* hay selectividad cuando el calibre del interruptor "aguas arriba" es superior al del interruptor situado en el escalón inferior o "aguas abajo" (si son del mismo tipo de curva de disparo).

2) *En cortocircuito:* hay selectividad si la intensidad de cortocircuito es inferior a la intensidad de regulación del disparador electromagnético (I_{a1}) del interruptor automático situado en el escalón de protección superior o "aguas arriba" (fig. 5.14).

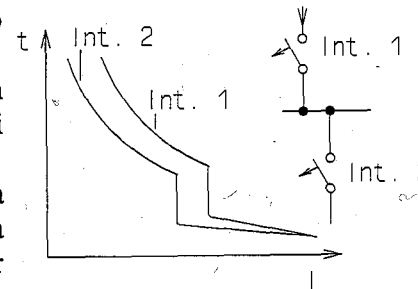


Fig. 5.14

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

5.14-1 En un punto de entronque con la red de M.T. de 20 kV, la potencia de cortocircuito, según la empresa suministradora de energía es de 500 MVA. Calcular:

- Intensidad de cortocircuito en el punto de conexión.
- Reactancia de la línea de alimentación hasta el punto de conexión, considerando la resistencia despreciable.
- Intensidad de cortocircuito a 200 m del punto de entronque, si la línea de acometida en M.T. está formada por un cable tripolar de aluminio y tiene una resistencia máxima de 0,324 Ω /km y una reactancia de 0,109 Ω /km.

a) La intensidad de cortocircuito $I_{cc1} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} V_L} = \frac{500 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20\,000} = 14\,434 \text{ A}$

b) La impedancia de la línea de distribución $Z_1 = \frac{V_L^2}{S_{cc}} = \frac{20\,000^2}{500 \cdot 10^6} = 0,8 \Omega = X_1$

c) La resistencia de la línea de acometida en M.T. $R_2 = 0,324 \cdot 0,2 = 0,0648 \Omega$

La reactancia $X_2 = 0,109 \cdot 0,2 = 0,0218 \Omega$

La resistencia total de cortocircuito $R_{cc} = R_2 = 0,0648 \Omega$

La reactancia total de cortocircuito $X_{cc} = X_1 + X_2 = 0,8218 \Omega$

La intensidad de cortocircuito:

$$I_{cc} = \frac{\frac{20\,000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}} = \frac{20\,000}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,0648^2 + 0,8218^2}} = 14\,007 \text{ A}$$

5.14-2 Calcular la intensidad de cortocircuito de pico o de choque en un punto de entronque de una acometida en M.T. a 20 kV, si la potencia de cortocircuito en ese punto es de 400 MVA.

Solución: 29,4 kA.

5.14-3 Un transformador que alimenta a 380/220 V una línea de B.T. tiene de resistencia de cortocircuito 0,003 Ω y de reactancia de cortocircuito 0,007 Ω . Calcular:

- Intensidad de cortocircuito de choque en los bornes del secundario del transformador.
- Intensidad de cortocircuito en un punto de la línea de B.T. con una longitud de 40 m desde los bornes del secundario del transformador con cable tripolar de cobre, de resistencia 0,345 Ω /km y reactancia 0,119 Ω /km.

a) La intensidad de cortocircuito en bornes del secundario:

$$I_{cc1} = \frac{\frac{V_L}{\sqrt{3}}}{Z_{cc1}} = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{\sqrt{R_{cc1}^2 + X_{cc1}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,003^2 + 0,007^2}} = 28\,887 \text{ A}$$

La intensidad de choque $I_s = 2,55 I_{cc1} = 2,55 \cdot 28\,887 = 73,66 \text{ kA}$

b) La resistencia de la línea de B.T. $R_2 = 0,345 \cdot 0,04 = 0,0138 \Omega$

La reactancia $X_2 = 0,119 \cdot 0,04 = 0,00476 \Omega$

La resistencia total de cortocircuito $R_{cc} = R_1 + R_2 = 0,0168 \Omega$

La reactancia total de cortocircuito $X_{cc} = X_1 + X_2 = 0,01176 \Omega$

La intensidad de cortocircuito:

$$I_{cc2} = \frac{220}{\sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,0168^2 + 0,01176^2}} = 10\,728 \text{ A}$$

5.14-4 Calcular la intensidad de cortocircuito de choque en los bornes secundarios de un transformador 20/0,4 kV, si la resistencia de cortocircuito es de 0,0017 Ω y reactancia 0,0094 Ω .

Solución: 61,6 kA.

5.14-5 Una línea de longitud 150 m está formada por un cable tetrapolar de cobre 3x50+1x25 aislado con XLPE, 0,6/1 kV, en instalación bajo tubo. La línea alimenta a 220/380 V, 50 Hz, una carga de 40 kW con factor de potencia 0,9. La reactancia de la línea de alimentación (aguas arriba) es de 0,024 Ω y resistencia despreciable. La resistencia del cable es de 0,502 Ω /km y la reactancia 0,078 Ω /km. Calcular:

- Intensidad de cortocircuito al principio de la línea.
- Intensidad de cortocircuito al final de la línea.
- Intensidad máxima admisible en el conductor según la instrucción MIE BT 004.
- Intensidad que circula por la línea.
- Características del interruptor automático de protección de la línea.

a) La intensidad de cortocircuito:

$$I_{cc1} = \frac{220}{\sqrt{R_{cc2}^2 + X_{cc2}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0^2 + 0,024^2}} = \frac{220}{0,024} = 9\,167 \text{ A}$$

b) La resistencia de la línea $R_2 = 0,502 \cdot 0,15 = 0,0753 \Omega$

La reactancia $X_2 = 0,078 \cdot 0,15 = 0,0117 \Omega$

La resistencia total de cortocircuito $R_{cc} = R_2 = 0,0753 \Omega$

La reactancia total de cortocircuito $X_{cc} = X_1 + X_2 = 0,0357 \Omega$

La intensidad de cortocircuito:

$$I_{cc2} = \frac{220}{\sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,0753^2 + 0,0357^2}} = 2\,640 \text{ A}$$

c) Según la tabla 2.3 la intensidad admisible es de $165 \cdot 0,8 = 132 \text{ A}$

d) La intensidad que circula $I_L = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos \varphi} = \frac{40\,000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9} = 67,5 \text{ A}$

e) El interruptor debe cumplir las condiciones:

Para protección de sobrecargas $67,5 \leq I_n \leq 132 \text{ A}$

El poder de corte del interruptor $PdC > 9\,167 \text{ A}$.

La intensidad de actuación magnética $I_a < 2\,640 \text{ A}$

Se puede escoger un interruptor automático limitador de intensidad nominal 100 A, tensión nominal 400 V, 4 polos, poder de corte 50 kA, umbral de regulación por disparo térmico de 0,8-1 I_n , umbral de disparo magnético fijo para intensidad menor o igual a 12 I_n .

Si el interruptor no es del tipo limitador habrá que comprobar la protección del conductor para que durante el cortocircuito no llegue a la temperatura máxima admisible. Si la constante del conductor para el cortocircuito $K = 143$.

$$(I^2 t)_{adm} = K^2 \cdot S^2 = 143^2 \cdot 50^2 = 51,12 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$$

Sobre la curva de energía térmica del interruptor habrá que verificar que la intensidad I_b , a la que corresponde esa energía es mayor que la de cortocircuito al principio de línea $I_b > 9\,167 \text{ A}$

5.14-6 La instalación de una nave industrial está alimentada desde un centro de transformación a 220/380 V, 50 Hz. El transformador tiene una resistencia de cortocircuito de 0,005 Ω y una reactancia de 0,015 Ω . La línea de alimentación desde el secundario del transformador que alimenta el cuadro de B.T., trifásica, de sección 120 mm² y longitud 40 m, con conductores unipolares de aluminio aislados con XLPE, 0,6/1 kV, en instalación bajo tubo, tiene una resistencia de 0,324 Ω /km y reactancia 0,109 Ω /km. Calcular:

- Corriente de cortocircuito en los bornes del secundario del transformador.
- Corriente de cortocircuito al final de la línea de alimentación en B.T.
- Características del interruptor automático de protección contra sobrecargas y cortocircuitos en el secundario del transformador si el consumo total de la instalación es 80 kW con factor de potencia 0,9 inductivo.

- d) Característica del magnetotérmico necesario para proteger la línea que partiendo del cuadro de B.T. está formada por 4 conductores de cobre de 10 mm² de sección, aislados con PVC, 750 V, en canalización bajo tubo. Esta línea alimenta una carga de 6 kW con factor de potencia 0,86 inductivo.

Solución: a) 13,9 kA; b) 8,33 kA; c) $I_n = 160$ A, $PdC > 14$ kA, $I_a < 8,33$ kA;

d) Intensidad nominal entre 16 y 32 A, poder de corte mayor de 8,33 kA.

5.15. PUESTA A TIERRA

Se denomina "puesta a tierra" a la conexión metálica de uno o varios puntos de una instalación a uno o varios electrodos enterrados, con el fin de permitir el paso a tierra de corrientes de fallo o descargas atmosféricas, evitando además que existan tensiones peligrosas entre la instalación y superficies próximas del terreno.

5.16. PARTES DE UNA PUESTA A TIERRA

Para protección contra contactos indirectos, las masas metálicas de los aparatos receptores deben estar en contacto con tierra. La puesta a tierra se divide en varias partes (fig. 5.15):

- a) Toma de tierra, formada por:

- 1) Electrodo, que es una masa metálica en contacto con el terreno. Si está colocado para otros fines se llama natural y si está colocado exclusivamente para toma de tierra se llama artificial (picas, placas o cables enterrados).

- 2) Líneas de enlace con tierra (sección mínima para conductor de cobre 35 mm²).

- 3) Punto de puesta a tierra.

- b) Línea principal de tierra (sección mínima para conductor de cobre 16 mm²).

- c) Derivaciones de la línea principal de tierra (sección mínima para conductor de cobre 2,5 mm² bajo tubo y 4 mm² sin protección mecánica).

- d) Conductores de protección (secciones mínimas igual que las derivaciones de la línea).

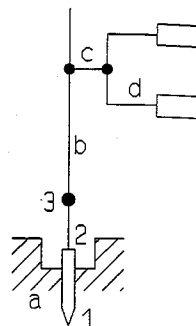


Fig. 5.15

5.17. TIPOS DE ELECTRODOS UTILIZADOS EN LAS PUESTAS A TIERRA

Conductores:

- Conductor horizontal.
- Conductor en anillo.
- Conductores radiales.

Picas:

- Pica sencilla. Suele ser de acero recubierta de cobre, diámetro 1,4 cm y longitud 200 cm.

- Picas empalmadas, mediante un manguito de acoplamiento, para conseguir mayor profundidad (fig. 5.16).

Placas. Placas cuadradas o rectangulares de cobre o acero galvanizado, enterradas verticalmente, de superficie mayor de 0,5 m² (fig. 5.17).

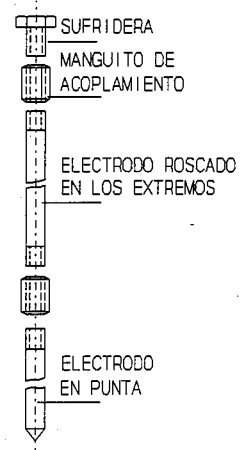


Fig. 5.16

5.18. CÁLCULO APROXIMADO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LOS ELECTRODOS

La resistencia de puesta a tierra puede calcularse de forma aproximada (MIE BT 039), según la resistividad del terreno y el electrodo.

■ Resistividad del terreno

De forma aproximada, para los cálculos de la resistencia de tierra se pueden utilizar los valores de resistividad de la tabla siguiente:

Tabla 5.7

NATURALEZA DEL TERRENO	VALOR MEDIO DE LA RESISTIVIDAD (Ω m)
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos.	50
Terrenos cultivables poco fértiles, terraplenes.	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeable.	3000

■ Resistencia de puesta a tierra de los electrodos

- *Conductores enterrados horizontalmente.* Según la resistividad del terreno ρ_t (Ω m), la longitud L (m) de la zanja ocupada por el conductor, la resistencia R (Ω) de la toma de tierra es:

$$R = \frac{2\rho_t}{L}$$

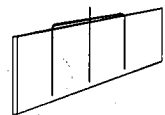


Fig. 5.17

- *Pica clavada verticalmente.* La resistencia R de la toma de tierra, se puede calcular aproximadamente, siendo L (m) la longitud de la pica enterrada es:

$$R = \frac{\rho_t}{L}$$

Cuando se colocan varias picas en paralelo, separadas una vez y media su longitud, la resistencia de la toma de tierra disminuye aproximadamente de forma que con dos picas la resistencia es la mitad de una sola, con tres picas un tercio de una sola, etc. El conductor de unión entre las picas hace también de electrodo.

- *Placa enterrada verticalmente.* La resistencia de la toma de tierra para una placa enterrada de perímetro P (m), se calcula aproximadamente por:

$$R = 0,8 \frac{\rho_t}{P}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

5.18-1 Calcular la resistencia de tierra aproximada de una pica de longitud 2 m, en un terreno orgánico, de resistividad 60 Ωm .

$$\text{La resistencia de tierra } R = \frac{\rho_t}{L} = \frac{60}{2} = 30 \Omega$$

5.18-2 Calcular la resistencia de tierra aproximada se obtiene en el terreno del problema anterior con tres picas de 2 m de longitud conectadas en paralelo.

$$\text{La resistencia de tierra } R = \frac{30}{3} = 10 \Omega$$

5.18-3 Calcular qué longitud aproximada tendrá un electrodo de cobre sin aislamiento, de 35 mm² de sección, enterrado en un terreno arenoso de resistividad 50 Ωm , para que la resistencia de tierra sea de 10 Ω .

Solución: 10 m

5.18-4 Calcular la resistencia de tierra de una placa de cobre de 1x0,8 m, enterrada verticalmente en un terreno de resistividad 20 Ωm .

solución: 4,4 Ω

5.19. SOLDADURA ALUMINOTÉRMICA

Los empalmes, derivaciones y conexiones de la red de tierras se unen por soldadura aluminotérmica. Esta soldadura, de alto punto de fusión y buena conductividad, consiste en la reducción del óxido de cobre mediante aluminio en polvo, consiguiéndose así que el cobre metálico se funda y forme el material de aportación. Para iniciar la reacción es necesario elevar la temperatura mediante un cartucho que contiene el material que produce la ignición.

a) *Equipo de soldadura aluminotérmica:*

- Molde de grafito, con forma de paralelepípedo (fig. 5.18), que mediante una tenaza o mango se abre por la mitad para introducir los extremos de los conductores a unir. En su interior está la cámara de soldadura (fig. 5.19), unida a la chimenea por donde bajará el cobre fundido y al crisol donde se produce la ignición.
- Cartucho cilíndrico de plástico que contiene el material de aportación (fundamentalmente óxido de cobre y aluminio en polvo) y de ignición.
- Disco de contención, de chapa metálica y forma circular que se coloca en el fondo del crisol, para evitar que toda la materia del cartucho caiga por la chimenea hacia la cámara de soldadura.
- Pistola de ignición, que mediante un chispazo sobre la materia del cartucho, inicia la reacción.

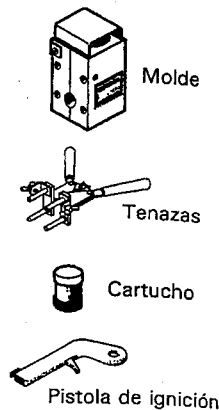


Fig. 5.18 Equipo de soldadura aluminotérmica. (Cortesía KLK).

b) *Realización de la soldadura:*

- Colocación de los extremos a unir en el molde, calentado previamente.
- Cerrar el mango, colocar el disco de contención y verter el contenido del cartucho en el crisol (fig. 5.19).
- Cerrar la tapa del molde e iniciar la reacción con la pistola de ignición.

Una vez realizada la soldadura se abre el molde y se limpia de escoria antes de la próxima conexión.

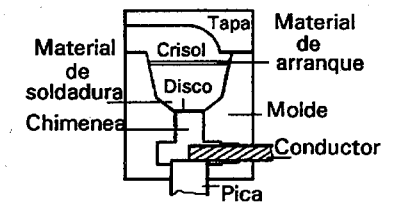


Fig. 5.19

5.20. Tensión de Paso Y Tensión de Contacto

■ Tensión de paso

Es la tensión que debido a la toma de tierra puede existir entre dos puntos del terreno distantes entre sí un paso (1 m) y quedar aplicada entre los pies de una persona. Esta tensión es menor cuanto mayor sea la profundidad de enterramiento del electrodo de puesta a tierra.

La tensión de paso se mide haciendo pasar una corriente de intensidad I_p entre la toma de tierra T (fig. 5.20) y una tierra auxiliar A, separadas más de 20 m. Los electrodos de prueba P (zapatos), se colocan distanciados 1 m y conectados a una resistencia $R_h = 1\,000 \Omega$ (resistencia aproximada del cuerpo humano). En bornes de esta resistencia se mide la tensión V.

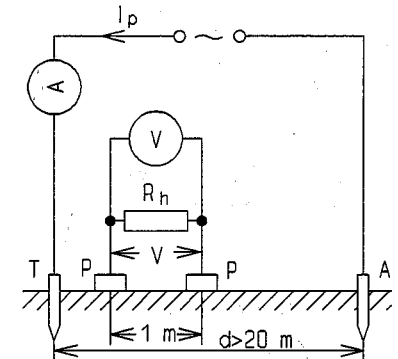


Fig. 5.20

La tensión de paso V_p , para una intensidad de defecto I_d se calcula: $V_p = V \frac{I_d}{I_p}$

Según el Reglamento sobre Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación, instrucción 13 (MIE RAT 13), la corriente de prueba debe ser como mínimo igual al 1 % de I_d , no inferior a 50 A para centrales y subestaciones y 5 A para centros de transformación. Los electrodos de prueba deben tener una superficie de contacto con el terreno de 200 cm² y ejercer sobre el suelo una fuerza de 250 N cada uno.

■ Tensión de contacto

Es la tensión a que puede estar sometida una persona al ponerse en contacto con estructuras metálicas de la instalación que normalmente están sin tensión.

Para la medida de la tensión de contacto se utilizan los mismos elementos que para la tensión de paso. Los electrodos de prueba separados unos 20 cm y conectados entre sí y a masa por medio de una resistencia de 1 000 Ω . Estos electro-

dos deben estar separados de la parte metálica 1 m (fig. 5.21).

La tensión de contacto V_c , para una intensidad de defecto I_d , con una intensidad de prueba I_p y tensión en bornes de la resistencia V , se calcula igual que para la tensión de paso

$$V_c = V \frac{I_d}{I_p}$$

5.21. MEDIDA DE UNA TOMA DE TIERRA

La resistencia de una toma de tierra se puede medir mediante el esquema de la figura 5.22. Se aplica una tensión alterna entre el electrodo de tierra P y una pica auxiliar B, midiendo la intensidad I que circula. Se mide a continuación la tensión V entre el electrodo de tierra y una pica sonda S colocada como mínimo a una distancia de 6 metros de los otros dos electrodos. El cociente entre la indicación del voltímetro y la del amperímetro nos da la resistencia de la toma de tierra.

$$R_T = \frac{V}{I}$$

Existen aparatos especiales, llamados telurómetros, para la medida de resistencia de las tomas de tierra. El más utilizado mide por comparación entre la intensidad que circula por la pica auxiliar y la intensidad que circula por la pica sonda. Está construido de tal modo que actuando sobre un reóstato hasta que el galvanómetro conectado a la pica sonda no indica el paso de corriente; la resistencia que indica el dial del reóstato es el valor de la resistencia de la toma de tierra. Actualmente se utilizan aparatos de medida digitales.

5.22. MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Se utiliza un telurómetro con cuatro picas clavadas en el terreno en línea recta, a una distancia a (m) entre sí (fig. 5.23). Maniobrando el dial del reóstato del aparato hasta que el galvanómetro del mismo indique valor nulo. Si en este caso la resistencia indicada en el dial es R (Ω), la resistividad del terreno (Ωm):

$$\rho = 2\pi a R$$

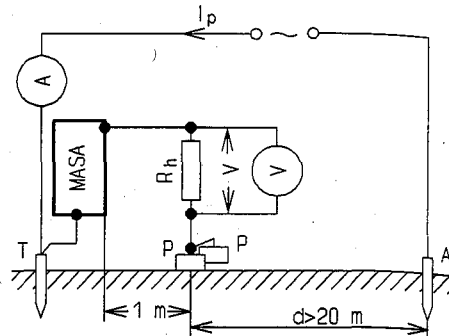


Fig. 5.21

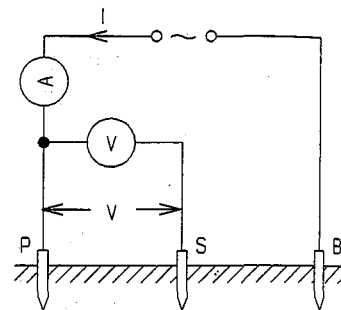


Fig. 5.22

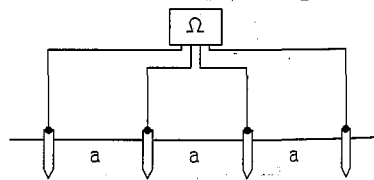


Fig. 5.23

5.23. PELIGROSIDAD DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA

■ Efectos fisiológicos

La circulación de la corriente por el cuerpo humano puede producir varios efectos:

- Agarrotamiento muscular. Contracción involuntaria de los músculos, al circular por ellos la corriente eléctrica.
- Alteraciones del ritmo cardíaco. Cuando la corriente circula a través del corazón.
- Fibrilación ventricular. Cuando la corriente excita las fibras de los ventrículos del corazón, produciendo un asincronismo completo. Es la causa mayor de muerte por accidente eléctrico.
- Quemaduras. Producidas en las partes del cuerpo en contacto con las piezas en tensión. Este efecto térmico es muy peligroso en media y alta tensión.

■ Límite de peligrosidad de la corriente eléctrica

Varios factores influyen en la peligrosidad de la corriente eléctrica:

- Valor eficaz de la corriente. Se considera peligrosa una corriente mayor de 10 mA.
- Frecuencia de la corriente. La corriente mas peligrosa es la de frecuencias comprendidas entre 10 y 100 Hz.
- Trayectoria de la corriente. El trayecto más peligroso es el que afecta directamente al corazón, de la mano izquierda al pecho.
- Duración de la descarga. La peligrosidad es mayor cuanto mayor es la duración de la descarga. La CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) define la peligrosidad de la corriente para la frecuencia de 50 y 60 Hz mediante un gráfico tiempo-corriente (fig. 5.24).

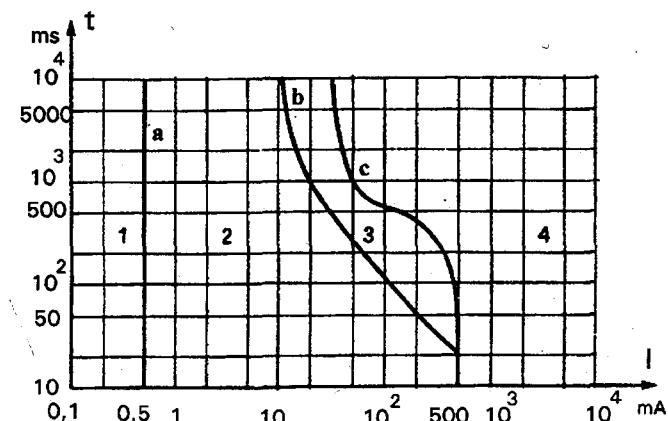


Fig. 5.24

En el gráfico se distinguen cuatro zonas:

- Zona 1: Habitualmente ninguna reacción.
- Zona 2: Habitualmente ningún efecto peligroso.
- Zona 3: Efectos fisiológicos generalmente reversibles, como contracciones musculares, dificultades respiratorias y alteraciones del ritmo cardíaco.
- Zona 4: Efectos fisiológicos como los de la zona 3 y probable fibrilación ventricular. Pueden presentarse quemaduras graves con el aumento de intensidad y del tiempo de exposición.

■ Límite de peligrosidad de la tensión

La impedancia o resistencia del cuerpo humano al paso de la corriente eléctrica es la suma de la impedancia interna del cuerpo y la impedancia de contacto con las partes en tensión. Depende de muchos factores. Su valor disminuye al aumentar la tensión de contacto.

Para una tensión de contacto de 220 V se considera como impedancia del cuerpo humano 1 000 Ω .

Se admite que la tensión de contacto que puede mantenerse indefinidamente sin peligro para el cuerpo humano es de 50 V en locales secos y 24 V en locales húmedos o mojados. Estas tensiones se denominan (MIE BT 021), pequeñas tensiones de seguridad.

■ Tipos de contactos

- Contacto directo. Contacto de una persona con una parte de la instalación normalmente bajo tensión (parte activa).
- Contacto indirecto. Contacto de una persona con partes metálicas o masas accidentalmente bajo tensión. Se produce cuando existe un defecto de aislamiento.

5.24. INTERRUPTOR DIFERENCIAL

Se utiliza cuando el neutro está unido directamente a tierra y está constituido esencialmente (fig. 5.25), por un núcleo magnético (a), bobinas conductoras (b) y bobina con dispositivo de corte (c).

Cuando la intensidad que circula por los dos conductores no es igual, por haber una fuga a tierra (I_T), el campo magnético resultante no es nulo, indu-

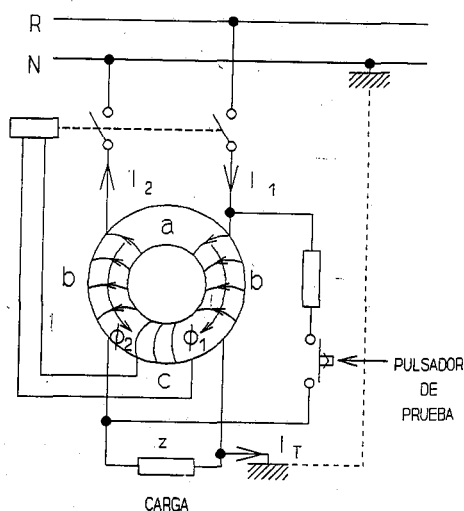


Fig. 5.25

ciéndose una corriente en la bobina del dispositivo de corte, el cual actúa interrumpiendo el circuito. Se llama sensibilidad del diferencial a la mínima intensidad de corriente de fuga a tierra $I_{\Delta N}$ para la que el aparato desconecta.

Se llaman de alta sensibilidad los interruptores diferenciales de sensibilidad menor o igual a 30 mA y de baja los de sensibilidad mayor de 30 mA (300 o 500 mA).

El interruptor diferencial tiene un poder de corte reducido (como máximo de 5 kA) por lo que debe estar protegido con interruptores automáticos o fusibles.

Se utilizan también interruptores diferenciales trifásicos para las instalaciones trifásicas a tres o a cuatro hilos, pudiendo incorporar protección magnetotérmica en el mismo aparato (interruptor magnetotérmico diferencial).

Cuando se conectan dos o más interruptores diferenciales en serie, el interruptor de cabecera debe tener retardo de disparo para desconexión selectiva.

En instalaciones de potencia elevada se utiliza el relé diferencial (fig. 5.26), que consiste en un transformador toroidal conectado a un relé, el cual actúa sobre un interruptor automático por un disparador indirecto.

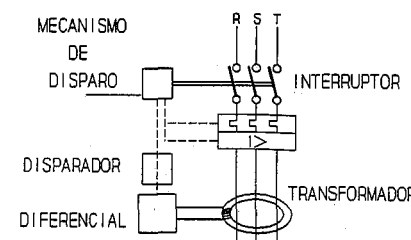


Fig. 5.26

5.25. PROTECCIÓN CONTRA CONTACTOS DIRECTOS








■ Protección total

Protección frente a todo contacto directo, incluso intencionado en locales de acceso no restringido a personal cualificado (viviendas y locales de pública concurrencia). Las medidas utilizadas son:

- Utilización de muy bajas tensiones de seguridad. Este sistema, en las condiciones establecidas por la norma UNE 20 460, es válido para protección contra contactos directos e indirectos, sin utilizar ninguna otra medida de protección.
- Aislamiento de las partes activas. Recubrimiento con aislamiento apropiado, que limite la corriente de contacto a un valor inferior a 1 mA, considerando la resistencia del cuerpo humano de 2 500 Ω (MIE BT 021).
- Envoltentes y barreras. Las partes activas instaladas con interposición de barreras o colocadas en el interior de envoltentes. Las normas UNE indican unos grados de protección para barreras y envoltentes.

El grado de protección se indica con las letras IP seguidas de tres cifras características que indican: protección contra cuerpos sólidos, protección contra líquidos y protección mecánica, respectivamente. La clasificación de los grados de protección se indican en la tabla 5.8.

Tabla 5.8

NÚMERO	1ª CIFRA: SÓLIDOS	2ª CIFRA: LÍQUIDOS	3ª CIFRA: MECÁNICA
0	Sin protección.	Sin protección.	Sin protección.
1	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 50 mm.	Protegido contra las caídas verticales de gotas de agua (condensación).	Energía de choque: 0,225 J
2	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 12 mm.	Protegido contra las caídas verticales de agua hasta 15° de la vertical.	Energía de choque: 0,375 J.
3	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 2,5 mm.	Protegido contra el agua de lluvia hasta 60° de la vertical. 	Energía de choque: 0,500 J.
4	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 1 mm.	Protegido contra las proyecciones de agua en todas direcciones. 	
5	Protegido contra el polvo (sin sedimentos perjudiciales). 	Protegido contra el lanzamiento de agua en todas direcciones. 	Energía de choque: 2,00 J.
6	totalmente protegido contra el polvo. 	Protegido contra el lanzamiento de agua similar a los golpes de mar.	
7		Protegido contra la inmersión. 	Energía de choque: 6,00 J.
8		Protegido contra los efectos prolongados de la inmersión bajo presión.  ... m	
9			Energía de choque: 20,00 J.

■ Protección parcial

Protección frente a contactos accidentales, en locales de acceso restringido a personal cualificado. Las medidas utilizadas son:

- Interposición de obstáculos. Sistema de separación como vallas o enrejados, que impidan todo contacto accidental con las partes activas de la instalación.
- Distanciamiento. Alejamiento de las partes activas de la instalación a una distancia del lugar donde las personas habitualmente se encuentran o circulan. Se considera zona alcanzable por la mano la que, medida a partir de donde la persona puede estar situada está a una distancia límite de 12,5 m hacia arriba y 1 m horizontalmente o hacia abajo (MIE BT 021). La norma UNE 20 460 indica también los volúmenes de accesibilidad (fig. 5.27).

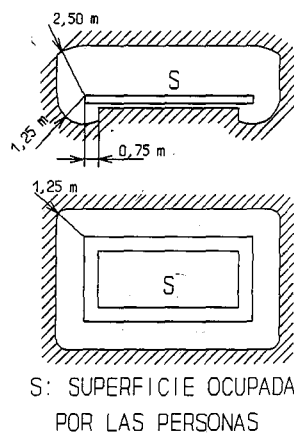


Fig. 5.27


■ Protección mediante interruptor diferencial de alta sensibilidad

Es una protección frente a contactos directos, complementaria a otras medidas de protección. Actúa cuando se produce un contacto directo o indirecto y la intensidad de defecto a tierra es mayor o igual a la sensibilidad. No actúa el diferencial cuando el contacto es entre dos fases o entre fase y neutro.

5.26. PROTECCIÓN CONTRA CONTACTOS INDIRECTOS

■ Protección clase A

Consiste en tomar medidas para evitar el contacto de las personas con las masas o en caso de producirse el contacto evitar que sea peligroso (MIE BT 021). Los sistemas de protección son:

- Separación de circuitos. Consiste en la separación de circuitos de utilización y alimentación, habitualmente mediante un transformador de aislamiento.
- Empleo de pequeñas tensiones de seguridad.
- Separación entre las partes activas y las masas accesibles por medio de aislamientos de protección y recubrimiento de las masas con aislamiento de protección. Consiste en utilizar materiales con doble aislamiento o aislamiento reforzado (clase II de protección eléctrica). Los aparatos no se ponen a tierra y llevan el símbolo .
- Innaccesibilidad simultánea de elementos conductores y masas. Consiste en impedir que una persona pueda tocar simultáneamente una masa y un elemento conductor o dos masas distintas. Este sistema solo es útil prácticamente en locales no conductores y para masas de equipos fijos.
- Conexiones equipotenciales. Consiste en conectar entre sí todas las masas a proteger y a los elementos conductores simultáneamente accesibles.

■ Protección clase B.

Todas las masas accesibles deben estar puestas a tierra y se produce el corte automático de la alimentación de la instalación en caso de defecto.

Estas medidas de protección dependen del esquema de distribución.

- 1) *Distribución TT.* El neutro conectado a tierra directamente y las masas conectadas a una toma de tierra separada mediante el conductor de protección (fig. 5.28). Es el esquema de la red de distribución pública de B.T. y el más utilizado en instalaciones interiores.

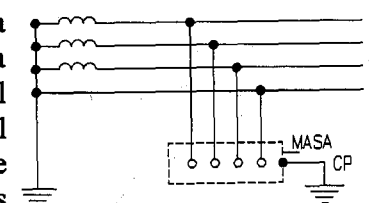


Fig. 5.28

- Protección diferencial. Por interruptor diferencial o relé diferencial e interruptor automático.

¹ Ver tabla 9.6

Todas las masas de los aparatos protegidos por el diferencial tienen que estar conectadas a la misma toma de tierra y la elección de la sensibilidad del interruptor diferencial debe cumplir la relación :

$$R_A \leq \frac{V}{I_{\Delta N}}$$

$I_{\Delta N}$: Sensibilidad del interruptor diferencial (A).

R_A : Resistencia de puesta a tierra de las masas (Ω).

V : Tensión de seguridad (50 V en locales secos y 24 V en locales húmedos o mojados).

En instalaciones de viviendas se utiliza el diferencial de alta sensibilidad (30 mA). En instalaciones industriales se suelen utilizar diferenciales de sensibilidad 300 mA y 500 mA.

El interruptor diferencial protege frente a contactos indirectos a las instalación situada a continuación (aguas abajo).

- Protección frente a sobrecorrientes. Utilizando interruptores automáticos o fusibles. No se utiliza este sistema, porque para la actuación del aparato la intensidad de defecto debe ser muy grande, lo que implica resistencia de tierra de las masas muy pequeña (menor de 1 Ω).

2) **Distribución TN.** El neutro conectado a tierra directamente y las masas de la instalación conectadas al neutro mediante conductores de protección. Cuando el neutro y el conductor de protección son distintos en todo el esquema (fig. 5.29), se denomina TN-S. Cuando el neutro y el conductor de protección son un solo conductor en todo el esquema, se denomina TN-C, y TN-C-S, si solo están unidos en una parte del esquema. Se utiliza esta distribución en algunas instalaciones industriales.

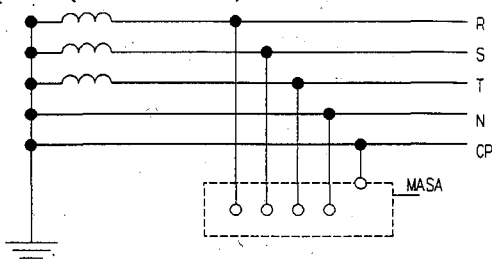


Fig. 5.29

- Protección frente a sobrecorrientes. Utilizando interruptores automáticos, magnetotérmicos o fusibles. El defecto a masa en esta distribución es como un cortocircuito entre fase y neutro.

La intensidad que provoca la actuación del aparato de protección debe cumplir la relación:

$$Z_s \leq \frac{V_f}{I_a}$$

I_a : Intensidad que provoca la actuación del aparato de protección (A).

Z_s : Impedancia del circuito de defecto (Ω).

V_f : Tensión entre fase y neutro en el origen de la instalación (V).

El aparato que protege contra contactos indirectos protege también la instalación contra sobrecorrientes.

La resistencia de la puesta a tierra del neutro debe ser menor o igual a 2 Ω (MIE BT 021).

- Protección diferencial. Mediante interruptor diferencial o relé diferencial asociado a un interruptor automático. Se recomienda como protección complementaria el empleo de interruptor diferencial de alta sensibilidad, estableciendo la conexión del conductor neutro con el de protección detrás del interruptor diferencial (MIE BT 021).

3) **Distribución IT.** El neutro aislado de tierra o conectado a la misma a través de una elevada impedancia (fig. 5.30), con las masas de la instalación conectadas a tierra directamente. Se utiliza en instalaciones en las que es necesario mantener una elevada continuidad del servicio. En esta distribución, con un primer

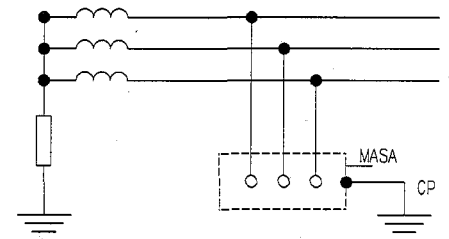


Fig. 5.30

defecto fase-masa o fase tierra la intensidad de defecto es muy pequeña (solo por el efecto capacitivo entre conductores y tierra). La instalación puede seguir funcionando con la fase averiada en contacto con las masas. Un segundo fallo de aislamiento provoca un cortocircuito entre fases como en la distribución TN. La intensidad de defecto es elevada y debe actuar el aparato de protección desconectando la instalación.

Se utiliza en esta distribución un aparato llamado indicador o controlador de aislamiento. Consiste en un aparato que aplica una pequeña tensión continua o de baja frecuencia entre el neutro de la instalación y tierra. El aparato permite medir el nivel de aislamiento de la red a partir de la corriente que circula por el aparato en caso de defecto. Cuando existe un defecto de aislamiento, la intensidad que circula por el aparato hace actuar un dispositivo de alarma si el nivel de aislamiento desciende respecto a un valor seleccionado. Un valor de aislamiento, por debajo de otro valor prefijado por el usuario, hace actuar el interruptor automático que desconecta la instalación.

5.27. ELECCIÓN DE UN INTERRUPTOR DIFERENCIAL

Se elige según las características de la instalación.

- **Intensidad nominal (I_N):** Debe ser superior a la intensidad que circula por el conductor.
- **Sensibilidad ($I_{\Delta N}$):** Según las condiciones del local y la resistencia de puesta a tierra. Para instalaciones domésticas suelen usarse diferenciales de 30 mA

y para otras instalaciones los diferenciales más usados son de sensibilidad 30 mA y 300 mA

Calibres de los pequeños interruptores diferenciales.

- Tensión nominal: 220, 380 V o 230, 400 V
- Sensibilidad: 10, 30, 300 mA
- Intensidad nominal: ..25, 40, 63, 80 V

Calibres de los interruptores diferenciales de potencia.

- Tensión nominal: 500 V
- Sensibilidad: 0,03, 0,3, 0,5, 1, 3 A
- Intensidad nominal: ..25, 40, 63, 100, 125, 160 A..

Para grandes intensidades el elemento de disparo diferencial se acopla al interruptor automático de potencia, formando el interruptor magnetotérmico diferencial.

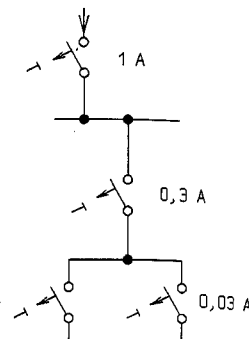


Fig. 5.31

5.28. SELECTIVIDAD ENTRE INTERRUPTORES DIFERENCIALES

Existe selectividad entre interruptores diferenciales conectados en serie cuando al producirse un defecto a tierra, desconecta el interruptor diferencial más cercano al mismo, quedando conectado el diferencial situado en el escalón superior o "aguas arriba".

Los interruptores diferenciales normales actúan instantáneamente. Los diferenciales *selectivos* están preparados para una selectividad diferencial de 2 o 3 escalones, de manera que el tiempo de disparo del interruptor es menor cuanto menor es la sensibilidad del interruptor. Así el interruptor diferencial de sensibilidad 0,03 A desconecta antes que el de sensibilidad 0,3 A y éste antes que el de 1 A (fig. 5.31).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

5.28-1 Se quiere proteger una línea secundaria en una instalación industrial con un diferencial de sensibilidad 500 mA, en local seco. La línea es trifásica con neutro y alimenta a 380 V una carga que consume 23 kW con factor de potencia 0,86. Calcular:

- Intensidad que circula por la línea.
- Intensidad nominal del interruptor diferencial.
- Resistencia máxima de la toma de tierra.

$$a) \text{ La intensidad de corriente por la línea } I_L = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos \varphi} = \frac{23\,000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,86} = 40,6 \text{ A}$$

b) La intensidad nominal debe ser superior a la que circula por los conductores, como 63 A.

c) La resistencia máxima de la toma de tierra en local seco:

$$R_A \leq \frac{V}{I_{AN}} = \frac{50}{0,5} = 100 \, \Omega$$

5.28-2 Calcular la máxima resistencia a tierra en un local mojado si la instalación está protegida contra contactos indirectos por un interruptor diferencial de 30 mA.
Solución: 800 Ω .

5.28-3 En un local seco la resistencia a tierra es de 120 Ω . Calcular el interruptor diferencial necesario para protección de una línea trifásica que alimenta a 380 V, 50 Hz, una carga de 15 kW con factor de potencia 0,9.

Solución: 300 mA, 40 A, 400 V

5.29. PROTECCIÓN DE LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS

Las líneas deben estar protegidas contra sobrecargas, cortocircuitos y sobretensiones.

5.30. RELÉS DE PROTECCIÓN

Son aparatos que controlan una magnitud eléctrica y, que al variar ésta por encima o por debajo de un cierto valor, hacen actuar un interruptor (de forma instantánea o retardada) que desconecta la instalación.

Los relés de protección son de varios tipos según la magnitud que controlan:

a) *Relé de sobreintensidad.* Controla la intensidad que circula por el equipo protegido, puede ser:

- De tiempo independiente. Actúa siempre en el mismo tiempo cualquiera que sea el valor de intensidad que sobrepase el valor ajustado en el relé. Suelen ajustarse para que funcionen con un retardo de unos 0,3 s. Se utilizan en M.T. en líneas de poca longitud.
- De tiempo inverso. Actúa en función de la intensidad de corriente, de forma que cuanto mayor sea la sobreintensidad menor será el tiempo de actuación. Se utilizan en M.T. en líneas de gran longitud o en redes en malla.

b) *Relé de tensión.* Para protección de sobretensión y subtenensión se utilizan relés que actúan según la tensión entre fases y que funcionan retardados entre 2 y 20 s, para dar tiempo a que los dispositivos reguladores de tensión actúen antes de desconectar la línea.

c) *Relé de vigilancia de contacto a tierra* (en redes de neutro aislado). En estas redes, si un conductor se conecta accidentalmente a tierra, cualquier nuevo contacto con tierra produciría una fallo de conexión.

d) *Relé detector de cortocircuito fase-tierra* (en redes de neutro conectado a tierra). En líneas de M.T., para detectar la conexión de una fase con tierra, que produce una corriente de retorno a través del terreno, de magnitud inferior al ajuste usual de las protecciones, se utiliza un relé de sobreintensidad conectado al neutro de la línea que actúa con un retardo entre 10 y 60 s. El relé genera una señal de alarma, procediéndose entonces a la localización de la avería.

- e) *Relé diferencial*, que detecta la corriente de defecto a tierra en una línea por comparación de las corrientes en sus dos extremos captadas mediante transformadores de intensidad.
- f) *Relé de distancia*, que actúa con la intensidad de cortocircuito, siendo la rapidez de su actuación proporcional a la distancia al punto de cortocircuito. Se utiliza mucho en líneas de muy alta tensión.

Los sistemas de protección más utilizados actualmente son indirectos. En ellos las magnitudes a controlar (tensión, intensidad, temperatura, etc) se transforman en otros valores para hacer actuar el relé de protección. Se están utilizando sistemas electrónicos digitales.

5.31. PROTECCIÓN DE LAS LÍNEAS CONTRA SOBRECARGAS

Se utilizan relés de sobreintensidad, que actúan para un exceso de intensidad inferior a la de cortocircuito.

5.32. PROTECCIÓN DE LAS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN CONTRA CORTOCIRCUITOS

Se suele utilizar:

- a) *Interruptor automático o disyuntor*. Es un interruptor capaz de conectar o desconectar en funcionamiento normal la línea y también, en caso de cortocircuito, desconectar de forma automática mediante relés.
- Según la forma de interrupción del arco que se forma en la conexión o desconexión, el interruptor puede ser:
- *Interruptores de pequeña potencia*. Sólo utilizan la separación rápida de los contactos para extinguir el arco.
 - *Interruptores de soplado magnético*. En interruptores de potencia media se utiliza para extinguir el arco un campo magnético que lo desvía lateralmente.
 - *Interruptores en baño de aceite*. La apertura y el cierre de contactos se hace en una cuba de aceite. Este sistema se utilizaba en potencias elevadas, pero está en desuso.
 - *Interruptores de pequeño volumen de aceite*. Los gases originados por el arco en la cámara de aceite reaccionan sobre él, provocando su extinción. Se utiliza en potencias elevadas.
 - *Interruptores de gas a presión*. El arco se extingue inyectando entre los contactos aire a presión o hexafluoruro de azufre. Se utiliza para grandes potencias.

Suelen utilizarse interruptores de reenganche automático que vuelven a conectar 0,2 o 0,4 s después de la desconexión por cortocircuito. Los equipos de reconexión automática en M.T. realizan una reconexión rápida (en un tiempo

del orden de 1 s) y, si se produce la desconexión inmediata, otra conexión más retardada (a partir de unos 30 s).

- b) *Fusibles*. Desconectan el circuito por efecto de sobreintensidad o cortocircuito, fundiéndose el elemento fusible. En los fusibles de A.T. la fusión se realiza en un recipiente con arena de cuarzo que extingue el arco y habitualmente llevan un dispositivo de señalización de fusión.

5.33. SOBRETENSIONES EN LAS LÍNEAS

Pueden ser:

- 1) *De origen externo*: descargas atmosféricas.

El origen de estas descargas está en las cargas acumuladas en las nubes, que se cargan positivamente en las capas altas y negativamente en las bajas (fig. 5.32). Usualmente los rayos empiezan en la base de la nube con descarga entre nube y tierra. La intensidad de corriente del rayo alcanza su valor punta entre 1 y 2 μ s y se reduce a la mitad en unos 40 μ s. En el interior de la nube se producen descargas entre las cargas positivas y negativas.

Las descargas atmosféricas dan lugar en la línea aérea a dos ondas de frente escarpado (fig. 5.33), que avanzan velocidad próxima a la de la luz. La tensión máxima se alcanza en un tiempo del orden de 1 μ s y disminuye su valor a la mitad en unos 50 μ s. Los pararrayos autoválvulas están

construidos para cortar los picos de tensión que sobrepasen un cierto nivel, y los aparatos protegidos por estas autoválvulas están preparados para poder soportar tensiones de impulsos algo superiores a las de corte del pararrayos.

Para diseñar los aparatos que pueden estar sometidos a impulsos de tensión por ondas de frente escarpado, y con objeto de ensayarlos frente a estas ondas, se define la forma de los impulsos y su valor de pico. Así, una onda de impulso normalizada (fig. 5.34), adquiere su valor máximo en un tiempo de 1,2 μ s y desciende a la mitad de ese valor en 50 μ s.

- 2) *De origen interno*. Debidas a maniobras de conexión y desconexión, variaciones bruscas de carga y sobretensiones de servicio (fenómenos de resonancia, conexión de cargas capacitivas a transformadores, rotura de conductor neutro en redes trifásicas desequilibradas, etc.).

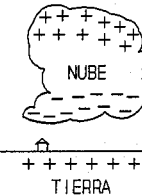


Fig. 5.32



Fig. 5.33

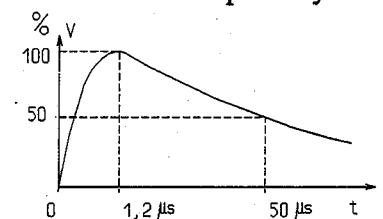


Fig. 5.34

5.34. PROTECCIÓN DE LAS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES

Los dispositivos más utilizados son:

- Cable de puesta a tierra.** Conductor sin aislamiento tendido sobre la línea y unido directamente a tierra. Se utiliza en líneas de primera categoría (muy altas tensiones) y su función es interceptar los rayos para que no alcancen los conductores activos. Son cables de acero que se conectan directamente al apoyo (artículo 9 del R.L.A.T.). En algunos casos es necesario más de un cable de tierra sobre la línea para que la protección sea eficaz.
- Pararrayos.** Los más utilizados son las autoválvulas de óxidos metálicos, que consisten en una resistencia variable con la tensión, unida a tierra. La sobretensión hace disminuir el valor de la resistencia. Cuando la tensión sobrepasa un valor umbral, la autoválvula pasa al estado de conducción estableciendo contacto con tierra. Las autoválvulas deben montarse lo más cerca posible del aparato a proteger y la toma de tierra debe tener una resistencia reducida (menos de 10Ω).

5.35. MEDIDA DEL AISLAMIENTO DE UNA LÍNEA

El aislamiento de una línea se mide con el megóhmetro. Se realizan dos medidas (fig. 5.35):

- Medida de la resistencia entre cada dos conductores.
- Medida de resistencia entre cada conductor y tierra.

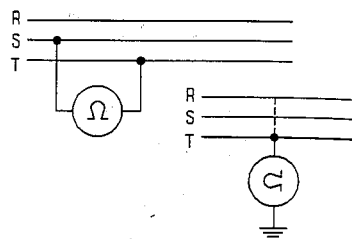


Fig. 5.35

5.36. MEDIDAS DE SEGURIDAD PARA TRABAJOS SIN TENSION

Las medidas utilizadas en instalaciones eléctricas de alta tensión, según la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo, son:

- Abrir con corte visible todas las fuentes de tensión, mediante interruptores y seccionadores, que aseguren la imposibilidad de su cierre intempestivo.
- Bloquear o enclavar, si es posible, los aparatos de corte en la posición de abiertos.
- Comprobar la ausencia de tensión.
- Poner a tierra y en cortocircuito todas las posibles fuentes de tensión.
- Señalizar la zona de trabajo.

5.37. TRABAJOS EN TENSION

Con objeto de reparar averías sin desconectar la línea de alta tensión, se realizan trabajos en tensión.

Pueden utilizarse varios métodos según el tipo de trabajo:

- Trabajos en contacto. El operario va provisto de herramientas aislantes. Se utiliza en líneas de B.T.
- Trabajos a distancia. El operario se mantiene a una distancia de seguridad de los elementos en tensión maniobrando mediante pértigas y herramientas especiales. Se utiliza en M.T.
- Trabajos a potencial. El operario se conecta al potencial del elemento sobre el que va a trabajar, no conservando por ello distancia de seguridad y trabajando con herramientas comunes. Se utiliza en muy alta tensión.

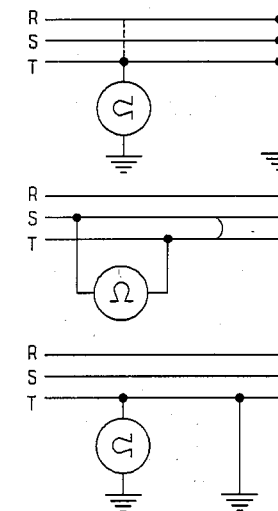


Fig. 5.36

5.38. DETERMINACIÓN DE AVERÍAS EN LAS LÍNEAS

Las averías de una línea son (fig. 5.36):

- Conductor sin continuidad. Se determina midiendo la resistencia entre cada uno de los conductores y tierra por un extremo mientras que por el otro los conductores se conectan entre sí a tierra. La resistencia respecto a tierra del conductor cortado es mucho mayor que la de los demás conductores.
- Contacto entre conductores. Se determina midiendo la resistencia entre cada dos conductores. La resistencia entre los conductores en contacto es muy pequeña.
- Contacto entre conductor y tierra. Se determina midiendo la resistencia entre cada conductor y tierra, que debe tener un valor muy pequeño.

5.39. LOCALIZACIÓN DE AVERÍAS EN LAS LÍNEAS

la localización de las averías se hace en dos fases:

- Prelocalización**, mediante puentes de medida.

Son muy usados:

- Puente de Wheatstone.** Se utiliza para contactos entre conductores, efectuándose la medida desde los dos extremos (fig. 5.37).

Cuando el primer puente está en equilibrio:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot (R_x + 2R_L)$$

En el equilibrio del segundo puente $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot [R_x + (2R_L - 2R_L)]$

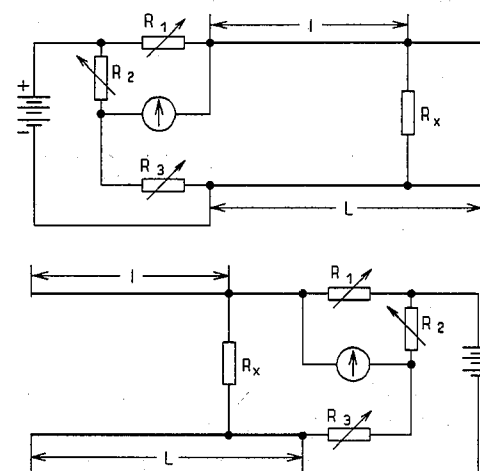


Fig. 5.37

Todos los datos son conocidos, menos R_x y R_l que se obtienen por las ecuaciones anteriores.

$$\text{Entonces } l = \frac{R_l \cdot s}{\rho}$$

Conociendo la resistencia específica del conductor en Ω/km

$$l(\text{km}) = \frac{R_l(\Omega)}{R(\Omega/\text{km})}$$

- **Puente de Murray.** Se utiliza para localización de contacto entre conductor y tierra. Se conectan en cortocircuito un extremo del conductor defectuoso y otro en perfecto estado (fig. 5.38).

Desplazando el cursor sobre el hilo MN hasta que se alcance el equilibrio del puente, siendo los dos conductores de igual sección y material:

$$l \cdot b = [L + (L - l)] \cdot a$$

$$\text{De donde } l \cdot b = 2La - la; \quad l = 2L \frac{a}{a+b}$$

- **Puente de medida en C.A.** Se utiliza para conductor cortado sin cortocircuito ni contacto con tierra. Se aprovecha el efecto de capacidad entre estos conductores y tierra (fig. 5.39). Desplazando el cursor sobre el hilo MN hasta que el puente está en equilibrio (auricular T con sonido mínimo); se verifica:

$$l = 2L \frac{b}{a+b}$$

Si se conoce las capacidades del conductor cortado C_x y del conductor en buen estado C :

$$l = L \frac{C_x}{C}$$

2) Localización final. Con varios aparatos:

- **Ecómetro o reflector de impulsos.** Se somete al conductor a unos impulsos de tensión que son reflejados por los puntos defectuosos y registrados en un osciloscopio. En el aparato se puede leer la distancia al punto defectuoso o el tiempo de reflexión (entonces se halla la distancia conociendo la velocidad de propagación sobre otro cable idéntico).
- **Detector acústico.** Basado en la detección de señales acústicas en el punto defectuoso del cable.

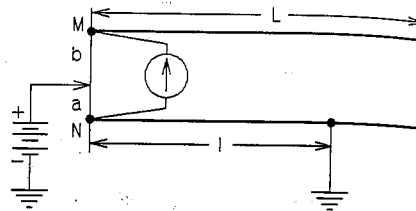


Fig. 5.38

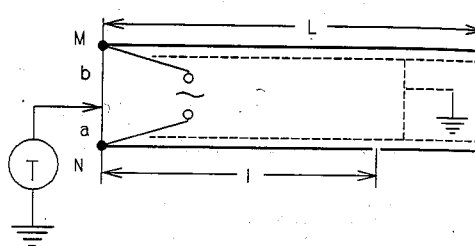


Fig. 5.39

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

5.39-1 Calcular la distancia desde el extremo de un conductor a una derivación a tierra. El cable tiene una longitud de 350 m y el resto de los conductores están en buen estado. Aplicando el puente de Murray se obtienen los siguientes valores: $a=12$ divisiones y $b=28$ divisiones.

La distancia desde el extremo en el que se mide:

$$l = 2L \frac{a}{a+b} = 2 \cdot 350 \cdot \frac{12}{40} = 210 \text{ m}$$

5.39-2 Uno de los conductores que forman una línea subterránea de 1800 m se halla cortado en un punto. Calcular la distancia del extremo desde donde se efectúa la medida se encuentra el corte, sabiendo que len un puente de capacidades $a=30$ divisiones y $b=10$ divisiones.

Solución: 900 m.

5.39-3 Una línea de distribución de 2100 m tiene un conductor cortado. Calcular a qué distancia del extremo de medida se encuentra el defecto si los valores hallados midiendo la capacidad de son: para el cable cortado $0,08 \mu\text{F}$ y para cable en buen estado $0,12 \mu\text{F}$.

Solución: 1400 m.

5.40. MANTENIMIENTO Y AVERÍAS EN LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE LAS LÍNEAS

- a) **Mantenimiento.** Son de mantenimiento los trabajos preventivos destinados a comprobar que los diversos componentes del sistema de protecciones están en condiciones de funcionar correctamente.

Para un mantenimiento correcto es necesario revisar los equipos periódicamente. Los relés de una línea de M.T. se suelen revisar cada cuatro o cinco años. La revisión de los relés exige realizar una serie de pruebas para comprobar su funcionamiento básico. Los relés gobernados por microprocesadores realizan automáticamente autocomprobaciones, dando información del módulo averiado.

- b) **Averías.** Cuando la avería se ha producido, la actividad necesaria para volver la instalación a su trabajo normal se llama mantenimiento correctivo. Todo relé averiado debe ser sustituido. Las averías sencillas suele repararlas el personal de mantenimiento, mientras que si la avería es compleja se envía al fabricante para su reparación.

5.41. MANTENIMIENTO DE LÍNEAS AÉREAS

- a) **Mantenimiento de los apoyos:**

- Los apoyos de madera deben ser vigilados respecto a putrefacción, introduciendo barrenas en ellos. Se procede a su reforzamiento o a su cambio.

- Los apoyos de hormigón necesitan protegerse contra suelos y aguas que los ataquén.
 - Los apoyos metálicos deben ser protegidos contra la corrosión, mediante pinturas. Suelen utilizarse galvanizados.
- b) *Mantenimiento de los aisladores.* Debe cuidarse su limpieza y la protección de sus partes metálicas contra la corrosión.
- c) *Mantenimiento de los conductores.* En los conductores deben vigilarse las vibraciones que pueden provocar rotura. Se utilizan antivibradores. Para la vigilancia del estado de los aisladores y conductores es muy empleado el pirómetro de radiación, que detecta el calentamiento del elemento a vigilar cuando se enfoca sobre éste.

5.42. MANTENIMIENTO Y AVERÍAS EN LAS LÍNEAS SUBTERRÁNEAS

a) *Mantenimiento.*

Las pruebas de recepción de la instalación, para verificar la calidad técnica de la misma, tienen su continuidad en las verificaciones periódicas de mantenimiento, para prevenir averías. Consisten en la realización de las siguientes mediciones:

- 1) Medida de resistencia de aislamiento. Se utiliza un megóhmetro, conectando el borne positivo al conductor a medir y el negativo a la pantalla del cable y al sistema de puesta a tierra. Después de efectuada la medida se descarga el cable poniendo el conductor a tierra.
- 2) Medida de la resistencia de los conductores. Se utiliza un puente de medida, uniendo dos conductores por un externo y midiendo la resistencia desde el otro. La resistencia de cada conductor será la mitad de la medida efectuada.
- 3) Medida de la capacidad. Se mide la capacidad del cable de campo radial respecto a la pantalla metálica puesta a tierra, y en los cables de campo no radial entre un conductor y todos los demás unidos entre sí y a la cubierta metálica puesta a tierra.
- 4) Ensayo de tensión. Se realiza aplicando una tensión continua o una tensión alterna a la frecuencia de 50 Hz durante cinco minutos, en los cables unipolares entre el conductor y la cubierta metálica, y en los cables multipolares entre conductor y todos los demás puestos en contacto con la cubierta metálica y tierra. La tensión de ensayo en corriente alterna (para cables de M.T.) será de 2,5 veces la tensión nominal más pequeña, y de 2,4 para el ensayo en corriente continua. Si durante el ensayo se observa un aumento brusco de intensidad de corriente se debe repetir el ensayo, porque indicará la perforación de cable. Después del ensayo el cable se conecta a tierra para descargarlo.

b) *Localización de averías.*

Para la *prelocalización* de averías se utilizan los métodos clásicos:

- Puente de Murray, para conductor no interrumpido y contacto entre conductor y tierra o entre conductores.
- Puente de capacidad cuando el conductor está interrumpido en el punto defectuoso.

Para la *localización final* de averías se utilizan fundamentalmente dos métodos:

- Reflector de impulsos o ecómetro. basado en la reflexión de cortos impulsos de tensión eléctricos enviados a lo largo del cable. El tiempo transcurrido entre el envío de un impulso y la llegada del impulso reflejado en el punto de defecto da la distancia a ese punto. Una pantalla suministra información sobre si el defecto es conductor interrumpido (circuito abierto) o cortocircuito.
- Detector acústico por emisor de audiofrecuencia. El emisor se conecta al cable y un receptor portátil se desplaza sobre la canalización. La variación de intensidad del sonido indica los puntos de defecto. Se va colocando el receptor sobre el suelo en la proximidad del punto de defecto. Sobre este punto es máxima la intensidad del sonido.

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.5-1 Una línea de B.T. está formada por 4 conductores unipolares de cobre, de sección 10 mm^2 , aislados con PVC, 750 V, canalización bajo tubo a 40°C . Calcular:

- a) Intensidad admisible por los conductores.
- b) Calibre del magnetotérmico necesario para proteger la línea contra sobrecargas si la potencia de consumo a 380 V, 50 Hz es de 10 kW, con factor de potencia 0,86 inductivo.

Solución: a) 36 A; b) 20-32 A.

P.5-2 Para la protección contra sobrecargas de una línea, formada por cuatro conductores de aluminio $3 \times 70 + 1 \times 35$ aislados con XLPE, 0,6/1 kV en instalación enterrada bajo tubo, se utiliza un interruptor automático de intensidad nominal $I_n = 160 \text{ A}$ y relé térmico regulable contra sobrecargas entre $0,7 I_n$ e I_n . La instalación consume una potencia de 60 kW a 380 V, 50 Hz. Calcular:

- a) Intensidad permitida por el conductor según la instrucción MIE BT 007.
- b) Intensidad que circula por la línea.
- c) Valor de regulación del relé térmico.

Solución: a) 176 A; b) 91,16 A; c) 112 A.

P.5-3 Para alimentar un edificio industrial se utiliza una acometida en M.T. a 20 kV. En el punto de entronque con la red de M.T., la potencia de cortocircuito, según la empresa suministradora de energía es de 420 MVA. Calcular:

- Intensidad de cortocircuito en el punto de conexión.
- Reactancia de la línea de alimentación hasta el punto de conexión, considerando la resistencia despreciable.
- Intensidad de cortocircuito a 50 m del punto de entronque, si la línea de acometida en M.T. está formada por 3 cables de aluminio con una resistencia máxima de $0,3 \Omega/\text{km}$ y una reactancia de $0,1 \Omega/\text{km}$.

Solución: a) 12,12 kA; b) 0,952 Ω ; c) 12,06 kA.

P.5-4 Un transformador de un centro de transformación 20/0,4 kV, tiene de resistencia de cortocircuito $0,003 \Omega$ y de reactancia $0,007 \Omega$. La resistencia de una línea que parte de las barras de distribución en B.T. es de $0,019 \Omega$ y la reactancia $0,004 \Omega$. Calcular:

- Intensidad de cortocircuito en los bornes del secundario del transformador, despreciando la impedancia de la línea de alimentación en M.T.
- Intensidad de cortocircuito al final de la línea secundaria.

Solución: a) 30,3 kA; b) 9,4 kA.

P.5-5 Una línea está formada por cuatro conductores unipolares de cobre $3 \times 25 + 1 \times 16$ aislados con XLPE, 0,6/1 kV, en instalación bajo tubo. La línea alimenta a 380 V, 50 Hz, una carga de 24 kW con factor de potencia 0,8. La resistencia de la línea de alimentación aguas arriba es de $0,04 \Omega$ y reactancia $0,02 \Omega$. La resistencia de la línea es de $0,051 \Omega$ y reactancia despreciable. Calcular:

- Intensidad de cortocircuito al principio de la línea.
- Intensidad de cortocircuito al final de la línea.
- Intensidad máxima admisible en el conductor según la instrucción MIE BT 004.
- Intensidad que circula por la línea.
- Características del interruptor automático de protección de la línea.

Solución: a) 4,9 kA; b) 2,36 kA; c) 96 A; d) 45,58 A; e) $I_n = 50-80 \text{ A}$, $PdC > 4,9 \text{ kA}$

P.5-6 Calcular la resistencia de tierra aproximada tendrá un electrodo de cobre sin aislamiento, de 35 mm^2 de sección y longitud 8 m, enterrado en un terreno arenoso de resistividad $60 \Omega\text{m}$.

Solución: 15 Ω .

P.5-7 Calcular el interruptor diferencial necesario para protección de una línea trifásica que alimenta a 380 V, 50 Hz, una carga de 22 kW con factor de potencia 0,8, en un local seco si la resistencia a tierra es de 110 Ω .

Solución: 300 mA, 63 A, 380 V.



CENTROS DE TRANSFORMACIÓN

6.1. CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

Es una instalación que mediante transformadores reduce la media tensión de las líneas de distribución de energía eléctrica, a baja tensión de las líneas de distribución o de utilización, que alimentan a edificios e industrias.

Según su *emplazamiento* los C.T. se pueden clasificar en:

- De intemperie o exteriores.* Son centros de transformación sobre postes. La apareamiento y el transformador se colocan sobre apoyos metálicos o de hormigón.
- De interiores.* En el interior de edificios, que según el local pueden ser:
 - En el interior de edificios dedicados a otros usos, en local destinado al efecto.
 - En edificio independiente. Que según la colocación pueden ser de superficie, semienterrados o subterráneos. Actualmente estos edificios son prefabricados.

Según su *disposición constructiva* los centros de transformación instalados en locales pueden ser:

- Abiertos.* Los recintos o celdas en las que se colocan los elementos que forman el C.T. están separados por tabiques y pueden ir abiertas o con cierre frontal.
- De celdas metálicas prefabricadas.* Son conjuntos de apareamiento con envolvente metálica.
- Compactos.* La apareamiento del C.T. están en una única celda compacta con aislamiento de exafluoruro de azufre, ocupando muy poco espacio.

Según la *conexión de los C.T. a la línea de distribución de M.T.* que les suministra la energía eléctrica, se pueden clasificar en:

- Simple derivación o "en antena".* De la línea de M.T., que parte de una subestación reductora de alta a media tensión, se van conectando directamente los centros de transformación. Es la distribución utilizada generalmente en zonas rurales.
- En anillo.* En una red en anillo de M.T., en cada C.T. se colocan dos interruptores, uno de entrada y otro de salida de la línea. Este interruptor de

salida conecta con el de entrada de otro C.T. y así sucesivamente, hasta volver a la subestación reductora que alimenta la línea de M.T.

- 3) *En doble derivación.* El C.T. está conectado, por medio de dos interruptores a líneas de M.T. que proceden de dos subestaciones distintas. Esta disposición permite tener funcionando el C.T. aunque exista avería en una de las líneas de alimentación.

Según la *utilización de los C.T.* se clasifican en:

- 1) *Centros de distribución.* Son propiedad de la empresa suministradora de energía. Desde ellos se alimenta en B.T. a los abonados.
- 2) *Centros de abonado.* Son propiedad del cliente o abonado al consumo de energía eléctrica. En algunos casos el mantenimiento del C.T. lo lleva la empresa suministradora y pasa a ser de su propiedad al acabo de un tiempo. Disponen de equipo de medida de la energía consumida, y según la localización de este equipo, pueden ser de dos formas:
 - Con medida en B.T., que suelen ser de tipo intemperie sobre apoyo.
 - Con medida en A.T., que suelen ser interiores, con celda de medida, donde se localizan los transformadores de tensión e intensidad que conectan el equipo de medida de energía.

6.2. RÉGIMEN DE NEUTRO EN EL C.T.

- a) *Régimen TT.* El neutro del transformador y las masas de los aparatos de utilización conectados a tomas de tierra. Es el sistema usado en viviendas y edificios, según el R.B.T. Un interruptor diferencial desconecta la instalación cuando existe un defecto a tierra.
- b) *Régimen IT.* El neutro del transformador está aislado o conectado a tierra a través de una impedancia elevada (unos 2 000 Ω) y las masas de los aparatos se conectan a tierra. Las empresas pueden optar por esta disposición, con un sistema que controle el aislamiento de la instalación respecto a tierra. Con un primer defecto el controlador emite un aviso, y con un segundo defecto desconecta la instalación. Este sistema permite mantener mejor la continuidad del servicio, pero necesita personal de mantenimiento para vigilancia de la instalación, con el fin de eliminar la avería rápidamente con el primer aviso del controlador de aislamiento.

6.3. COMPONENTES DEL C.T.

Los centros de transformación tienen todos tres componentes básicos:

- 1) Aparataje de maniobra y protección en M.T.
- 2) Transformador.
- 3) Cuadro general de B.T. con su aparataje de maniobra y protección.

Las empresas distribuidoras de energía tienen normas particulares para la construcción y aparataje de los centros de transformación.

6.4. TRANSFORMADOR

El transformador de potencia es el aparato más importante de los centros de transformación. Es la máquina eléctrica estática capaz de transformar, por inducción electromagnética, un sistema de corriente alterna en otro de corriente alterna, pero de distinta tensión e intensidad. En los centros de transformación transfiere la energía eléctrica entre el circuito de M.T. y el circuito de B.T.¹

■ Características

El transformador más utilizado en los centros de transformación es el transformador trifásico. Las características más importantes, indicadas en su placa de características son:

- *Potencia nominal.* Las potencias normalizadas en los transformadores de distribución se indican en KVA: 10, 25, 50, 100, 160, 250, 400, 630, 800, 1 000, 1 250, 1 600, 2 000 y 2 500.
- *Relación de transformación.* Relación entre la tensión de línea nominal primaria y la secundaria. La carga secundaria está alimentada mayoritariamente a 380 V, y como tensión nominal secundaria (tensión de línea en vacío) se considera habitualmente 400 V. Los tipos de transformadores según la tensión secundaria, son:

B1: Para alimentación de receptores a 220 V.

B2: Para alimentación de receptores a 380 V.

La tensión nominal primaria es la de la línea de alimentación en M.T. Habitualmente 20 kV.

En el lado de M.T. los transformadores de distribución van provistos de un conmutador que permite variar el número de espiras con el transformador desconectado, regulando la tensión en $\pm 2,5\%$ o $\pm 5\%$.

- *Tensión de cortocircuito.* La tensión porcentual de cortocircuito en los transformadores trifásicos de distribución está comprendida entre 4 y 6%.
- *Frecuencia.* La frecuencia normalizada es 50 Hz.
- *Grupo de conexión.* Los grupos de conexión más utilizados en los transformadores de distribución, son:

Para transformadores de potencia nominal menor de 160 kVA: Yzn 11. Conexión estrella en el primario, zig-zag en el secundario, neutro accesible e índice de conexión 11, (desfase entre tensiones de línea de primario y secundario, $30 \cdot 11 = 330^\circ$).

Para transformadores de distribución de potencia mayor de 160 kVA: Dyn 11. Conexión triángulo en el primario, estrella en el secundario, neutro accesible e índice de conexión 11.

¹ Para estudiar el funcionamiento del transformador ver el apéndice B: "Transformador"

■ Particularidades constructivas

- a) *Circuito magnético*. Formado por chapas magnéticas de grano orientado, laminadas en frío, con un 3% o 5% de silicio, espesor 0,35 mm, sujetas fuertemente.
- b) *Devanados*. De cobre o aluminio en forma de hilos o pletinas. El devanado de B.T. constituido por bobina de pletinas aisladas, va cerca del núcleo magnético, y sobre este devanado se colocan las bobinas de A.T. Mediante un conmutador colocado sobre la tapa puede variarse la tensión $\pm 5\%$. Los transformadores, según el tipo de aislante que impregna los devanados, pueden ser:

- *En baño de aceite*. Con una cuba metálica que contiene el núcleo magnético, los bobinados y el aceite. La tapa de la cuba contiene las salidas aisladas de alta y baja tensión. Estos transformadores pueden ser:
 - De llenado total de la cuba. Las dilataciones del aceite por efecto de la temperatura son compensadas por la deformación de las aletas de refrigeración que rodean la cuba. Son los más utilizados.
 - De depósito de expansión. Para mantener la cuba siempre llena de aceite, conectado a la parte superior de la misma lleva un depósito de expansión.
- *Con aislamiento seco*. El circuito magnético y los devanados son encapsulados en resina. El encapsulado se hace con una mezcla de resina epoxi y un endurecedor, con alúmina y sílice en vacío. Con estas sustancias tiene una gran resistencia al fuego (es autoextinguible), gran aislamiento y resistencia a la agresión de atmósferas industriales. Se puede suministrar con envolvente metálica exterior.

■ Determinación de la potencia del transformador

La potencia necesaria para una determinada instalación viene dada por la potencia que consumen los receptores instalados P_{ins} , teniendo en cuenta su coeficiente de utilización K_u y de simultaneidad K_s .

El coeficiente de utilización de un receptor es la relación entre la potencia absorbida en la utilización y la absorbida a plena carga.

El coeficiente de simultaneidad en una instalación viene dado por el estudio de los receptores que funcionarán simultáneamente. Depende del número y tipo de receptores, y del tipo de utilización.

En las instalaciones de edificios dedicados fundamentalmente a viviendas el R.B.T. instrucción 010 indica el coeficiente de simultaneidad.

En las instalaciones industriales o singulares con más de 10 receptores suele utilizarse un factor de simultaneidad de 0,4.

La potencia necesaria $P = P_{ins} \cdot K_u \cdot K_s$

La potencia aparente necesaria S , considerando un factor de potencia de 0,9 y un factor de ampliación de 1,3 (ampliación de un 30% de la potencia instalada).

$$S = \frac{1,3P}{0,9}$$

Se suele utilizar en el centro de transformación solamente un transformador, pero para potencia mayores de 1500 kVA se emplean en ocasiones dos unidades de transformación, teniendo en cuenta la división del consumo y la economía de la instalación.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

6.4-1 Una industria tiene una potencia instalada de 1370 kW. Calcular:

- a) Potencia necesaria en la alimentación para un factor de utilización global de 0,8 y un coeficiente de simultaneidad de 0,5.
- b) Potencia aparente necesaria en el centro de transformación para un factor de potencia de 0,9 y un factor de ampliación de 1,3.

a) La potencia necesaria $P = P_{ins} \cdot K_u \cdot K_s = 1370 \cdot 0,8 \cdot 0,5 = 548 \text{ kW}$

b) La potencia aparente $S = \frac{1,3P}{0,9} = \frac{1,3 \cdot 548}{0,9} = 791,6 \text{ kVA}$

La potencia normalizada para transformador de distribución inmediatamente superior es de 800 kVA.

6.4-2 Calcular la potencia aparente del transformador necesario para alimentar una instalación que consume una potencia total de 960 kW con factor de simultaneidad de 0,4. El factor de potencia global de la instalación es de 0,9 y se prevé un aumento de potencia del 30%.

Solución: 630 kVA.

6.5. PROTECCIONES PROPIAS DEL TRANSFORMADOR

Las causas que durante el funcionamiento del transformador pueden dar lugar a averías, son:

- a) De origen interno: contactos entre arrollamientos o entre estos y masa, descenso del nivel del aceite en la cuba, etc.
- b) De origen externo: sobrecargas, cortocircuitos y sobretensiones.

6.6. PROTECCIÓN CONTRA DEFECTOS INTERNOS

- 1) *Relé Buchholz*. Las descargas eléctricas en el aceite aislante producen un desprendimiento de gases. El relé reacciona ante acumulaciones de gas o aire en el interior de la cuba o también al bajar excesivamente el nivel de aceite, poniendo en marcha una señal de alarma o, si la avería es grave, desconectando el transformador. Se coloca entre la cuba y el depósito de expansión.
- 2) *Bloque de protección*. En los transformadores con cuba de llenado total (sin depósito de expansión) los defectos internos son detectados por un bloque de protección que permite observar el descenso de nivel con un flotador y que en valores importantes produce una señal eléctrica que avisa o desconecta el

transformador. El bloque de protección puede llevar además presostato y termostato para detección de exceso de presión o temperatura.

6.7. PROTECCIÓN CONTRA SOBRECARGAS Y CORTOCIRCUITOS

Las sobrecargas o sobreintensidades pueden ser de valor grande o de valor poco elevado; pero sostenido a lo largo de mucho tiempo. El mayor valor de sobrecarga se produce cuando existe un cortocircuito en la salida del secundario del transformador. Para la protección contra sobrecargas se utilizan varios dispositivos:

a) *Termómetros y termostatos*. La protección contra sobrecargas se basa en la detección de un calentamiento anormal del aparato.

El termómetro, situado sobre la tapa del transformador o en un lateral del mismo, tiene su actuación basada en la dilatación de un líquido, que puede accionar una alarma o desconectar el transformador al actuar sobre el aparato de corte.

El termostato, situado sobre la tapa del transformador, tiene su actuación basada en la dilatación de un elemento metálico que establece un contacto eléctrico que provoca una alarma o desconecta la instalación.

En los transformadores secos encapsulados en resina, el control de la temperatura se realiza por termorresistencias. El dispositivo lleva un convertidor electrónico, con contactos de alarma y de disparo del aparato de corte.

b) *Cartuchos fusibles*. Protegen el transformador contra las sobrecargas fuertes y los cortocircuitos por la fusión de un elemento, cuando la corriente sobrepasa durante un cierto tiempo un valor determinado. En los fusibles de M.T. la fusión se realizan en un recipiente aislante de material refractario que contiene arena de cuarzo para extinguir el arco, está cerrado en sus dos extremos por cazoletas metálicas, una de la cuales aloja el botón testigo de la fusión. Se emplea en ocasiones cortocircuitos seccionadores, que constan de un aislador soporte de porcelana y un cartucho fusible sujeto a un dispositivo basculante. Al fundirse el fusible se suelta una trenza de cobre y actúa el mecanismo basculante, produciendo el seccionamiento al caer por su propio peso.

c) *Interruptores automáticos*. Son aparatos de maniobra y protección contra las sobreintensidades; desconectan automáticamente cuando hay un aumento de intensidad mayor que la prevista en cualquiera de las tres fases.

El interruptor automático de M.T. está accionado por relés que pueden ser:

- 1) Relés directos. Están accionados por la corriente primaria del transformador, que al alcanzar un valor superior al prefijado, hace actuar el relé, abriendo el interruptor y desconectando el transformador.
- 2) Relés indirectos. Están conectados a transformadores de intensidad, cuyo primario es recorrido por la corriente del primario del transformador. Necesitan generalmente una fuente auxiliar de corriente (batería de acumuladores con cargador).

El interruptor está equipado con dispositivos de extinción del arco, generalmente gas a presión. La corriente y el tiempo de disparo se pueden ajustar por separado mediante un sistema con dispositivo temporizador que actúa sobre los relés.

Combinados con los fusibles o con los interruptores automáticos se utilizan *seccionadores*. Son los aparatos de maniobra empleados para aislar los diferentes elementos del C.T.. Su funcionamiento puede ser manual, mediante mando adecuado, o enclavado con el interruptor. Sólo se pueden maniobrar en vacío, pues el arco que se produciría en carga puede dar lugar a cortocircuitos y a la destrucción de la cuchillas de contacto. La apertura del seccionador pone a tierra los bornes de salida.

Se utilizan también para poner a tierra las líneas cuando deben revisarse y para dividir las barras activas de una línea.

6.8. PROTECCIÓN CONTRA LAS SOBRETENSIONES

las causas de las sobretensiones pueden ser:

- Sobretensiones a frecuencia industrial. Debidas a variaciones bruscas de carga.
- Sobretensiones de maniobra. Debidas a conexiones o desconexiones bruscas.
- Sobretensiones atmosféricas. Por caída de rayo en un conductor o en sus proximidades.

■ Protección interna del transformador contra sobretensiones

- 1) *Protección de cuba*. Esta protección controla las corrientes de fuga a tierra originadas por una sobretensión. Consiste en aislar la cuba del transformador de tierra, conectándola luego a una toma de tierra mediante un conductor que pasa por un anillo de material magnético. Sobre el anillo toroidal está arrollada una bobina que conecta con un relé, el cual acciona el interruptor de conexión del transformador.
- 2) *Limitador de sobretensión*. Es una protección conectada en el lado de B.T. del transformador, conectada obligatoriamente en el régimen de neutro IT. El limitador de sobretensión deriva a tierra las tensiones peligrosas del secundario por fallos de aislamiento entre el devanado primario y secundario. El limitador funciona al perforarse un aislante de grosor determinado según la sobretensión.

■ Protección externa del transformador contra sobretensiones

Se realiza con *autoválvulas*. Conectadas entre los conductores de la línea y tierra, protegen los centros de transformación contra las sobretensiones de origen atmosférico. Cuando la tensión es la nominal la autoválvula es un circuito abierto; pero cuando la tensión es más elevada se hace conductora, permitiendo el paso de corriente a través de ella a tierra e impidiendo así la llegada de la sobretensión al C.T.. Se colocan lo más cerca posible de la entrada de la línea aérea al C.T. Si

éste está en un edificio, las autoválvulas se conectan en el último poste donde la línea entronca con la conducción subterránea de alimentación.

6.9. PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

En los C.T. situados en interiores, si los transformadores están refrigerados por aceite inflamable, debe existir protección contra incendios (MIE-RAT 14), la protección puede ser con los sistemas:

- 1) Sistema pasivo, que consiste en un pozo de recogida de aceite y las paredes y techo con resistencia al fuego.
- 2) Sistema activo, que consiste en un equipo automático de extinción del fuego, que actúa por detectores de humos. El procedimiento suele ser a base de CO₂. Cuando no es obligatorio el sistema automático, se utilizan extintores móviles.

6.10. ALUMBRADO, SEÑALIZACIÓN Y MATERIAL DE SEGURIDAD

El C.T. instalado en un local lleva un alumbrado general para conseguir una iluminación mínima de 150 lux, al menos con dos puntos de luz. Lleva también alumbrado de emergencia, que entra en funcionamiento en corte de servicio eléctrico, con autonomía mínima de 2 horas y nivel luminoso mínimo de 5 lux. Esta instalación eléctrica en B.T. para servicio del local está protegida con interruptor diferencial de alta sensibilidad.

Las puertas de acceso al local y las puertas de las celdas del C.T. llevan cartel de riesgo eléctrico. También se señala mediante cartel situado en el interior del local las instrucciones de primeros auxilios por accidente.

En caso de ser necesarios, en el local estarán los elementos para accionar los aparatos del C.T.

6.11. CUADRO GENERAL DE BAJA TENSIÓN

La salida del secundario del transformador se conecta al cuadro general de B.T., que se suele instalar en armarios prefabricados. De este cuadro sale la alimentación a receptores de gran consumo y a otros cuadros secundarios.

El cuadro general de B.T. está dividido en varias partes:

- 1) Unidad funcional de control. Contiene voltímetro, amperímetro y aparatos de medida necesarios con transformadores de intensidad.
- 2) Unidad funcional de seccionamiento. Contiene un interruptor seccionador o un interruptor automático tetrapolar.
- 3) Unidad funcional de embarrado. Contiene las barras generales y la conexión para las distintas salidas.
- 4) Unidad funcional de protección. Contiene interruptores-seccionadores tetrapolares con fusibles para protección de las salidas. Este sistema tiende a ser reemplazado por interruptores automáticos.

6.12. MEDIDAS

■ Celda de medida

Los centros de transformación de usuario llevan una celda de medida, cerrada, precintada y con acceso solamente por personal de la empresa distribuidora de energía. En esta celda de medida van colocados dos o tres transformadores de intensidad y dos o tres transformadores de tensión, según el sistema de medida utilizado. Los transformadores de intensidad pueden llevar dos devanados secundarios, uno para medida y otro para protección. También puede haber transformadores de intensidad y de tensión para dispositivos de protección.

Los transformadores de medida aíslan los equipos de medida del circuito de M.T. y suministran por su secundario tensiones e intensidades de magnitud proporcional a las del circuito de M.T. Son transformadores de pequeña potencia y de aislamiento seco.

■ Aparatos de medida

Los contadores de medida de energía activa y reactiva, interruptor horario y placa de comprobación, se colocan fuera de la celda de medida en armarios normalizados, cerrados y precintados, con cristales para la observación de las indicaciones. El armario debe estar situado cerca de los transformadores de medida y la conexión con estos debe realizarse con conductores de sección suficiente para no introducir errores en las indicaciones de los aparatos de medida.

6.13. CÁLCULOS ELÉCTRICOS DEL CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

Una vez escogido la disposición constructiva y el transformador a utilizar, el cálculo del C.T. exige conocer las corrientes de cortocircuito en el punto de conexión con la línea distribuidora de M.T. y en los bornes de B.T. del transformador. A partir de estos valores se escoge la aparamenta y los cables de conexión.

■ Intensidades en M.T.

$$\bullet \text{ Intensidad nominal en el primario } I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} V_{L1}}$$

I_{1n} : Intensidad nominal en primario (A).

S_n : Potencia aparente nominal del transformador (VA).

$$\bullet \text{ Intensidad de cortocircuito permanente en el primario } I_{cc1} = \frac{S_{cc1}}{\sqrt{3} V_{L1}}$$

I_{cc1} : Intensidad de cortocircuito permanente en el primario (A).

S_{cc1} : Potencia de cortocircuito en el punto de entronque con la red de M.T. según la empresa distribuidora de energía (VA).

$$\bullet \text{ Intensidad de cortocircuito de choque } I_{s1} = 1,8\sqrt{2} I_{cc1} = 2,55 I_{cc1}$$

I_{s1} : Intensidad de cortocircuito de choque o de pico, considerando el cortocircuito en el caso más desfavorable (A).

■ Intensidades en B.T.

$$\bullet \text{ Intensidad nominal en secundario } I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} V_{L2}}$$

I_{2n} : Intensidad nominal secundaria (A).

V_{L2} : Tensión nominal secundaria (V).

- *Intensidad de cortocircuito permanente.* Se considera el caso más desfavorable, de potencia infinita en la central suministradora de energía, que mantiene constante la tensión de línea en el primario en caso de cortocircuito, por lo que la intensidad de cortocircuito estará limitada exclusivamente por la impedancia del transformador.

$$I_{cc2} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}} 100$$

I_{cc2} : Intensidad de cortocircuito permanente (A).

u : Tensión de cortocircuito del transformador en %.

- *Intensidad de cortocircuito de choque* $I_{s2} = 2,55 I_{cc2}$

■ Impedancia del transformador referida al secundario

La impedancia total del transformador referida al secundario se puede calcular a partir de la potencia nominal del transformador y de su tensión de cortocircuito.

$$Z_{cc} = \frac{V_{L2}^2}{S_n} \frac{u_{cc}}{100}$$

Z_{cc} : Impedancia del transformador referida al secundario (Ω).

V_{L2} : Tensión de línea nominal del secundario (V).

S_n : Potencia nominal del transformador (VA).

u_{cc} : Tensión porcentual de cortocircuito.

Las componentes de la impedancia, resistencia R_{cc} y reactancia X_{cc} del transformador se obtienen de las componentes activa u_R y reactiva u_X de la caída de tensión en cortocircuito.

$$R_{cc} = \frac{V_{L2}^2}{S_n} \frac{u_R}{100}; \quad X_{cc} = \frac{V_{L2}^2}{S_n} \frac{u_X}{100}$$

■ Solicitaciones dinámicas

Se calcula el esfuerzo sobre barras conductoras considerando la fuerza electrodinámica sobre conductores rectilíneos paralelos.

$$\text{La fuerza máxima sobre las barras } F = 2,04 \cdot I_s^2 \cdot 10^{-8} \frac{L_b}{D_b}$$

F : Fuerza (kp)

L_b : Longitud máxima de la barra (m)

D_b : distancia entre las barras (m)

La fuerza sobre los soportes de las barras debe ser menor que la carga máxima de rotura que admiten los aisladores utilizados.

Considerando las barras apoyadas en los dos extremos, como caso más desfavorable, el momento flector M_f (kp·cm):

$$M_f = \frac{F \cdot L_b}{8}$$

L_b : Longitud máxima de las barras (cm).

Momento resistente o módulo de flexión M_r (cm³), para pletina de sección rectangular, de dimensiones de la base b (cm) y de la altura h (cm).

$$M_r = \frac{bh^2}{6}$$

El coeficiente de trabajo σ (kp/cm²): $\sigma = \frac{M_f}{M_r}$

Este coeficiente de trabajo tiene que ser menor que la carga de rotura de las barras (1200 kp/cm² para el cobre y 1000 kp/cm² para el aluminio).

■ Solicitaciones térmicas

- *La densidad de corriente en régimen nominal* $\delta = \frac{I_n}{s}$

δ : Densidad de corriente (A/mm²).

s : Sección del conductor (mm²).

Esta densidad de corriente tiene que ser menor que la que puede soportar el conductor.

- *Sección necesaria para soportar el incremento de la temperatura del conductor en régimen de cortocircuito.*

$$\text{Para el cobre } s = \frac{I_{cc}}{13} \sqrt{\frac{t}{\Delta\theta}}$$

s : Sección del conductor (mm²).

$\Delta\theta$: Incremento de temperatura permitida en el conductor (°C).

t : Tiempo de duración del cortocircuito (s). Se suele considerar 0,1 s

La temperatura alcanzada por el conductor debe ser menor que la permitida según el fabricante.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

6.13-1 Un centro de transformación tiene un transformador de 1000 kVA, 20/0,4 kV, $u_{cc}=6\%$. Las pérdidas en el cobre a plena carga y 75 °C, es 10,5 kW. La potencia de cortocircuito en el punto de conexión con la línea de distribución de 20 kV, según la empresa suministradora de energía es de 400 MVA. Calcular:

- Intensidad de cortocircuito en el primario, considerando en los bornes de conexión la potencia de cortocircuito de 400 MVA.

- b) Impedancia, resistencia y reactancia del transformador respecto al secundario.
 c) Intensidad de cortocircuito en bornes del secundario, considerando solamente la impedancia del transformador.
 d) Reactancia de la red de M.T. referida al secundario, despreciando la resistencia de dicha red.
 e) Intensidad de cortocircuito en bornes del secundario del transformador, considerando la reactancia de la red de M.T.
 f) Intensidad de cortocircuito en el cuadro de B.T. si la línea de alimentación desde el secundario del transformador tiene de resistencia $0,06 \Omega$ y reactancia $0,02 \Omega$.
 a) La intensidad de cortocircuito en el primario:

$$I_{cc1} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V_{L1}} = \frac{400 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 11\,547 \text{ A} = 11,547 \text{ kA}$$

La intensidad de choque $I_{s1} = 2,55 \cdot I_{cc1} = 2,55 \cdot 11,547 = 29,44 \text{ kA}$

El interruptor automático del primario deberá tener un poder de corte mayor de $11,547 \text{ kA}$ y un poder de cierre mayor de $29,44 \text{ kA}$.

- b) La impedancia de cortocircuito del transformador referida al secundario:

$$Z_{cc} = \frac{V_{L2}^2}{S_n} \frac{u_{cc}}{100} = \frac{400^2}{1\,000 \cdot 10^3} \frac{6}{100} = 0,0096 \Omega$$

La caída de tensión en la resistencia interna del transformador se puede hallar a partir de las pérdidas en el cobre:

$$u_R = \frac{P_{Cu}}{S_n} 100 = \frac{10,5}{1\,000} 100 = 1,05 \%$$

La resistencia del transformador referida al secundario:

$$R_{cc} = \frac{V_{L2}^2}{S_n} \frac{u_R}{100} = \frac{400^2}{1\,000} \frac{1,05}{100} = 0,00168 \Omega$$

La reactancia del transformador referida al secundario:

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} = \sqrt{0,0096^2 - 0,00168^2} = 0,00945 \Omega$$

- c) La intensidad de cortocircuito en el secundario, considerando la impedancia interna:

$$I_{cc2} = \frac{V_{L2}}{\sqrt{3} Z_{cc}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,0096} = 24\,056 \text{ A} \approx 24 \text{ kA}$$

Se puede calcular también por la intensidad nominal secundaria I_{2n} :

$$I_{cc2} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}}; I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} V_{L2}} = \frac{1\,000\,000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 1\,443 \text{ A}; I_{cc2} = \frac{1\,443}{0,06} = 24\,056 \text{ A}$$

La intensidad de choque en el secundario $I_{s2} = 2,55 \cdot I_{cc2} = 2,55 \cdot 24\,056 = 61\,342 \text{ A}$
 El interruptor automático en el secundario deberá tener un poder de corte mayor que 24 kA y un poder de cierre mayor de $61,34 \text{ kA}$.

- d) La impedancia de la línea de alimentación en M.T. referida al secundario:

$$Z_{ccL} = X_{ccL} = \frac{V_{L2}^2}{S_{cc}} = \frac{400^2}{400 \cdot 10^6} = 0,0004 \Omega$$

- e) La intensidad de cortocircuito en bornes del secundario, teniendo en cuenta la reactancia anterior:

$$I_{cc2} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{\sqrt{0,00168^2 + (0,0004 + 0,00945)^2}} = 23\,112 \text{ A}$$

- f) La intensidad de cortocircuito en el cuadro de B.T. se calcula considerando la impedancia total hasta dicho cuadro:

$$I_{cc3} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{\sqrt{(0,00168 + 0,06)^2 + (0,0004 + 0,00945 + 0,02)^2}} = 3\,370 \text{ A} = 3,37 \text{ kA}$$

6.13-2 En un C.T. se utiliza un transformador de 630 kVA , $20/0,38 \text{ kV}$ y caída de tensión porcentuales de cortocircuito $u_{cc} = 4\%$. Calcular, considerando la potencia de cortocircuito en el punto de conexión a la red de M.T. 450 MVA :

- a) Intensidad de cortocircuito en bornes del primario, despreciando la impedancia de la línea de enlace con la red de M.T.
 b) Intensidad de cortocircuito en bornes del secundario.
 Solución: a) 13 kA ; b) 24 kA .

6.13-3 Un transformador de distribución de $1\,000 \text{ kVA}$, $20/0,38 \text{ kV}$, tiene de caída de tensión porcentual de cortocircuito $u_{cc} = 6,5\%$. Calcular:

- a) Intensidad de cortocircuito en el primario si la potencia de cortocircuito es de 500 MVA .
 b) Intensidad de choque en el primario.
 c) Resistencia y reactancia interna del transformador referidas al secundario, sabiendo que las pérdidas en el cobre a plena carga son de 12 kW .
 d) Reactancia de la línea de M.T. referida al secundario, despreciando la resistencia de la línea.
 e) Intensidad de cortocircuito en bornes del secundario considerando la reactancia de la línea de alimentación.
 f) Intensidad de cortocircuito de choque en el secundario.
 Solución: a) $14,43 \text{ kA}$; b) $36,8 \text{ kA}$; c) $R_{cc} = 0,00173 \Omega$, $X_{cc} = 0,00923 \Omega$; d) $0,00029 \Omega$
 e) $22,67 \text{ kA}$; f) $57,8 \text{ kA}$

6.13-4 El transformador de un centro de transformación es de 800 kVA , $20\,000/380 \text{ V}$, $u_{cc} = 4\%$. Calcular:

- a) Intensidad de choque en cortocircuito en M.T., si la potencia aparente de cortocircuito en el punto de entronque con la red de distribución en M.T., según la empresa suministradora es de 450 MVA .

- b) Momento flector en pletinas de 40×10 mm, para una longitud máxima de 1 m, separadas una distancia de 0,4 m.
 c) Momento resistente de la pletina y coeficiente de trabajo.
 d) Densidad de corriente en M.T., para el régimen nominal.
 e) Sección necesaria para soportar el cortocircuito para una duración de este de 0,1 s y considerando un incremento máximo de temperatura de 150°C .
 f) Intensidad nominal en B.T.
 g) Intensidad de cortocircuito permanente en B.T., despreciando la impedancia de la red de M.T.

a) La intensidad de cortocircuito en el primario:

$$I_{cc1} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V_{L1}} = \frac{450 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 12\,990 \text{ A} \approx 13 \text{ kA}$$

La intensidad de choque $I_{s1} = 2,55 \cdot I_{cc1} = 2,55 \cdot 13 = 33,15 \text{ kA}$

- b) La fuerza sobre la pletina $F = 2,04 \cdot I_{s1}^2 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{L_b}{D_b} = 2,04 \cdot 10^{-8} \cdot 33\,150^2 \cdot \frac{1}{0,4} = 56 \text{ kp}$

El momento flector, considerando las barras apoyada en los dos externos:

$$M_f = \frac{F \cdot L_b}{8} = \frac{56 \cdot 100}{8} = 700 \text{ kp} \cdot \text{cm}$$

- c) Momento resistente o módulo de flexión de la pletina:

$$M_r = \frac{bh^2}{6} = \frac{4 \cdot 1^2}{6} = 0,667 \text{ cm}^3$$

El coeficiente de trabajo $\sigma = \frac{M_f}{M_r} = \frac{700}{0,667} = 1\,049 \text{ kp/cm}^2$

- d) La intensidad nominal en el primario $I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} V_L} = \frac{800 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 23,1 \text{ A}$

Densidad de corriente en régimen nominal $\delta = \frac{I_{1n}}{s} = \frac{23,1}{40 \cdot 10} = 0,058 \text{ A/mm}^2$

- e) La sección necesaria para soportar el cortocircuito:

$$s = \frac{I_{cc}}{13} \sqrt{\frac{t}{\Delta\theta}} = \frac{13\,000}{13} \sqrt{\frac{0,1}{150}} = 25,8 \text{ mm}^2$$

- f) La intensidad nominal en el secundario $I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} V_L} = \frac{800 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 1\,215 \text{ A}$

- g) La intensidad de cortocircuito en el secundario $I_{cc2} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}} 100 = \frac{1\,215}{0,04} = 30\,375 \text{ A}$

6.13-5 En el embarrado a 20 kV de un centro de transformación se utiliza una pletina de cobre de 50×10 mm. Las pletinas están separadas 40 cm y la distancia entre apoyos es de 1,5 m. Calcular:

- a) Intensidad de cortocircuito de choque para una potencia de cortocircuito en barras de 350 MVA.

- b) Fuerza en barras.
 c) Momento flector.
 d) Momento resistente.
 e) Momento flector máximo que admite la pletina con un coeficiente de trabajo de $1\,200 \text{ kp/cm}^2$

Solución: a) 25,76 kA; b) 50,76 kp; c) 951,75 kp·cm; d) 0,833 cm³; e) 999,6 kp·cm

6.13-6 Un centro de transformación tiene un transformador de 1 000 kVA, 20/0,38 kV, tensión de cortocircuito 6% y 375 MVA de potencia de cortocircuito en la entrada de M.T. Calcular:

- a) Intensidad nominal en M.T.
 b) Intensidad de cortocircuito en M.T.
 c) Intensidad nominal de B.T.
 d) Intensidad de cortocircuito de choque en los bornes de B.T. despreciando la impedancia de la red de M.T.
 e) Fuerza máxima en el embarrado de M.T. si se utiliza pletina de cobre de 50×10 mm, con separación entre fases de 30 cm y separación entre apoyos de 1 m.
 f) Sección necesaria de pletina para soportar el cortocircuito considerando como incremento máximo de temperatura 150°C y el tiempo de duración 1 s.
 Solución: a) 28,87 A; b) 27,6 kA; c) 1 519 A; d) 25,32 kA; e) 51,8 kp; f) 67,9 mm².

6.14. CENTROS DE TRANSFORMACIÓN INTemperie SOBRE POSTE

Estos C.T. deben cumplir la instrucción MIE RAT 15.

■ Transformadores

Los transformadores se *designan* por la potencia, tensión nominal y grupo de conexión.

Los transformadores utilizados usualmente en las líneas de 20 kV (fig. 6.1) y sus *características* son las indicadas en la tabla siguiente:

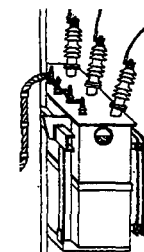


Fig. 6.1

Tabla 6.1

Potencias (kVA).	25	50	100
Pérdidas en vacío (W).	115	190	320
Pérdidas en carga a 75°C (W).	700	1100	1750
Nivel de ruido (dB).	42	44	48
Conexión.	Yz11		
Tensión nominal primario (kV).	20		
Tensión nominal secundaria en vacío (V).	400		
Tensión más elevada para el material (kV).	24		
Regulación de tensión en el arrollamiento de A.T.	$\pm 2,5\%$ $\pm 5\%$		
Tensión de cortocircuito a 75°C .	4%		
Intensidad que soporta en cortocircuito con una duración de 2 s (kA).	$25 \times I_{\text{nominal}}$		
Aislamiento.	Aceite mineral.		

Según el tipo de apoyo que sirve de soporte, el C.T. puede ser:

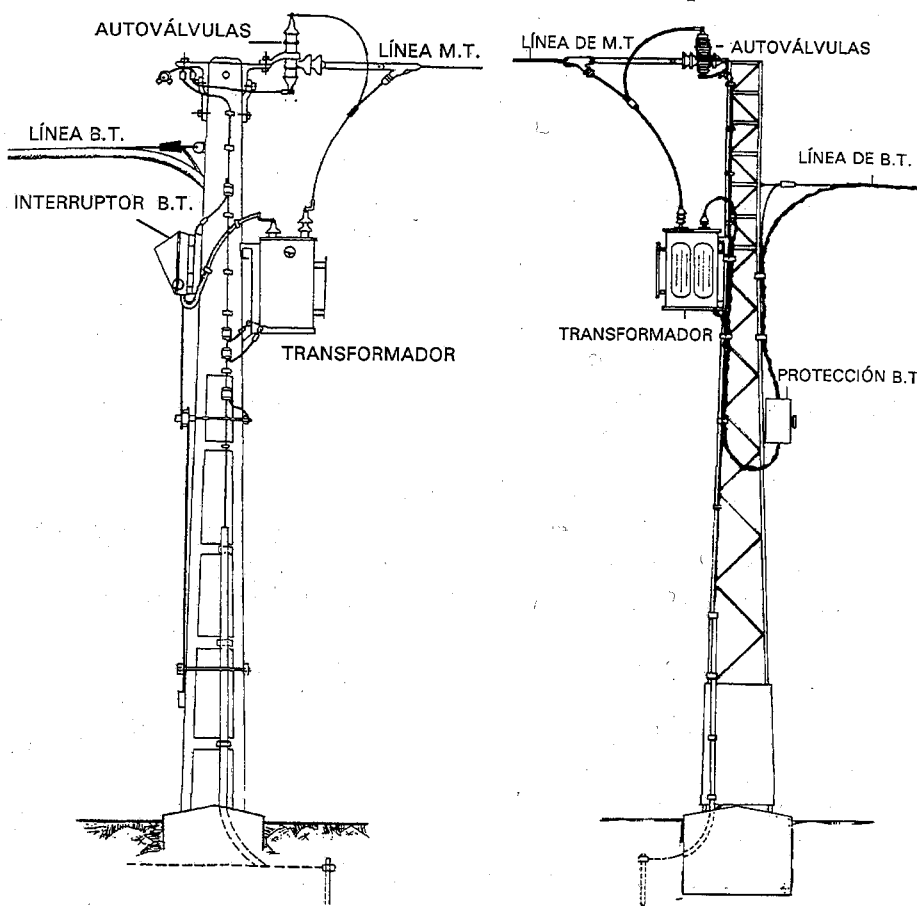


Fig. 6.2

Fig. 6.3

- *Centro de transformación sobre apoyo de hormigón.* Una disposición muy utilizada es la de la figura 6.2. La línea de M.T. se sujeta mediante aisladores a una cruceta recta metálica que soporta también las autoválvulas. El transformador va colocado sobre un soporte metálico y su salida de B.T. se conecta, mediante conductor RZ o conductores aislados unipolares de sección mínima 95 mm² (según proyecto UNESA), al cuadro de protección intemperie o al interruptor tetrapolar automático de intemperie, con accionamiento manual. Del interruptor de B.T. sale la línea de B.T., con conductor RZ sujeto al poste con pinza de anclaje. Cuando la tensión de defecto a tierra es mayor de 1000 V, el neutro de la línea de B.T. se conecta a tierra, separado de la toma de tierra de masas y autoválvulas. El apoyo mínimo que se utiliza es el HV-1000.

- *Centro de transformación sobre apoyo metálico* (fig. 6.3). Igual que en el transformador sobre apoyo de hormigón; la línea de M.T. se sujeta a la cruceta soporte de las autoválvulas y deriva a éstas y al primario del transformador, que colocado sobre soporte metálico, tiene la salida de B.T. conectada a un interruptor de protección de corte tetrapolar. Puede tener una toma de tierra para el neutro de B.T. y otra para masas y autoválvulas. La parte baja del apoyo lleva una chapa antiescala. El apoyo metálico admite transformadores de más potencia que el apoyo de hormigón (hasta 160 kVA). Se utiliza mucho el apoyo C-3000.
- *Centro de transformación sobre dos apoyos de hormigón.* El transformador se coloca sobre un pórtico formado por dos postes de hormigón (fig. 6.4). Uniendo los dos postes en su parte superior está una cruceta recta que sirve de sujeción a la cadena de aisladores de amarre a la línea de M.T. y de soporte a las autoválvulas. Situado en uno de los apoyos está el interruptor de protección de B.T., que recibe la línea del secundario del transformador. De este interruptor parte la línea de baja tensión con conductor RZ. También se pueden utilizar las dos tomas de tierra, para neutro y para masa y autoválvulas. Esta disposición permite utilizar transformadores de potencia más elevada que sobre un sólo apoyo (se utiliza para 160 kVA). Los apoyos mínimos que se emplean son HV-630.

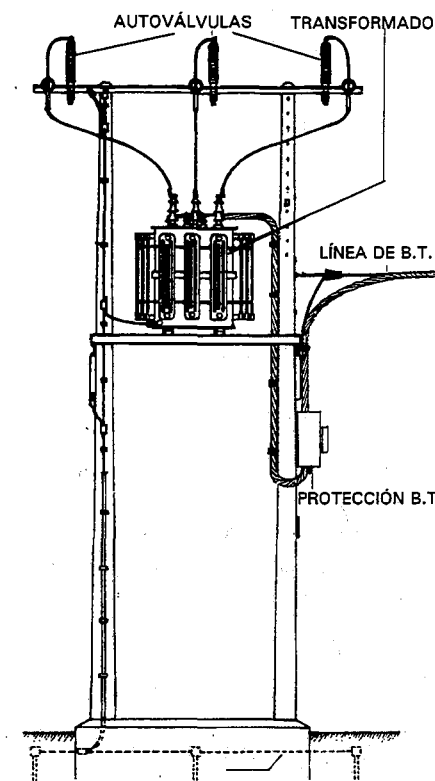


Fig. 6.4

Actualmente se prefiere utilizar un apoyo metálico para el C.T. sobre poste. La parte inferior de la cuba del transformador debe estar a una altura del suelo no inferior a 3 m (MIE RAT 15). Las partes que se encuentren bajo tensión y no estén protegidas contra contactos accidentales se sitúan como mínimo a 5 m del suelo.

■ Protección en B.T.

- *Cuadro de protección intemperie.* Es un interruptor de corte tetrapolar con fusibles, utilizado para transformadores de 100 a 250 kVA, de intensidades nominales de 160 a 400 A y fusibles de 32 a 250 A. La caja es de poliéster con fibra de vidrio y la entrada y salida de cables se realiza por su parte inferior.

- **Interruptor automático intemperie.** Es un interruptor automático de protección térmica, utilizado para transformadores de 25 a 160 kVA. Se suele utilizar con poder de corte 4 kA, con tensión nominal 400 V e intensidad nominal 165-250 A. La desconexión del interruptor puede ser manual o automática, mientras que la conexión es manual. La caja es de poliéster con fibra de vidrio.

■ Fusibles de B.T.

Utilizados en cuadros de protección de transformadores y cajas generales de protección:

- **Fusibles cilíndricos.** Se utilizan habitualmente fusibles con poder de corte 50 kA, tensión nominal 500 V e intensidad nominal 40 y 80 A.
- **Fusibles de cuchillas.** Se suelen usar con poder de corte 50 kA, tensión nominal 500 V, e intensidades nominales de 100, 125, 160, 250 y 400 A.

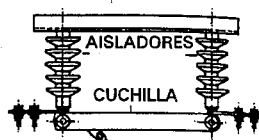


Fig. 6.5

■ Conductores de B.T.

Son los conductores comprendidos entre los bornes del transformador y los aparatos de protección en B.T. Se utiliza cable RZ de aluminio, de sección 95 mm² para transformadores de potencia igual o inferior a 100 kVA, y de sección mínima 150 mm² para transformadores de 160 kVA.

■ Seccionadores en M.T.

Utilizados para corte y conexión de la línea en vacío. Son unipolares y consiste en una cuchilla metálica soportada sobre aisladores (fig. 6.5).

Estos seccionadores son de chasis de hierro galvanizado, circuito principal de cobre, cuchillas accionables con pértiga y con dispositivo de enclavamiento. Tensión nominal 24 kV, intensidad nominal 400-630 A.

- Seccionadores sobre poste de hormigón. Para seccionamiento visible en las líneas de M.T. aéreas (fig. 6.6), con cruceta para derivación.
- Seccionadores sobre apoyo metálico. Para derivación en apoyo metálico, igual que sobre poste de hormigón. Pueden ser de doble seccionamiento, con cruceta recta de doble derivación. (fig. 6.7).

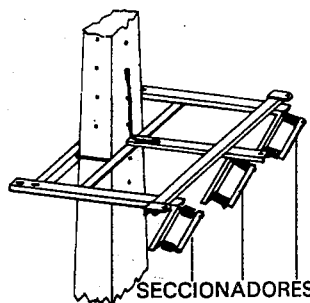


Fig. 6.6

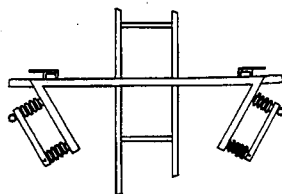


Fig. 6.7

■ Fusibles de M.T. para exterior

Utilizados para protección de los transformadores de distribución contra cortocircuitos. Suelen colocarse en apoyos distintos del que sustenta el transformador. Las bases portafusibles para exterior, con chasis metálico y

aisladores (fig. 6.8). Las características de los fusibles de M.T. de alto poder de ruptura, utilizados para protección de transformadores se escogen según la potencia del transformador. Los fabricantes dan curvas y tablas de selección. Como orientación se indican en la tabla siguiente:

Tabla 6.2

Potencia nominal del transformador (kVA).	25	50	100	160
Intensidad nominal del fusible (A).	5	10	16	25
Tensión nominal (kV).	24 V			

Las bases portafusibles pueden ir sobre apoyo de hormigón o sobre apoyo metálico. Se utiliza cruceta recta sencilla para derivación.

Actualmente se prefiere utilizar el *fusible expulsión-seccionador*. Utilizado para protección y maniobra en redes de distribución (fig. 6.9), con potencias medias de cortocircuito.

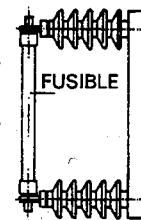


Fig. 6.8

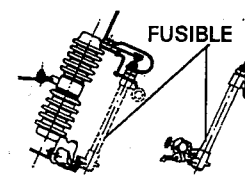


Fig. 6.9

Las bases portafusibles expulsión-seccionador, colocadas sobre apoyo, tienen una tensión nominal de 24 kV; intensidad nominal 100-200 A. Los fusibles expulsión son de fusión rápida y se escogen según la potencia nominal del transformador, con poder de corte 10 kA. Los fabricantes dan tablas para selección de los fusibles. Como orientación se indican en la tabla siguiente:

Tabla 6.3

Potencia nominal del transformador (kVA).	25	50	100	160
Intensidad nominal del fusible (A).	2	2	6	10
Tensión nominal (kV).	24 kV			

El fusible expulsión-seccionador sobre apoyo de hormigón o metálico (fig. 6.10), utiliza una cruceta recta especial para soporte de las bases portafusible expulsión-seccionador, para protección en las derivaciones de las líneas de M.T.

■ Pararrayos autoválvulas

Son pararrayos de resistencia variable para protección contra sobretensiones. De tensión nominal 24 kV, y 10 kA de intensidad de descarga nominal.

- Autoválvulas en postes de hormigón o metálicos. Sujetas al poste por soporte de hierro galvanizado (fig. 6.11), se unen entre sí mediante varilla de cobre de diámetro 8 mm y a tierra mediante conductor de cobre de sección 50 mm².

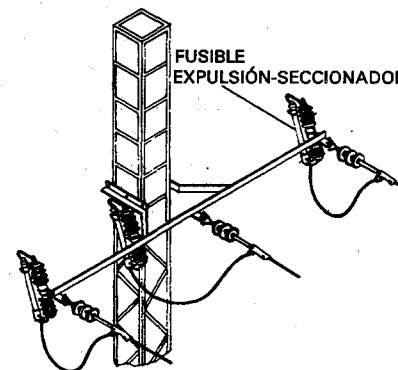


Fig. 6.10

- Autoválvulas sujetas a la carcasa o cuba del transformador. Así se colocan próximas a los bornes de M.T. para mejor protección del transformador.

■ Puesta a tierra en centros de transformación sobre apoyo

Según la instrucción MIE RAT 13, toda instalación eléctrica debe disponer de una instalación de tierra diseñada de tal forma que cualquier punto normalmente accesible a las personas, éstas resulten sometidas a tensiones de paso y contacto no peligrosas.

La empresa distribuidora da la intensidad de defecto a tierra y el tiempo mínimo a considerar para duración de defecto a la frecuencia de la red, que es del orden de un segundo como máximo. Las secciones mínimas de las líneas de tierra utilizadas son 25 mm² para el cobre y 50 mm² para el acero, y no podrán superarse las densidades de corriente de 160 A/mm² para el cobre y 60 A/mm² para el acero (MIE RAT 13).

En los centros de transformación sobre apoyo se conecta el neutro a tierra separado de la toma de tierra de las masas si la tensión de defecto a tierra supera los 1000 V. Si la instalación se realiza en el apoyo que sustenta el transformador, el cable hasta el electrodo del neutro está aislado. Según las normas de la empresa distribuidora de energía, se suele conectar el neutro a tierra en un apoyo contiguo al que sustenta el transformador.

El diseño del sistema de puesta a tierra está condicionado por el valor de la tensión máxima de paso admisible, y depende de la resistividad del terreno, de la geometría y profundidad de los electrodos de tierra, y de la tensión de servicio.

Un sistema muy utilizado es el de un rectángulo alrededor del centro de transformación de 3×2 m, formado por conductor de cobre de sección 50 mm², con una pica cilíndrica roscada, de acero cobreado de 2 m de longitud y 14,6 mm² de sección, en cada uno de los cuatro vértices del rectángulo, enterradas en zanja a una profundidad de 0,8 m. Las picas se prolongan mediante elementos roscados hasta una profundidad de 8 m.

Como medidas adicionales de seguridad para tensiones de contacto, UNESA recomienda para centros de transformación sobre apoyo, la colocación de una losa de hormigón de espesor no inferior a 0,2 m, que cubra como mínimo, hasta 1,2 m de las aristas exteriores de la cimentación de los apoyos. Dentro de la losa y hasta 1 m de las aristas exteriores de la cimentación se dispone de un mallazo electrosoldado de construcción con redondos de diámetro no inferior a 4 mm, formando una retícula no superior a 0,3×0,3 m. Este mallazo se conecta a la puesta a tierra de protección del centro al menos en dos puntos preferentemente opuestos y queda cubierto de hormigón con un espesor no inferior a 0,1 m.

■ Esquemas eléctricos generales

Los esquemas eléctricos del centro de transformación sobre poste, según las protecciones utilizadas en A.T. y en B.T. se indican en la figura 6.12.

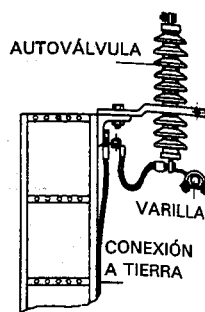


Fig. 6.11

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

6.14-1 Se instala un centro de transformación aéreo con un transformador de 100 kVA, 20/0,4 kV, en un apoyo HV-1000-R11. El centro de gravedad del transformador está a 6,6 m del suelo, con un empotramiento del apoyo de 1,9 m. En la punta de apoyo se coloca una cruceta de amarre para conductor LA 30. Calcular:

- Acción transversal del viento sobre los conductores, sabiendo que el vano de amarre es de 60 m.
- Acción del viento sobre la cara lateral del transformador, si su superficie es de 0,74 m².
- Fuerza transversal en la punta del apoyo.
- Tiro longitudinal de los conductores, considerando un tense máximo de 288 kp.
- Fuerza resultante en la punta del apoyo.

$$a) \text{ El eolovano } a_e = \frac{1}{2}(a) = \frac{60}{2} = 30 \text{ m}$$

La fuerza del viento sobre los tres conductores de diámetro 0,00714 m:

$$F_v = 3 \cdot p_v \cdot a_e \cdot d = 3 \cdot 60 \cdot 30 \cdot 7,14 \cdot 10^{-3} = 38,56 \text{ kp}$$

- La fuerza del viento sobre el transformador, considerando una presión del viento de 100 kp/m² (artículo 16 del Reglamento de Alta Tensión):

$$F_{tra} = S_{tra} \cdot 100 = 0,74 \cdot 100 = 74 \text{ kp}$$

- La altura del apoyo sobre el terreno $H = 11 - 1,9 = 9,1 \text{ m}$

La fuerza en la punta del apoyo que produce el mismo momento que la debida al viento sobre el transformador:

$$F_{tra}' = \frac{74 \cdot 6,6}{9,1} = 53,67 \text{ kp}$$

El esfuerzo transversal total en la punta del apoyo $F_T = 38,56 + 53,67 = 92,23 \text{ kp}$

- El esfuerzo longitudinal en punta $F_L = 3 \cdot T_{máx} = 3 \cdot 288 = 864 \text{ kp}$

$$e) \text{ La fuerza resultante } F_R = \sqrt{F_T^2 + F_L^2} = \sqrt{92,23^2 + 864^2} = 869 \text{ kp}$$

6.14-2 Se instala un centro de transformación aéreo con un transformador de 160 kVA, 20/0,4 kV, en un apoyo de longitud 12 m y empotramiento de 2,4 m. El centro de gravedad del transformador está a 6,5 m del suelo. En la punta de apoyo se coloca una cruceta de amarre para conductor LA 56. Calcular:

- Fuerza transversal en la punta del apoyo debida a la acción del viento, si la cara lateral del transformador es de 1,2 m² de superficie y el vano de amarre 80 m.
- Fuerza longitudinal de los conductores, considerando un tense máximo de 522 kp.
- Fuerza resultante en la punta del apoyo.

Solución: a) 149,3 kp; b) 1566 kp; c) 1573 kp.

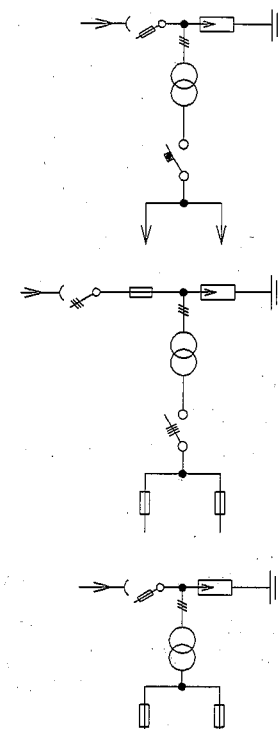


Fig. 6.12

6.15. CENTROS DE TRANSFORMACIÓN DE INTERIORES

■ Transformadores

Se designan por la potencia, tensión nominal y grupo de conexión.

Los transformadores utilizados usualmente y sus características para líneas de 20 kV, se indican en la tabla siguiente:

Tabla 6.4

Potencias (KVA).	160	250	400	630	1000
Pérdidas en vacío (W).	460	650	930	1 300	1 700
Pérdidas en carga a 75 °C (W).	2 350	3 250	4 600	6 500	10 500
Nivel de ruido (dB).	50	52	54	56	57
Conexión.	Dy11				
Tensión nominal primario (kV).	20				
Tensión nominal secundaria en vacío (V).	400				
Tensión más elevada para el material (kV).	24				
Regulación de tensión en el arrollamiento de A.T.	±2,5% ±5%				
Tensión de cortocircuito a 75 °C.	4% - 6%				
Intensidad que soporta en cortocircuito con una duración de 2 s (kA).	25 X I nominal.				
Aislamiento.	Aceite mineral.				

El transformador más utilizado tiene el circuito magnético formado por chapa magnética de grano orientado y los arrollamientos de cobre o aluminio. Los aislantes son de clase A (temperatura límite de trabajo 105 °C), como papel impregnado en aceite y barnices aislantes.

La cuba (fig. 6.13) lleva en la parte superior los bornes con aisladores pasatapas, los cáncamos de elevación, el dispositivo de llenado de aceite y el alojamiento del termostato. En la parte inferior tiene ruedas orientables y en dos caras laterales opuestas dos indicadores de nivel de aceite. En la parte inferior de una de las caras laterales lleva el dispositivo de vaciado, y en la parte inferior derecha de las dos caras de mayor dimensión dos tomas de puesta a tierra. La cuba está construida de acero, con radiadores para disipación del calor y con tratamiento anticorrosivo y pintura. Las más utilizadas son de llenado integral, de forma que cuando varía con la temperatura el volumen del aceite refrigerante, también la cuba se deforma elásticamente un volumen igual al producido en la dilatación del aceite.

Se utilizan también en los centros de transformación transformadores aislados con silicona y transformadores secos. En éstos los devanados van encapsulados con resinas epoxi.

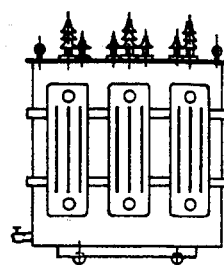


Fig. 6.13

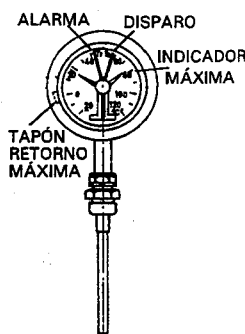


Fig. 6.14

El termostato del transformador controla la carga del transformador por la temperatura del líquido aislante, el más utilizado es el termostato de esfera (fig. 6.14). El elemento detector de temperatura está introducido en el aceite. Lleva dos contactos, uno para alarma (a la temperatura 80 °C), y otro para disparo del interruptor automático (a la temperatura de 90 °C).

Actualmente, se utilizan también en lugar del termostato, un dispositivo de detección de la presión de gas y de la temperatura.

En los transformadores secos se utiliza un circuito electrónico con detectores de temperatura por termorresistencias. El dispositivo lleva también contactos de alarma y disparo.

■ Línea de alimentación en M.T.

Suele ser subterránea, desde otro centro de transformación o de una línea aérea. En este caso la derivación se realiza en un apoyo, con tres seccionadores unipolares de M.T. y tres autoválvulas (fig. 6.15).

■ Fusibles de M.T. para interior

Protegen a los transformadores de distribución contra cortocircuitos. Se escogen según la potencia nominal del transformador. Como orientación se indican en la tabla siguiente:

Tabla 6.5

Potencia nominal del transformador (kVA).	160	250	400	630	1 000
Intensidad nominal del fusible (A).	25	25	40	63	100
Tensión nominal (kV).	24 kV				
Poder de corte nominal.	20 kA				

■ Cuadros de B.T.

La salida en B.T. del transformador se conecta al cuadro de distribución en baja tensión, mediante cable con conductores de cobre o aluminio, aislamiento RV y tensión 0,6/1 kV (fig. 6.16). Suele utilizarse cable con conductor de aluminio, de sección según la potencia del transformador (sección mínima 150 mm² según proyecto UNESA).

El cuadro de B.T. es metálico y lleva un embarrado (fig. 6.17) formado por pletinas de cobre, que suelen ser dos pletinas de 80×5 mm para fases y una pletina de

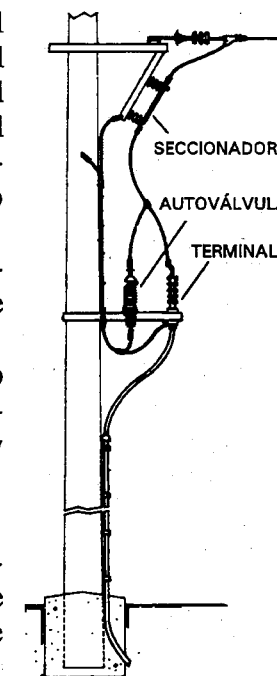


Fig. 6.15

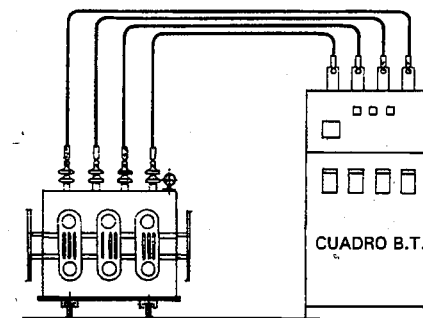


Fig. 6.16

40×5 mm para neutro. Además de la unidad de embarcado, el cuadro suele llevar una unidad de control, con tres transformadores de intensidad, tres amperímetros, voltímetro y conmutador voltimétrico. Los elementos del cuadro de B.T. deben poder soportar una tensión de 10 kV a masa.

El cuadro de B.T. de la empresa distribuidora de energía suele tener una unidad de seccionamiento, formada por barras seccionadoras de pletina de cobre, deslizantes y maniobrables con llave aislada. La protección se realiza con fusibles (fig. 6.18).

El cuadro de B.T. en un centro de transformación de abonado tiene habitualmente para corte y protección un interruptor general automático.

■ Edificios prefabricados

Los centros de transformación tipo caseta para transformación de energía se realizan preferentemente en edificios prefabricados, de módulos de hormigón armado con: puertas de acceso para personal y maquinaria, rejillas de ventilación, canaletas para tendido de cables, foso de recogida de aceite, orificios de entrada y salida de cables, orificios para cables de puesta a tierra e instalación de alumbrado.

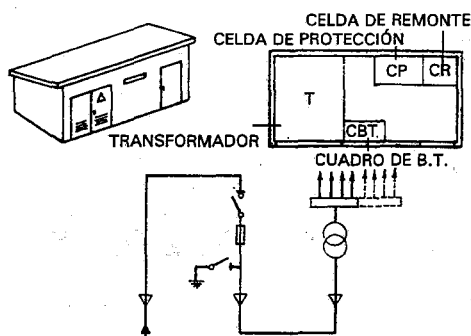


Fig. 6.19

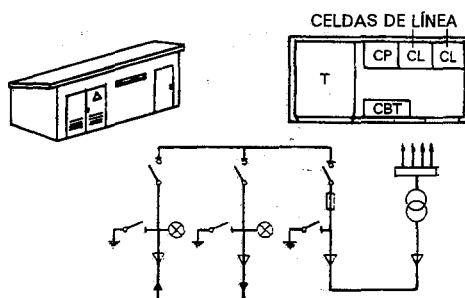


Fig. 6.20

Según la urbanización, los tipos de centros de transformación más usados son:

- Centros de transformación rurales (fig. 6.19), con una sola entrada. Tienen una celda de remonte para entrada del cable de M.T., celda de protección con interruptor seccionador, transformador y cuadro de B.T.
- Centros de transformación urbanos (fig. 6.20). Con entrada y salida de la línea de M.T. y dos celdas de línea, una celda de protección con interruptor seccionador y fusibles, transformador y cuadro de B.T.

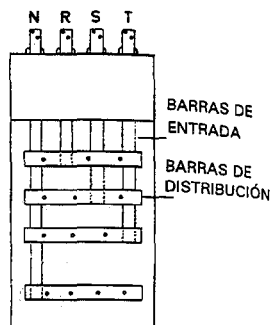


Fig. 6.17

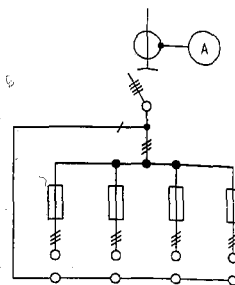


Fig. 6.18

■ Celdas en el centro de transformación.

- 1) *Celda de línea*, para entrada y salida de los cables (fig. 6.21). Lleva un interruptor seccionador, seccionador de puesta a tierra, aisladores capacitivos (uno por fase) y pilotos señalizadores de tensión (situados en la parte delantera con colores marrón amarillo y verde), alojamiento para terminales del cable y barras de interconexión.

El interruptor seccionador, tiene apertura y cierre simultáneo en los tres polos, con posición abierta visible, tensión nominal 24 kV e intensidad nominal 400 A.

El seccionador de puesta a tierra está situado entre el terminal del cable y el aparato de protección y maniobra.

En C.T. de usuario la construcción de estas celdas debe adaptarse a las normas de la empresa distribuidora, que es la única que tiene acceso a ellas según la instrucción MIE RAT 19.

- 2) *Celda de protección* (fig. 6.22), utilizada para maniobra y protección. Lleva un interruptor seccionador, fusibles, seccionador de puesta a tierra, alojamiento para terminal del cable, bobina de disparo (accionada por el termostato del transformador) y barras de interconexión. Al conjunto interruptor-seccionador fusible se le llama ruptofusible cuando al fundir el fusible, su percutor hace abrir el interruptor-seccionador. Esta protección está siendo sustituida por interruptor automático o disyuntor, que mediante relés protege contra sobrecargas y cortocircuitos.

Las características eléctricas más usuales de los aparatos de corte y maniobra son: tensión nominal 24 kV, intensidad nominal 400-630-1 250 A, intensidad de corta duración (1 s) 16 kA, intensidad de cresta 40 kA, poder de cierre 40 kA, nivel de aislamiento a tierra con impulso de tipo rayo 125 kV, nivel de aislamiento a tierra a 50Hz durante 1 minuto 50 kV. El poder de corte depende de cada aparato.

- 3) *Celda de remonte* (fig. 6.23). Con alojamiento para terminación del cable.

- 4) *Celda de seccionamiento*. Lleva un seccionador, alojamiento para terminal del cable y barras de conexión (fig. 6.24). Se utiliza también la celda de seccionamiento en centros de seccionamiento (utilizados para conexión y desconexión de líneas de M.T.) y conectada con celdas de línea (fig. 6.25).

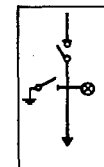


Fig. 6.21

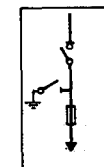


Fig. 6.22

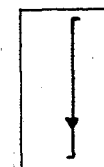


Fig. 6.23

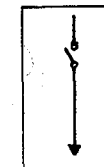


Fig. 6.24

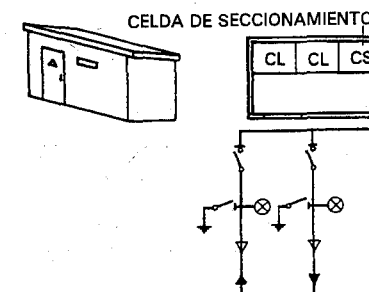


Fig. 6.25

5) *Celda de medida*, donde se conectan primero los transformadores de intensidad (de relación $x/5$ A) y luego los transformadores de tensión (de relación 22 000/110 V), por este orden y siguiendo el sentido de la corriente (fig. 6.26). Esta celda se precinta por la empresa distribuidora de energía. El equipo de medida conectado a estos transformadores, contadores, interruptor horario, etc. se sitúan fuera de la celda.

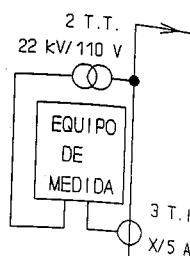


Fig. 6.26

Las celdas prefabricadas suelen realizarse en perfiles y chapa metálica, con puerta de acceso en parte frontal inferior y con esquema eléctrico unifilar en la parte frontal superior (fig. 6.27).

- Estas celdas cumplen unas condiciones de enclavamiento:
- Todas las maniobras normales solo pueden realizarse con la puerta cerrada.
 - Sólo se accede al interior de las celdas cuando está cerrado y en cortocircuito el seccionador de puesta a tierra. Las puertas quedan enclavadas en posición cerrada mientras no se cierre este seccionador.
 - El interruptor seccionador y el seccionador de puesta a tierra no pueden estar cerrados a la vez.
 - Todos los dispositivos de enclavamiento permiten su anulación desde el interior de la celda para realizar operaciones de mantenimiento.
 - Los mandos de los interruptores no pueden ser quitados de sus alojamientos sin completar la maniobra.

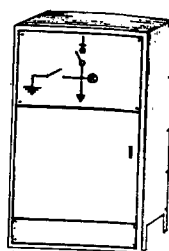


Fig. 6.27

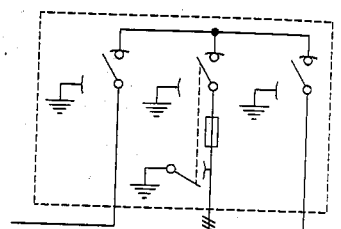


Fig. 6.28

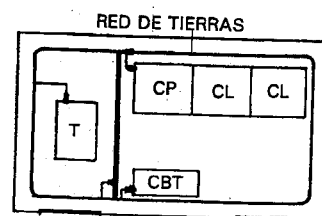


Fig. 6.29

Actualmente existe gran variedad de celdas prefabricadas. Además de las celdas modulares, se utilizan *celdas compactas* (fig. 6.28) de dimensiones reducidas, con las funciones de protección, línea y remonte integradas en una única envolvente metálica rellena de exafluoruro de azufre.

■ Red de puesta a tierra

Aparte de la puesta a tierra del neutro del transformador, las masas metálicas del centro de transformación se unen entre sí a tierra (fig. 6.29).

Las celdas prefabricadas se conectan a tierra mediante pletina de cobre situada en el interior de la celda en su parte posterior inferior y conexiónada a las celdas contiguas mediante tornillos.

Las puertas de acceso a las celdas están conectadas a tierra mediante conductor flexible de cobre.

Una disposición muy utilizada para las tomas de tierra es disponerla en forma de rectángulo de 5×3 m, con conductor de cobre, de sección 50 mm^2 y una pica de acero cobreada de longitud 2 m y diámetro 14,6 mm, colocadas en los cuatro vértices del rectángulo y enterradas en zanjas con profundidad 0,8 m. Las picas, mediante elementos roscados, se alargan hasta una profundidad de 8 m. Cada circuito de puesta a tierra lleva en un lugar accesible un borne para la medida de puesta a tierra.

Como medidas adicionales de seguridad para tensiones de contacto, UNESA recomienda en el piso del local destinado a centro de transformación la realización de un mallazo electrosoldado con redondos de diámetro inferior a 4 mm, formando una retícula no superior a $0,3 \times 0,3$ m. Este mallazo se cubre de una placa de 0,1 m de hormigón como mínimo, y se conecta a la red de tierra en dos puntos perfectamente opuestos.

Cuando el neutro se conecta a toma de tierra independiente, esta se sitúa como mínimo a 10 m de los electrodos de toma de tierra de las masas. Para mantener las dos tomas de tierra independientes, el neutro se conecta a tierra con conductor aislado de tensión 0,6/1 kV, protegido bajo tubo de PVC.

■ Alumbrado del C.T.

El centro de transformación en caseta o subterráneo lleva una instalación de alumbrado, alimentada desde el cuadro de baja tensión, con punto de luz de emergencia (fig. 6.30). El nivel de iluminación es del orden de 150 lux con dos puntos de luz como mínimo.

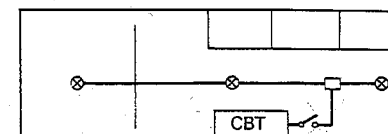


Fig. 6.30

■ Bomba de achique del C.T. situado en sótano o subterráneo

Cuando el centro de transformación está situado bajo tierra, lleva un bomba eléctrica de achique de agua, con motor monofásico 220 V, 0,5 CV. Una boyas detectora del nivel de agua hace funcionar el motor.

■ Material auxiliar

El centro de transformación, además de la placa de identificación y señal de riesgo eléctrico colocadas en exterior, lleva cartel con esquema e instrucciones de funcionamiento, cartel de primeros auxilios, banqueta aislante y dispositivos de accionamiento manual de las celdas, si son necesarios.

■ Esquemas eléctricos generales del C.T. en edificio prefabricado

Los esquemas eléctricos dependen del número y tipo de celdas del centro de transformación. En la figura 6.31 se representa el esquema de un centro de transformación con una celda de entrada, otra de salida, celda de protección del transformador, transformador y cuadro de B.T.

6.16. VENTILACIÓN DEL CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

Los recintos destinados a centros de transformación deben tener renovación de aire para evacuar el calor originado por las pérdidas de potencia en el transformador, que se transforman en energía calorífica. Se consigue así que el transformador no supere la temperatura máxima que permiten los aislantes utilizados.

La renovación de aire puede ser natural o forzada con ventiladores.

La ventilación natural se realiza con una rejilla de entrada de aire situada con mínimo a 0,3 m del suelo, y la salida mediante rejilla de sección ligeramente superior a la de entrada, situada a una separación vertical mínima con respecto a ésta de 1,3 m, según la Norma Técnica de Edificación (NTE IET).

En los centros de transformación subterráneos o semienterrados se realiza la toma de aire mediante patinillo adyacente al transformador con rejilla horizontal superior y sistema de recogida de aguas; también con pocetes con rejilla superior y recogida de aguas, con un conducto de hormigón en forma de S para comunicación con el local del transformador. La salida de ventilación se realiza mediante huecos horizontales en la cubierta con rejilla y sistema de recogida de aguas conectado al saneamiento o mediante rejilla en la parte superior de la fachada, cuando el centro de transformación es semienterrado.

■ Caudal de aire necesario

El caudal de aire es función de las pérdidas de potencia del transformador y de la diferencia de temperaturas de entrada y salida de aire (15 °C como máximo según proyecto tipo UNESA). Considerando que 1 m³ de aire por segundo absorbe 1,16 kW por cada grado centígrado, el caudal de aire necesario:

$$Q = \frac{P_p}{1,16 \Delta \theta_a}$$

Q : Caudal de aire (m³/s).

P_p : Pérdida de potencia del transformador a plena carga, pérdidas en vacío o en el hierro más pérdidas en el cobre o en cortocircuito (kW).

$\Delta \theta_a$: Incremento de temperatura del aire (°C).

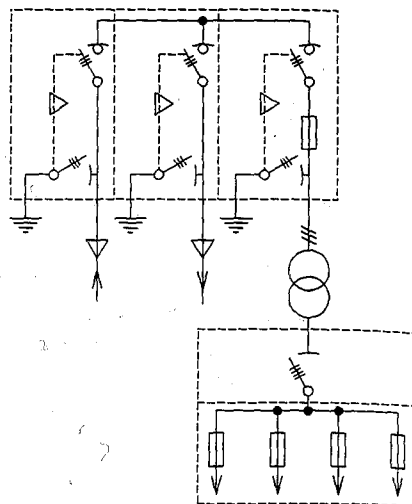


Fig. 6.31

■ Sección mínima de la rejilla

La sección de la rejilla es función del caudal y de la velocidad de salida del aire:

$$S_r = \frac{Q}{v_s}$$

S_r : Sección neta de la rejilla (m²).

v_s : Velocidad de salida del aire (m³/s).

La sección total es superior a la sección neta debido a que las láminas de la rejilla (para no permitir el paso de agua, pequeños animales o de objetos metálicos según MIE RAT 13) disminuyen el paso de aire; por lo que la sección total mínima de la rejilla se aumenta como mínimo en un 40%.

La velocidad de salida de aire es función de la distancia vertical H (m) entre los centros de las dos rejillas:

$$v_s = 4,6 \frac{\sqrt{H}}{\Delta \theta_a}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

6.16-1 Un transformador de 800 kVA, 20/0,4 kV, tiene de pérdidas en vacío 1,6 kW y en cortocircuito 8,1 kW a plena carga. Calcular:

- Caudal necesario para ventilación si el incremento de temperatura del aire es de 15 °C.
- Velocidad de salida del aire si la altura entre las rejillas de entrada y salida es 2,1 m.
- Sección neta de la rejilla.

a) El caudal de aire necesario $Q = \frac{P_p}{1,16 \Delta \theta_a} = \frac{1,6 + 8,1}{1,16 \cdot 15} = 0,56 \text{ m}^3/\text{s}$

b) La velocidad de salida del aire $v_s = 4,6 \frac{\sqrt{H}}{\Delta \theta_a} = 4,6 \frac{\sqrt{2,1}}{15} = 0,44 \text{ m/s}$

c) La sección neta mínima de la rejilla $S_r = \frac{Q}{v_s} = \frac{0,56}{0,44} = 1,27 \text{ m}^2$

6.16-2 Calcular el caudal necesario para ventilación de un transformador de 1 600 kVA con pérdida de potencia a plena carga de 19,6 kW, para un incremento de temperatura del aire de 15 °C.

Solución: 1,126 m³/s.

6.16-3 Un centro de transformación utiliza un transformador de 1 000 kVA con pérdida de potencia a plena carga de 12,2 kW, para ventilación se considera un incremento de temperatura del aire de 15 °C, y la altura entre las rejillas de entrada y salida de aire es de 2 m. Calcular:

- Caudal de aire necesario.
- Sección neta necesaria en las rejillas de ventilación.

Solución: a) 0,7 m³/s; b) 1,63 m²

6.17. VERIFICACIONES PREVIAS A LA CONEXIÓN DE UN CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

Para la conexión por primera vez a la red de un C.T., después de los requisitos administrativos:

- 1) Se revisa la instalación en todos sus elementos: ubicación, edificio, transformador, aparamenta, equipo de medida, red de tierras, etc.

Los principales puntos a revisar son:

- Limpieza de las instalaciones.
 - Limpieza y revisión de los contactos de toda la aparamenta, que deben tener la presión adecuada.
 - Revisión de las normas de explotación y de las normas de los aparatos a poner en servicio.
 - Comprobación del buen funcionamiento de los dispositivos de mando y enclavamiento de los aparatos, realizando las maniobras habituales, y verificación del tiempo de actuación de los relés.
 - Comprobación de las conexiones de las barras y que no hay peligro de cortocircuito entre ellas.
 - Observación del nivel de aceite del transformador y verificación del funcionamiento del relé de gases y del relé de temperatura.
 - Comprobación del buen aislamiento eléctrico de toda la instalación, verificando que las condiciones de la instalación están de acuerdo con las prescripciones reglamentarias.
 - Comprobación de los circuitos y las tomas de tierra, midiendo la resistencia de las tomas de tierra y las tensiones de paso y de contacto.
- 2) Antes de conectar a la red eléctrica, se avisa al titular de la instalación y a todo el personal relacionado con el C.T. A partir de este aviso se considera la instalación como en tensión.
 - 3) Se conecta a la red por el lado de alta tensión y se comprueba que la salida de baja tensión está comprendida entre -7% y +7% de la tensión nominal, verificándose el funcionamiento de los relés de protección.
 - 4) Se conecta la red de baja tensión, observando las posibles anomalías.
 - 5) Se da de alta la instalación si el funcionamiento es correcto o si se han corregido las anomalías.

6.18. MANIOBRAS DE CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN EN EL CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

• Desconexión:

- 1) Desconectar el aparato de corte de B.T..
- 2) Desconectar el aparato de corte en A.T..
- 3) Desconectar el seccionador.
- 4) Conectar el seccionador de puesta a tierra.

• Conexión:

Para la conexión se sigue el orden inverso.

El seccionador suele estar enclavado mecánicamente con el interruptor automático de A.T. o disyuntor. Así se evita la conexión o desconexión del seccionador en carga.

Debe utilizarse el material de seguridad necesario para cada maniobra.

6.19. MANTENIMIENTO DE LOS CENTROS DE TRANSFORMACIÓN

Los criterios de mantenimiento de los C.T. se basan en el artículo 12 del Reglamento de Centrales Eléctricas y Centros de Transformación y en el artículo 92 del Reglamento de Verificaciones Eléctricas. Se tiene en cuenta, además, el Reglamento Electrotécnico de B.T. y la Ordenanza de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

Se efectúa por personal especializado, realizando las operaciones de mantenimiento del edificio e instalaciones según un plan de actuaciones de forma trimestral, anual y trianual. Las anomalías detectadas en el estado del centro de transformación, su material y funcionamiento, se comunican a persona competente para que sean corregidas. Si el defecto puede dar lugar a un riesgo grave para personas o cosas la instalación deberá ser desconectada hasta el arreglo de la avería. Las intervenciones en el C.T. se anotan en el libro de instrucciones de control y mantenimiento (MIE RAT 14).

La inspección de la instalación se realiza por las Delegaciones de Industria o por otros órganos o entidades reconocidas, según criterios basados en el artículo 13 del Reglamento de Centrales Eléctricas y Centros de Transformación.

Las inspecciones se suelen realizar con la instalación bajo tensión y con periodicidad no superior a tres años. Del resultado de la inspección se toma acta, registrando las anomalías en: transformador, aparamenta, protecciones, embarrado, puestas a tierra, estructura y obra civil, etc. De este acta se entrega una copia al titular de la instalación y otra a la Administración Pública competente.

6.20. CÁLCULO DE LA TOMA DE TIERRA

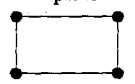
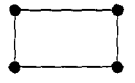
■ Resistividad del terreno

Se toma un valor ρ (Ωm), según el tipo de terreno de acuerdo con la instrucción MIE-RAT 13. También se puede medir la resistividad del terreno.

■ Configuración de la toma de tierra

Se escoge una configuración y se obtiene según tablas de UNESA la resistencia K_r ($\Omega/\Omega\text{m}$), la tensión de paso K_p ($\text{V}/\Omega\text{Am}$) y la tensión de contacto K_c ($\text{V}/\Omega\text{Am}$). En la tabla siguiente se dan estos valores para dos configuraciones rectangulares muy utilizadas, con una profundidad de enterramiento de 0,8m, conductor de 50 mm² y picas de diámetro 14 mm.

Tabla 6.6

CONFIGURACIÓN		LONGITUD DE LAS PICAS L_p (m)	RESISTENCIA K_r ($\Omega/\Omega m$)	TENSIÓN DE PASO K_p (V/ ΩAm)	TENSIÓN DE CONTACTO K_c (V/ ΩAm)
RECTÁNGULO 4x3 m	Sin picas	-	0,131	0,0200	0,0816
		2	0,096	0,0160	0,0491
		4	0,077	0,0124	0,0347
		6	0,065	0,0101	0,0266
		8	0,0056	0,0084	0,0214
RECTÁNGULO 5x3 m	Sin picas	-	0,118	0,0177	0,0719
		2	0,089	0,0145	0,0447
		4	0,073	0,0114	0,0323
		6	0,062	0,0094	0,0250
		8	0,054	0,0079	0,0203

■ Resistencia de puesta a tierra

Es el valor R_T (Ω). $R_T = \rho \cdot K_r$

■ Intensidad de defecto a tierra

Es inversamente proporcional a la impedancia del circuito de puesta a tierra.

- *Neutro aislado en la subestación de la que parte la línea de M.T.*

Se calcula la reactancia capacitiva X_c (Ω), de puesta a tierra. $X_c = \frac{1}{3C\omega}$

La pulsación de la corriente alterna de frecuencia 50 Hz $\omega = 2\pi f = 100 \cdot \pi$ rad/s

La capacidad C (μF) $C = 0,006L_a + 0,25L_b$

L_a : Longitud de la línea aérea de M.T. (km)

L_b : Longitud de la línea subterránea de M.T. (km)

La intensidad máxima I_d (A), de defecto a tierra $I_d = \frac{V_L}{\sqrt{3} \sqrt{R_T^2 + X_c^2}}$

V_L : Tensión de línea (V).

- *Neutro en la línea de M.T. puesto a tierra a través de una reactancia.*

La intensidad de defecto a tierra $I_d = \frac{V_L}{\sqrt{3} \sqrt{(R_T + R_n)^2 + X_n^2}}$

R_n : Resistencia de puesta a tierra del neutro de la red (Ω).

X_n : Reactancia de puesta a tierra del neutro de la red (Ω).

La corriente de defecto a tierra, originada por un fallo de aislamiento, debe ser mayor que la corriente de arranque I_a del relé de protección conectado sobre la conexión del neutro a tierra.

$$I_d \geq I_a$$

■ Tensión de paso máxima

Es el valor $V_{p\max}$ (V). $V_{p\max} = K_p \cdot \rho \cdot I_d$

■ Tensión de paso admisible

Es el valor V_p (V). Se calcula según la instrucción MIE-RAT 13 del Reglamento de Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación.

$$V_p = \frac{10K}{t^n} \left[1 + \frac{6\rho}{1000} \right]$$

Los valores de K y n se escogen en función del tiempo t (s) de duración del defecto de acuerdo con el Reglamento de Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación, según la instrucción (MIE RAT 13). El tiempo de duración del defecto es un dato suministrado por la empresa distribuidora de energía, que suele ser inferior a 0,9 s. En este caso $K=72$ y $n=1$.

La tensión de paso máxima debe ser menor que la admisible.

■ Tensión de paso admisible en el acceso al centro de transformación

Es la tensión de paso $V_{p(acc)}$ (V), a la que puede quedar expuesta una persona cuando tiene un pie en el terreno de resistividad ρ y otro sobre el pavimento del centro de transformación de resistividad ρ' (hormigón con resistividad elevada):

$$V_{p(acc)} = \frac{10K}{t^n} \left[1 + \frac{3\rho + 3\rho'}{1000} \right]$$

Esta tensión de paso debe ser mayor que la tensión de contacto máxima.

■ Tensión de contacto máxima

Es el valor $V_{c\max}$ (V). $V_{c\max} = K_c \cdot I_d \cdot \rho$

■ Tensión de contacto admisible

Es el valor V_c (V). $V_c = \frac{K}{t^n} \left[1 + \frac{1,5\rho}{1000} \right]$

La tensión de contacto máxima debe ser menor que la admisible. Esto no se cumple en muchos casos por lo que adoptan las siguientes medidas de seguridad:

- Las puertas y rejillas metálicas que den al exterior del centro no tendrán contacto con masas conductoras que pueden quedar bajo tensión por defectos o averías
- Realización en el piso del local destinado a centro de transformación de un mallazo electrosoldado con redondos de diámetro inferior a 4 mm, formando una retícula no superior a $0,3 \times 0,3$ m. este mallazo se cubre de una placa de 0,1 m de hormigón como mínimo, y se conecta a la red de tierra en dos puntos perfectamente opuestos. Así se consigue que el suelo del centro de transformación sea una superficie equipotencial.

■ Tensión de defecto

Es el valor V_d (V). $V_d = R_T \cdot I_d$

Esta tensión debe ser inferior al nivel de aislamiento de la instalación de B.T., que suele ser de 10 kV. Si esta tensión de defecto es menor o igual a 1 000 V, se suele colocar una sola toma de tierra para neutro de B.T. y protección.

■ Separación entre tomas de tierra

Si $V_d > 1\,000$ V, se realizan dos tomas de tierra. La separación D (m) entre las tomas de tierra de neutro y protección se calcula por la fórmula:

$$D \geq \frac{I_d \cdot \rho}{2\pi \cdot 1\,000} = \frac{I_d \cdot \rho}{6\,280}$$

Según recomendación UNESA, la resistencia de puesta a tierra del neutro debe ser como máximo 37 Ω para un esquema de distribución TT.

En esquemas de distribución TN, según el R.B.T. la máxima resistencia de puesta a tierra del neutro debe ser de 2 Ω (MIE BT 21).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

6.20-1 La resistividad del terreno sobre el que está construido un centro de transformación es de 380 Ωm . La toma de tierra se realiza colocando un rectángulo de 5 \times 3 m alrededor del centro de transformación, con conductor de cobre de 50 mm² de sección, enterrado en zanjas de profundidad 0,8 m y cuatro picas de acero de 2 m de longitud y 14 mm de diámetro, situadas en los cuatro vértices del rectángulo y enterradas hasta una profundidad de 8 m. Para esta disposición, según tablas de UNESA, la resistencia $k_r = 0,054 \Omega/\Omega\text{m}$, la tensión de paso $k_p = 0,0079 \text{ V}/\Omega\text{Am}$ y la tensión de contacto $K_c = 0,0203 \text{ V}/\Omega\text{Am}$ (valores unitarios referidos a una intensidad de defecto de 1 A y a una resistividad de 1 Ωm). Calcular:

- Resistencia de puesta a tierra.
- Reactancia capacitiva de puesta a tierra, sabiendo que la longitud de la línea aérea de M.T. de 20 kV, dependiente de la subestación, es de 200 km y la longitud de la línea subterránea de M.T. 10 km.
- Intensidad de defecto a tierra.
- Tensión de paso máxima.
- Tensión de paso admisible, para un tiempo de duración del defecto de 0,24 s.
- Tensión de contacto máxima.
- Tensión de contacto admisible.
- Tensión de defecto.
- Densidad de corriente en la línea de tierra si es de cobre de sección 25 mm².

a) La resistencia de puesta a tierra $R_T = \rho \cdot K_r = 380 \cdot 0,054 = 20,52 \Omega$

b) La capacidad $C = 0,006L_a + 0,25L_b = 0,006 \cdot 200 + 0,25 \cdot 10 = 3,7 \mu\text{F}$

La reactancia capacitiva de puesta a tierra $X_c = \frac{1}{3C\omega} = \frac{1 \cdot 10^6}{3 \cdot 3,7 \cdot 2\pi \cdot 50} = 286,77 \Omega$

- c) La intensidad máxima de defecto a tierra:

$$I_d = \frac{V_L}{\sqrt{3} \sqrt{R_T^2 + X_c^2}} = \frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{20,52^2 + 286,77^2}} = 40,16 \text{ A}$$

d) Tensión de paso máxima $V_{p\max} = K_p \cdot \rho \cdot I_d = 0,079 \cdot 380 \cdot 40,16 = 120,56 \text{ V}$

- e) La tensión de paso admisible se calcula según la instrucción MIE-RAT 13. Para el cálculo $K=72$ y $n=1$:

$$V_p = \frac{10K}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho}{1\,000}\right) = \frac{10 \cdot 72}{0,24} \left(1 + \frac{6 \cdot 380}{1\,000}\right) = 9\,840 \text{ V}$$

f) Tensión de contacto máxima $V_{c\max} = K_c \cdot I_d \cdot \rho = 0,0203 \cdot 40,16 \cdot 380 = 309,8 \text{ V}$

g) Tensión de contacto admisible $V_c = \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1,5\rho}{1\,000}\right) = \frac{72}{0,24} \left(1 + \frac{1,5 \cdot 380}{1\,000}\right) = 471 \text{ V}$

h) Tensión de defecto $V_d = R_T \cdot I_d = 20,52 \cdot 40,16 = 824 \text{ V}$

- i) La densidad de corriente en el conductor de tierra:

$$\delta = \frac{I_d}{s} = \frac{40,16}{25} = 1,6 \text{ A/mm}^2 < 160 \text{ A/mm}^2 \text{ (MIE - RAT 13)}$$

6.20-2 La toma de tierra de un centro de transformación se realiza colocando un rectángulo de 4 \times 3 m, con conductor de cobre de 50 mm² de sección, enterrado en zanjas de profundidad 0,8 m y cuatro picas de acero de 2 m de longitud y 14 mm de diámetro, situadas en los cuatro vértices del rectángulo. Para esta disposición, según tablas de UNESA, la resistencia $k_r = 0,096 \Omega/\Omega\text{m}$, la tensión de paso $k_p = 0,0160 \text{ V}/\Omega\text{Am}$ y la tensión de contacto $K_c = 0,0491 \text{ V}/\Omega\text{Am}$ (valores unitarios referidos a una intensidad de defecto de 1 A y a una resistividad de 1 Ωm). La resistividad del terreno es 240 Ωm . La subestación tiene el neutro conectado a tierra con $R_n = 0 \Omega$ y $X_n = 26 \Omega$. El tiempo de actuación de las protecciones es de 0,7 s y la intensidad de arranque del relé sobre el neutro es de 50 A. La línea de M.T. es de 20 kV. Calcular:

- Resistencia de puesta a tierra.
- Intensidad de defecto a tierra.
- Tensión de paso máxima.
- Tensión de contacto máxima.
- Tensión de defecto.
- Comprobar si las tensiones de paso y de contacto son admisibles.
Solución: a) 23,04 Ω ; b) 332,4 A; c) 1276,4 V; d) 3 342,6 V; e) 7 658,5 V; f) $V_p = 2509,7 \text{ V}$, $V_c = 139,9 \text{ V}$. La tensión de contacto es mayor que la admisible. Habrá que realizar otra configuración de electrodos o tomar medidas alternativas.

6.20-3 Calcular la tensión de paso admisible en el acceso al centro de transformación anterior si lleva un pavimento de hormigón de resistividad 3 000 Ωm .

La tensión de paso de acceso admisible:

$$V_{p(\text{acc})} = \frac{10K}{t^n} \left(1 + \frac{3\rho + 3\rho'}{1\,000}\right) = \frac{10 \cdot 72}{0,7} \left(1 + \frac{3 \cdot 240 + 3 \cdot 3\,000}{1\,000}\right) = 11\,026 \text{ V}$$

Tensión mayor que la de contacto máxima.

6.20-4 En una toma de tierra, la intensidad de defecto a tierra es de 161 A y la resistencia de tierra es de 21 Ω . Calcular:

- Tensión de defecto.
- Separación mínima entre toma de tierra de neutro y toma de tierra de protección, si la resistividad del terreno es de 380 Ωm .

Solución: a) 3 381 V; b) 9,73 m

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.6-1. Un centro de transformación se proyecta con un transformador de 630 kVA, 20/0,38 kV, tensión de cortocircuito 4% y 300 MVA de potencia de cortocircuito en la entrada de M.T. Calcular:

- Intensidad nominal en el primario.
- Intensidad de cortocircuito permanente en el primario, considerando en bornes la potencia de cortocircuito de M.T.
- Intensidad de cortocircuito de choque en el primario.
- Intensidad nominal en el secundario
- Intensidad de cortocircuito en los bornes del secundario considerando solamente la impedancia del transformador.
- Fuerza máxima en el embarrado de M.T. si se utiliza pletina de cobre de 40 \times 10 mm, con separación entre fases de 25 cm y separación entre apoyos de 1,2 m.
- Coefficiente de trabajo de las barras.

Solución: a) 18,19 A; b) 8,66 kA; c) 22 kA; d) 957,2 A; e) 23,93 kA; f) 47,4 kp; g) 1 066 kp/cm².

P.6-2 En un centro de transformación se utiliza un transformador de 1 600 kVA, 20/0,4 kV y caída de tensión porcentual de cortocircuito $u_{cc}\% = 6$. Calcular, considerando la potencia de cortocircuito en la red de M.T. 450 MVA:

- Intensidad de cortocircuito en bornes del primario, considerando en bornes la potencia de cortocircuito.
- Resistencia y reactancia de cortocircuito del transformador referida al secundario, si las pérdidas en cortocircuito del transformador son 17 kW.
- Intensidad de cortocircuito en bornes del secundario considerando la impedancia de la red de M.T. como reactancia.

Solución: a) 13 kA; b) $R_{cc} = 0,00106 \Omega$; $X_{cc} = 0,0059 \Omega$; c) 36,4 kA

P.6-3 Un apoyo de 11 m y longitud de empotramiento 2 m, con cruceta recta en la punta, soporta un transformador de intemperie a una altura sobre el suelo del centro de gravedad del transformador de 7 m. El vano de amarre, con conductores LA 56, es de 74 m. Calcular:

- Fuerza transversal en la punta del apoyo debida a la acción del viento sobre los conductores y sobre el transformador, de superficie lateral 1,1 m².
- Fuerza resultante en el extremo del apoyo si los conductores están sometidos a un tense máximo de 556 kp.

Solución: a) 148,5 kp; b) 1 674,6 kp.

P.6-4 Un transformador de 600 kVA, 20/0,4 kV, tiene de pérdidas totales 7,7 kW a plena carga. Calcular:

- Caudal necesario para ventilación si el incremento de temperatura del aire es de 12 °C.
- Velocidad de salida del aire si la altura entre las rejillas de entrada y salida es de 1,8 m.
- Sección neta de la rejilla de ventilación.

Solución: a) 0,553 m³/s; b) 0,514 m/s; c) 1,08 m².

P.6-5 La resistividad del terreno sobre el que está construido un centro de transformación es de 120 Ωm . La toma de tierra se realiza colocando un rectángulo de 4 \times 3 m alrededor del centro de transformación, con conductor de cobre de 50 mm² de sección, enterrado en zanjas de profundidad 0,8 m y cuatro picas de acero de 2 m de longitud y 14 mm de diámetro, situadas en los cuatro vértices del rectángulo y enterradas hasta una profundidad de 4 m. Para esta disposición, según tablas de UNESA, la resistencia $k_r = 0,077 \Omega/\Omega\text{m}$, la tensión de paso $k_p = 0,0124 \text{ V}/\Omega\text{Am}$ y la tensión de contacto $K_c = 0,0347 \text{ V}/\Omega\text{Am}$ (valores unitarios referidos a una intensidad de defecto de 1 A y a una resistividad de 1 Ωm). Calcular:


- Resistencia de puesta a tierra.
- Intensidad de defecto si la subestación es de neutro aislado, tensión 20 kV, longitud de la línea aérea dependiente de la subestación 110 km y de línea subterránea 15 km.
- Tensiones de paso y de contacto máximas.
- Tensiones de contacto y paso admisibles, para un tiempo de duración del defecto a tierra de 0,4 s.
- Tensión de defecto.

Solución: a) 9,24 Ω ; b) 48 A; c) 71,42 V, 200 V; d) 3 096 V, 212,4 V; e) 443,5 V.

7.1. CONTADOR MONOFÁSICO DE INDUCCIÓN

Está constituido fundamentalmente (fig. 7.1) por una bobina de muchas espiras (a), con conductor de poca sección, conectada en paralelo, y otra bobina de pocas espiras (b), con conductor de gran sección, conectada en serie. En el campo magnético de las bobinas se halla un disco giratorio de aluminio (c) cuyo eje lleva un tornillo sinfín que acciona el mecanismo de relojería registrador (d). Un imán permanente (e) origina el frenado del disco por corrientes parásitas cuando éste gira.

Su funcionamiento está basado en la acción del campo magnético alternativo de las bobinas, recorridas por corriente alterna, sobre las corrientes parásitas del disco (engendradas por ese mismo campo) y que lo impulsan a girar.

Se utiliza como contador de energía en corriente alterna. Se representa por el símbolo .

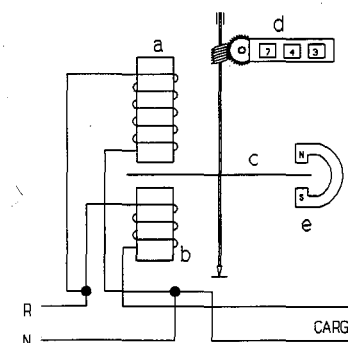


Fig. 7.1

7.2. CONTADORES TRIFÁSICOS

Los contadores trifásicos constan de dos o tres sistemas de medida actuando sobre un mismo órgano móvil que acciona el mecanismo registrador.

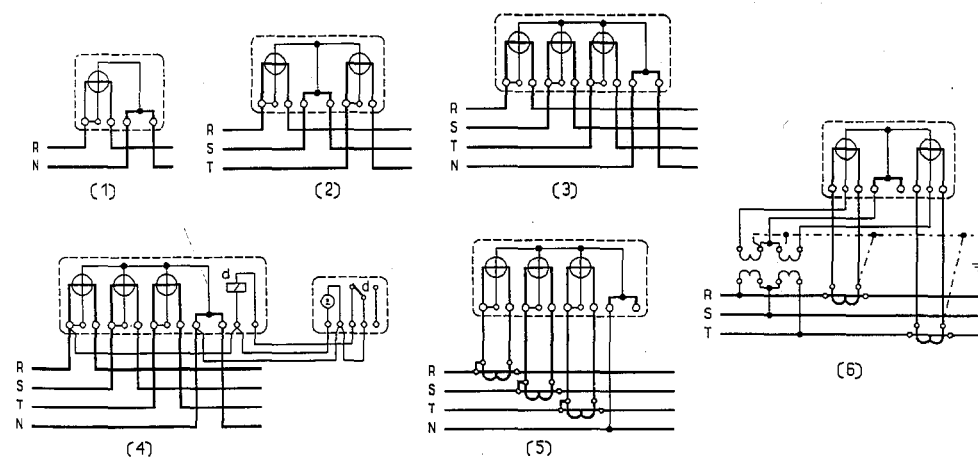


Fig. 7.2

Los contadores trifásicos de energía activa tienen unas conexiones que se corresponden con las conexiones de medida de potencia con vatímetros (fig. 7.2). El esquema (1) indica un contador monofásico conectado directamente; los esquemas (2) y (3) indican contadores trifásicos a tres y cuatro hilos conectados directamente; el esquema (4) es de un contador trifásico a cuatro hilos con doble tarifa y reloj para cambio de la misma; el esquema (5) es de un contador trifásico a cuatro hilos conectado mediante transformadores de intensidad, y el esquema (6) corresponde a un contador a tres hilos para medida en alta tensión, conectado mediante transformadores de intensidad y de tensión.

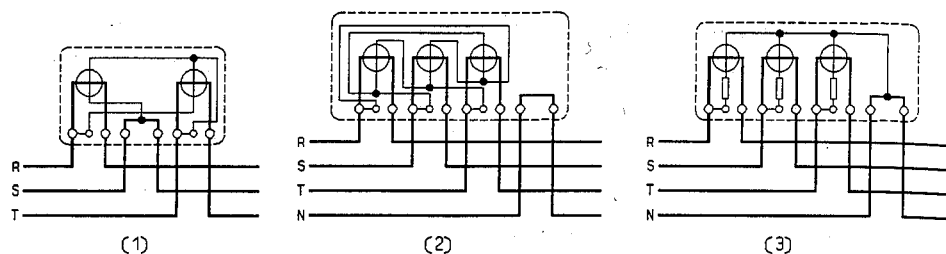


Fig. 7.3

Se construyen contadores trifásicos de energía reactiva, que tienen sus bobinas conexas de forma que miden en función del seno del ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad (fig. 7.3). El esquema (1) corresponde a un contador trifásico a tres hilos, en el que la conexión de las fases en la sucesión que se indica hace que la medida sea de energía reactiva. El esquema (2) es de un contador trifásico a cuatro hilos, y el esquema (3) indica un contador en el cual el desfase necesario entre los flujos magnéticos para la medida de energía reactiva, se consigue mediante una resistencia óhmica en serie con la bobina de tensión y otra resistencia en paralelo con la bobina de intensidad (que no se representa). Este último contador no se suele utilizar por tener fácilmente averías y un consumo interno alto.

Se construyen contadores especiales de energía eléctrica; los más usados son:

- **Contadores de doble o de triple tarifa.** Constan de un impulsor y dos o tres mecanismos totalizadores, uno para cada tarifa (punta, llano y valle). Mediante un interruptor horario, queda acoplado al eje de giro del contador el mecanismo totalizador que corresponde según la hora.

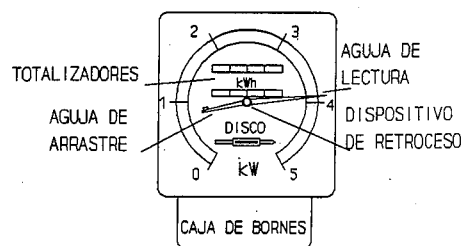


Fig. 7.4

- **Contadores de máxima.** Constan, además del totalizador (fig. 7.4), de un mecanismo que señala la potencia máxima durante un período de tiempo (indicador) o la registran mediante un trazo en una cinta de papel (registrador). El contador con indicador de máxima lleva una escala graduada en kW. Una aguja de arrastre indica la máxima potencia durante 15 minutos, arrastra la aguja de lectura y vuelve a cero. La aguja indicadora registra la potencia máxima consumida en un tiempo. Cuando se efectúa la lectura del contador por parte de la empresa suministradora de energía, se coloca la aguja de lectura en la posición de cero. Se utilizan también maxímetros acumulativos, que en lugar de las agujas indicadoras están provistos de sistema mecánico que indica, mediante dígitos, la potencia media en cada período, la potencia máxima en cada período de facturación y la potencia que acumula cada vez que se pone a cero.

7.3. CONTADORES DE IMPULSOS

Utilizados en telemedida, que consiste en la medida y control de la energía consumida por un usuario por sistemas de control a distancia.

Para el sistema de telemedida son necesarios:

- Contadores de energía con emisor de impulsos. Un detector del giro del disco transforma esta señal en impulsos u oscilaciones de frecuencia.
- Equipo de concentradores de impulsos que reciben los impulsos de los contadores.
- Sistemas de transmisión de la información a través de la red de la energía eléctrica o de la red telefónica.

Los contadores de impulsos de energía activa y reactiva envían sus señales a un aparato llamado *tarificador*, que las convierte en unidades de energía y de potencia, y puede programarse según los períodos horarios y potencias contratadas.

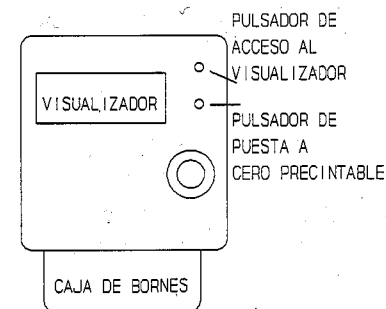


Fig. 7.5

7.4. CONTADORES ELECTRÓNICOS

Son sistemas estáticos con medida digital, formados por circuitos electrónicos. Son de gran precisión y de poco consumo. Estos contadores incorporan en un solo aparato las funciones de: contador de activa, contador de reactiva, maxímetro e interruptor horario. Los datos se visualizan en una pantalla de cristal líquido (fig. 7.5). Se programan según la tarifa eléctrica y pueden proporcionar datos sobre factor de potencia, energía aparente, fecha de la última lectura, etc.

7.5. REGLETAS DE VERIFICACIÓN

La regleta de verificación es un elemento de comprobación que se sitúa entre los transformadores de medida y los contadores. Esta regleta permite:

- Comprobar el funcionamiento de los contadores.
- Conexionar los contadores a los transformadores de medida y desconectar los contadores sin interrumpir el suministro de energía.

7.6. COEFICIENTE DE FACTURACIÓN

Es el valor por el que se multiplica la lectura del contador para obtener la energía consumida.

$$\text{El coeficiente de facturación } C_F = \frac{m_1}{m_c} C_M$$

m_1 : Relación de transformación del transformador de intensidad.

m_c : Relación de transformación del contador.

C_M : Constante mecánica del contador (suele ser potencia de 10).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.6-1 Un contador de relación 75/5 A y constante mecánica 10, se conecta mediante transformadores de intensidad 150/5 A. Calcular el coeficiente de facturación.

$$\text{El coeficiente de facturación } C_F = \frac{m_1}{m_c} C_M = \frac{150/5}{75/5} 10 = 20$$

7.6-2 Un contador de energía activa tiene de relación 200/5 A y de constante mecánica 1. El contador de energía reactiva tiene de relación 100/5 A y constante mecánica 10. El cuadro de medida se conecta mediante transformadores de intensidad de relación 200/5 A. Calcular:

- Coeficiente de facturación del contador de activa.
- Coeficiente de facturación del contador de reactiva.

Solución: a) 1; b) 20.

7.6-3 Un cuadro de medida en B.T. consta de un contador de energía activa de relación 300/5 A y constante mecánica 100, con máximo de constante mecánica 10; un contador de energía reactiva de relación 200/5 A y constante mecánica 10. Los aparatos se conectan mediante transformadores de intensidad de relación 300/5 A. Calcular:

- Coeficiente de facturación del contador de activa.
- Coeficiente de facturación del máximo.
- Coeficiente de facturación del contador de reactiva.

Solución: a) 100; b) 10; c) 15.

7.6-4 Los aparatos de medida de un cuadro de B.T. están contruidos para conectarse a cualquier transformador de intensidad (relación 5/5). El contador de energía activa de 2,5 (7,5) A tiene una constante mecánica de 1. El máximo tiene de constante mecánica

0,1 y el contador de energía reactiva, de 3 (6) A, tiene de constante mecánica 1. El cuadro de medida se conecta mediante transformadores de intensidad de relación de transformación 300/5 A. Calcular:

- Coeficiente de facturación del contador de activa.
- Coeficiente de facturación del máximo.
- Coeficiente de facturación del contador de reactiva.

Solución: a) 60; b) 6; c) 60.

7.7. MEDIDA DEL FACTOR DE POTENCIA CON VOLTÍMETRO, AMPERÍMETRO Y VATÍMETRO

El factor de potencia instantáneo de una instalación es el cociente entre la potencia activa (P) y la aparente (S).

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Con el vatímetro se mide la potencia activa y con el voltímetro y el amperímetro se halla la potencia aparente. Este método puede usarse en un circuito monofásico o en un circuito trifásico equilibrado.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.7-1 A la línea de alimentación de una instalación monofásica se conecta un vatímetro, un voltímetro y un amperímetro, que indican 950 W, 223 V y 5 A respectivamente. Calcular el factor de potencia.

$$\text{La potencia aparente } S = VI = 223 \cdot 5 = 1\,115 \text{ VA}$$

$$\text{El factor de potencia } \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{950}{1\,115} = 0,852$$

7.7-2 Se desea medir la potencia consumida por una instalación trifásica equilibrada a cuatro hilos, mediante un vatímetro, voltímetro y amperímetro, para medir la potencia, la tensión y la intensidad de fase. Si las medidas indicadas por los aparatos son: 1,7 kW, 220 V y 9 A. Calcular:

- Potencia activa absorbida por la instalación.
- Potencia aparente.
- Potencia reactiva.
- Factor de potencia.

Solución: a) 5,1 kW; b) 5,94 kVA; c) 3,045 kVar; d) 0,859.

7.8. MEDIDA DEL FACTOR DE POTENCIA CON FASÍMETRO

El fasímetro es un aparato electrodinámico. Consta esencialmente de una bobina fija y dos bobinas móviles (fig. 7.6), solidarias entre sí y con el índice.

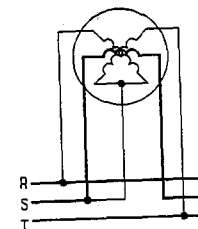


Fig. 7.6

Su funcionamiento está basado en que la bobina fija, conectada en serie con la carga, produce un campo magnético alternativo; mientras que las dos bobinas móviles crean un campo magnético giratorio al conectarlas a la tensión de la red (en un sistema monofásico estas dos bobinas se conectan en paralelo pero sus corrientes están desfasadas 90° mediante resistencias y bobinas de elevado coeficiente de autoinducción; mientras que en un sistema trifásico las dos bobinas se conectan a distintas fases).

La acción entre los dos campos magnéticos hace desplazarse el órgano móvil con el índice que indica sobre una escala el factor de potencia.

La conexión a la red de las bobinas móviles se realiza por cintas, de manera que el órgano móvil no tiene momento antagonista y el índice puede estar en cualquier posición en ausencia de corriente.

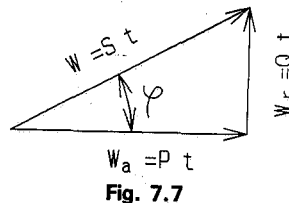
7.9. MEDIDA DEL FACTOR DE POTENCIA CON ANALIZADOR DE REDES

Se fabrican aparatos electrónicos, que se conectan a la tensión de una red de B.T. y disponen de pinzas amperimétricas (transformadores de intensidad con núcleo magnético partido, para permitir la colocación dentro del mismo del conductor cuya intensidad se quieren medir). Estos aparatos permiten comprobar el consumo de una instalación: tensión, intensidad, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia. Los datos se observan en una pantalla de cristal líquido, pudiendo además registrarse en papel.

7.10. MEDIDA DEL FACTOR DE POTENCIA CON CONTADORES DE ENERGÍA ACTIVA Y REACTIVA

El factor de potencia medio de una instalación es el cociente entre la energía activa W_a y la aparente W consumidas en un mismo intervalo de tiempo.

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{W}$$



La energía activa la mide el contador de energía activa y la energía aparente puede calcularse en función de la activa y de la reactiva W_r , medida con el contador de energía reactiva. Según el triángulo de energías (fig. 7.7):

$$W = \sqrt{W_a^2 + W_r^2}$$

Con las indicaciones del contador de energía activa y reactiva se calcula el factor de potencia medio de la instalación:

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.10-1 Las indicaciones de los contadores de un local en el momento de efectuar la medición son 78 523 kWh el de activa y el de reactiva 95 050 kVarh. Dentro de un mes, los contadores indican: 80 113 kWh y 97 631 kVarh. Calcular el factor de potencia medio de la instalación.

El factor de potencia medio:

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{80\,113 - 78\,523}{\sqrt{(80\,113 - 78\,523)^2 + (97\,631 - 95\,050)^2}} = 0,525$$

7.10-2 Un local comercial consume en dos meses una energía activa de 2 300 kWh y una energía reactiva 1 230 kVarh. Calcular el factor de potencia medio en ese tiempo.

Solución: 0,882.

7.11. TARIFAS ELÉCTRICAS

Las tarifas aplicables al suministro de energía eléctrica son de estructura binómica, con un término de potencia T_p (función de la potencia que el usuario contrata con la compañía suministradora y de la demanda de potencia que ha existido) y otro término de energía T_e (proporcional al consumo de energía). La suma de estos dos términos se llama facturación básica (BOE 14-01-95).

A la facturación básica se le añaden complementos de recargo o descuento en función de la energía reactiva consumida, de la discriminación horaria, estacionalidad, etc. Además se le añaden a la facturación los impuestos, y los alquileres de los equipos de medida si son propiedad de la empresa suministradora.

El término de potencia se calcula multiplicando la potencia de facturación P_f por el precio unitario a :

$$T_p = P_f \cdot a$$

El término de energía se calcula multiplicando la energía activa consumida W_a por el precio unitario b :

$$T_e = W_a \cdot b$$

El precio unitario, para el término de potencia y para el término de la energía consumida, se fija a principios del año y se publica en el Boletín Oficial del Estado.

Las facturaciones de energía suelen ser mensuales o bimestrales (cada dos meses).

7.12. TARIFAS ELÉCTRICAS EN BAJA TENSIÓN

En la tabla siguiente se indican las tarifas eléctricas de B.T. A cada una de ellas le corresponde un precio diferente de sus términos de potencia y energía, además de tener distintos complementos; por lo que es necesario en cada caso analizar que tarifa es más conveniente contratar y con qué potencia.

Tabla 7.1

TARIFA	APLICACIÓN	COMPLEMENTOS	EQUIPO DE MEDIDA
1.0	Suministros con potencia contratada no superior a 770 W.	Ninguno.	-Contador de energía activa.
2.0	Suministros con potencia contratada inferior o igual a 15 kW.	-Discriminación horaria nocturna.	-Contador de energía activa. -En tarifa nocturna: contador de energía activa de doble tarifa y reloj.
3.0	Suministros con cualquier tipo de potencia contratada.	-Energía reactiva. -Discriminación horaria.	-Contador de energía activa simple o con doble o triple tarifa, reloj y contador de energía reactiva. -Igual que el anterior y con transformadores de intensidad si el consumo es más de 63 A por fase. -Del mismo modo que los anteriores pero con uno, dos o tres maxímetros.
4.0	Similar a la tarifa 3.0 pero más económica para una utilización media de mayor duración.	-Energía reactiva. -Discriminación horaria.	-Igual que la tarifa 3.0.
R.0	Suministros de energía con destino a riegos agrícolas, para elevación o distribución de agua.	-Energía reactiva -Discriminación horaria	-Igual que la tarifa 3.0.
B.0	Suministros de energía para alumbrado público, contratados por las administraciones públicas. Esta tarifa no tiene término de facturación de potencia.	-Energía reactiva.	-Contador de energía activa y contador de energía reactiva. -Igual que el anterior y con transformadores de intensidad si el consumo es más de 63 A por fase.

7.13. POTENCIA DE FACTURACIÓN

Como principio general los clientes pueden elegir la potencia a contratar P_c . La potencia a facturar P_f , que va a marcar el término de potencia, se calcula de varios modos, según los contadores maxímetros.:

- **Modo 1. Sin contador maxímetro.** Se instala un interruptor de control de potencia o limitador, según la potencia contratada. Entonces $P_f = P_c$. La compañía suministradora de energía no está obligada al suministro monofásico con potencia superior a un interruptor de 63 A (13 860 W, para tensión de 220 V). Para suministros trifásicos los interruptores de control de potencia son multipolares.
- **Modo 2. Con un maxímetro.** Aplicable a cualquier suministro de B.T. o A.T., si se contrata una sola potencia y el abonado tiene el equipo de medida adecuado. El maxímetro indica en cada período de facturación la potencia máxima P_{\max} . La potencia a facturar depende de la relación entre esta potencia máxima y la potencia contratada, según la siguiente tabla.

Tabla 7.2

POTENCIA MÁXIMA	POTENCIA DE FACTURACIÓN
$P_{\max} < 0,85 \cdot P_c$	$P_f = 0,85 \cdot P_c$
$0,85 \cdot P_c \leq P_{\max} \leq 1,05 \cdot P_c$	$P_f = P_{\max}$
$P_{\max} > 1,05 \cdot P_c$	$P_f = P_{\max} + 2(P_{\max} - 1,05 \cdot P_c)$

No se tiene en cuenta la potencia máxima registrada durante las 24 horas siguientes a un corte de energía, siempre que pueda justificarse.

- **Modo 3. Con dos maxímetros.** Aplicable a cualquier suministro de B.T. o A.T., siempre que se hayan contratado dos potencia distintas (potencia en horas punta y llano P_{c12} , y potencia en valle P_{c3}), con una discriminación horaria tipo 3, 4 o 5 y si el abonado tiene el equipo de medida adecuado. Se calcula de la misma forma que en el modo 2 la potencia de facturación para cada potencia contratada P_{f12} y P_{f3} , según la indicación de potencia máxima de los dos maxímetros.
La potencia a facturar $P_f = P_{f12} + 0,2(P_{f3} - P_{f12})$
Si $(P_{f3} - P_{f12}) < 0$, esta resta se considera nula.
- **Modo 4. Con tres maxímetros.** Aplicable a cualquier suministro de B.T. o A.T. que haya contratado tres potencias distintas (potencia en horas punta P_{c1} , potencia en horas llano P_{c2} y potencia en horas valle P_{c3}), con discriminación horaria tipos 3, 4 o 5 y el abonado tenga el equipo de medida adecuado. Se calcula de la misma forma que en el modo 2 la potencia de facturación para cada potencia contratada en horas punta P_{f1} , en llano P_{f2} y en valle P_{f3} , según la indicación de potencia máxima de los tres maxímetros.
La potencia a facturar $P_f = P_{f1} + 0,5(P_{f2} - P_{f1}) + 0,2(P_{f3} - P_{f2})$
Si alguna resta $(P_{f1} - P_{f2}) < 0$, esta resta se considera nula y la potencia del sumando siguiente será $(P_{f2} - P_{f1})$.
- **Modo 5. Estacional.** Aplicable a suministros de A.T. que se acojan al complemento por estacionalidad. El abonado debe tener el equipo adecuado y el contrato debe coincidir en vigencia con la temporada eléctrica por 12 meses, prorrogable automáticamente. La facturación se realiza por períodos anuales, con facturaciones mensuales a cuenta. Hay dos tipos de cálculo de facturación A y B, aplicados en cada caso a un horario y calendario específico. El tipo A basado en seis potencias contratadas y utilizando 6 maxímetros. El tipo B basado en tres potencias contratadas y utilizando 3 maxímetros. Para calcular la potencia a facturar se utilizan también fórmulas (BOE 14-01-95), según la potencia contratada y la indicación de los maxímetros.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

- 7.13-1 La potencia contratada por una empresa es 50 kW. Calcular la potencia de facturación con indicación de un máxímetro (modo 2), en los casos siguientes:
- El máxímetro indica 60 kW.
 - El máxímetro indica 45 kW.
 - El máxímetro indica 42 kW.
- a) La potencia máxima $P_{\max}=60 \text{ kW} > 1,05 \cdot P_c=1,05 \cdot 50=52,5 \text{ kW}$
 La potencia de facturación $P_f=P_{\max} + 2(P_{\max} - 1,05 \cdot P_c)=60+2(60-52,5)=75 \text{ kW}$
- b) $0,85 \cdot P_c=0,85 \cdot 50=42,5 \text{ kW}$
 $P_{\max}=45 \text{ kW}; 42,5 < 45 < 52,5$. La potencia de facturación $P_f=45 \text{ kW}$
- c) $P_{\max}=42 \text{ kW} < 0,85 \cdot P_c=42,5 \text{ kW}$. La potencia de facturación 42,5 kW
- 7.13-2 El cuadro de medida de una empresa utiliza dos máxímetros (modo 3). La potencia contratada en horas punta-llano es de 100 kW y la potencia contratada en horas valle es de 200 kW. Calcular:
- Potencia de facturación en horas punta-llano si la indicación del máxímetro punta-llano es de 104 kW.
 - Potencia de facturación en horas valle si la indicación del máxímetro de valle es de 195 kW.
 - Potencia de facturación total.
- Solución: a) 104 kW; b) 195 kW; c) 122,2 kW.
- 7.13-3 El cuadro de medida de una empresa utiliza tres máxímetros (modo 4). La potencia contratada en horas punta es de 50 kW. La potencia contratada en horas llano es de 150 kW y la potencia contratada en horas valle es de 250 kW. Calcular:
- Potencia de facturación en horas punta si la indicación del máxímetro punta es de 51 kW.
 - Potencia de facturación en horas llano si la indicación del máxímetro de llano es de 120 kW.
 - Potencia de facturación en horas valle si la indicación del máxímetro de valle es de 245 kW.
 - Potencia de facturación total.
- Solución: a) 51 kW; b) 127,5 kW; c) 245 kW; d) 112,75 kW

7.14. COMPLEMENTO POR DISCRIMINACIÓN HORARIA

Consiste en un recargo o descuento sobre el consumo de energía, descontando en períodos de demanda baja (horas valle) y penalizando el consumo en períodos de alta demanda de energía (horas punta). Este complemento es obligatorio para todas las tarifas de A.T. y para las tarifas 3.0, 4.0 y R.0 de B.T. Con la tarifa 2.0, se puede optar por la discriminación horaria tipo 0 (tarifa nocturna).

El complemento por discriminación horaria C_H se calcula por la fórmula:

$$C_H = b_1 \frac{\sum W_i C_i}{100}$$

- C_H : Complemento de recargo o descuento (pts).
 W_i : Energía activa consumida en cada uno de los horarios para cada tipo de discriminación horaria (kWh).
 C_i : Coeficiente de recargo o descuento en cada uno de los horarios para cada tipo de discriminación horaria.
 b_1 : Precio unitario de la energía según la tarifa básica vigente y correspondiente a cada caso (tarifa 3.0 en B.T. y tarifa 2.1 en A.T. para uso general).

Hay seis tipos de discriminación horaria (desde el tipo 0 al tipo 5), y para cada uno de estos tipos se establecen cada día unos períodos horarios (punta, valle, llano). La energía consumida en estos períodos está sujeta a recargos o descuentos.

Los períodos horarios son diferentes según la zona geográfica, aunque el total de horas en cada período sea igual para todas las zonas. Según las regiones del país se establecen las horas consideradas punta, valle o llano para invierno y verano.

Los tipos de discriminación horaria son:

- Tipo 0** (tarifa nocturna). Igual para todas las zonas de aplicación. Es uniforme durante todo el año, con un precio de la energía durante 16 horas al día (punta y llano) y otro precio durante 8 horas al día (valle).
- Tipo 1**. Igual para todas las zonas de aplicación. Discriminación horaria sin contador de tarifa múltiple. Coeficiente de +20% sobre la totalidad de la energía consumida. El contador de energía activa de tarifa múltiple es obligatorio para más de 50 kW de potencia contratada.
- Tipo 2** (doble tarifa). Igual para todas las zonas de aplicación. Coeficiente de +40% durante cuatro horas al día (punta) y sin variación las restantes 20 horas (valle y llano). En la figura 7.8 se representa el esquema de

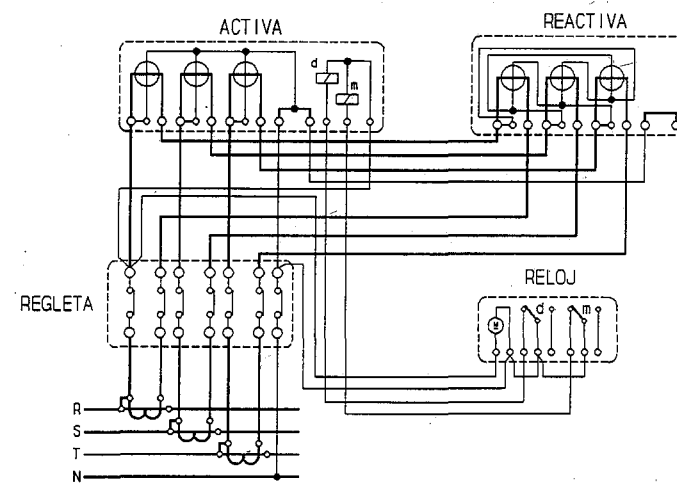


Fig. 7.8

medida indirecta en B.T. con doble tarifa y máxímetro. La regleta de verificación, situada entre los transformadores de intensidad y los contadores, permite la comprobación del funcionamiento de estos. El reloj

conmutador horario permite cambiar la tarifa y marcar los períodos de funcionamiento del maxímetro. En lugar de relojes mecánicos se utilizan también relojes electrónicos programables.

- **Tipo 3** (triple tarifa diaria). Variable para cada zona de aplicación la entrada y salida de las horas de punta, valle y llano. Dentro de una zona también varían según sea horario de invierno o de verano. Los coeficientes son: 4 horas (punta) al día con un coeficiente de +70%; 8 horas (valle) con un coeficiente de -43% y las 12 horas restantes (llano) sin variación.
- **Tipo 4** (triple tarifa anual). Variable para cada zona de aplicación igual que el tipo 3. Los coeficientes son: 6 horas al día (punta) con un coeficiente +100%; 10 horas (valle) con un coeficiente de -43% y las restantes 8 horas (llano) sin variación. Los sábados, domingos y días festivos a nivel nacional se consideran como horas valle, por lo que este tipo 4 es adecuado para los abonados que tienen un fuerte consumo en fines de semana y días festivos.
- **Tipo 5** (quíntuple tarifa). Variable para cada zona de aplicación y dentro de cada zona variable para invierno y verano. Se basa en dividir los días del año en cuatro categorías. En estas categorías se acumulan los consumos según un horario y calendario prefijado. Cada año hay 70 días pico, 80 días alto, 80 días medio y los restantes días se clasifican en la categoría baja. Estos días los fija cada año la Dirección General de Energía. Los coeficientes de discriminación horaria son diferentes para cada tipo de día y para horas punta, llano o valle.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.14-1 Una vivienda con discriminación horaria tipo 0 (tarifa nocturna) consume en dos meses 162 kWh por el día y por la noche 74 kWh. Calcular el término de energía, si el precio unitario de ésta es de 15,01 pts/kWh para la energía consumida de día y de 6,81 pts/kWh para la energía consumida por la noche¹.

El precio de la energía $162 \cdot 15,01 + 74 \cdot 6,81 = 2935,56$ pts.

7.14-2 Calcular el complemento por discriminación horaria para un consumo de energía activa de 760 kWh, con discriminación horaria tipo 1 (sin contador de tarifa múltiple) si el precio unitario de la energía para la tarifa 3.0 es de 13,51 pts/kWh.

El complemento por discriminación horaria:

$$C_H = b_1 \frac{\sum W_i C_i}{100} = 13,51 \frac{760 \cdot 20}{100} = 2054 \text{ pts.}$$

¹Precios de 1998 (BOE 27-12-97).

7.14-3 Calcular el complemento por discriminación horaria para un consumo de energía activa en horas punta de 1800 kWh, con discriminación horaria tipo 2 (doble tarifa), si el precio unitario de la energía es de 13,51 pts/kWh.

Solución: 9727 pts.

7.14-4 Calcular el complemento por discriminación horaria con tipo 3 (triple tarifa diaria), para un consumo de energía activa en horas punta de 5800 kWh, en horas llano de 12400 kWh y en horas valle 16700 kWh. El precio unitario de la energía es de 13,51 pts/kWh.

El complemento por discriminación horaria:

$$C_H = b_1 \frac{\sum W_i C_i}{100} = 13,51 \frac{5800 \cdot 70 - 16700 \cdot 43}{100} = -42165 \text{ pts.}$$

7.14-5 Calcular el complemento por discriminación horaria con tipo 4 (triple tarifa anual), para un consumo de energía activa en horas punta de 8050 kWh, en horas valle de 7400 kWh y en sábados y festivos 13500 kWh. El precio unitario de la energía es de 13,51 pts/kWh.

Solución: -12659 pts.

7.15. COMPLEMENTO POR ENERGÍA REACTIVA

Recargo o descuento aplicable a la facturación básica (suma de los términos de potencia y energía). Para cualquier tarifa, excepto las tarifas 1.0 y 2.0. Los suministros acogidos a la tarifa 2.0 deberán tener como mínimo un factor de potencia medio de 0,8 (en caso contrario la compañía suministradora de energía puede instalar por su cuenta un contador de energía reactiva adecuado y aplicar el complemento de energía reactiva). Cuando la instalación tenga factor de potencia inferior a 0,55, puede obligarse al abonado a mejorarlo.

Determinado el factor de potencia medio con los contadores de energía activa y reactiva (con dos cifras decimales), el valor porcentual de recargo o bonificación se halla según la fórmula:

$$K_r \% = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21$$

Se considera un sólo decimal y no se aplicarán recargos superiores al 47% ni descuentos superiores al 4%.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.15-1 Un local consume bimestralmente 7500 kWh de energía activa y 5350 kVarh. Calcular:

- Factor de potencia medio.
- Complemento por energía reactiva si el contador de activa no tiene discriminación horaria.

$$a) \text{ El factor de potencia medio } \cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{7\,500}{\sqrt{7\,500^2 + 5\,350^2}} = 0,814$$

b) El valor porcentual de recargo por complemento por energía reactiva:

$$K_r \% = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21 = \frac{17}{0,81^2} - 21 = 4,9\%$$

7.15-2 Un comercio con contador de doble tarifa, consume bimestralmente en horas punta 3 500 kWh, en horas llano y valle 7 400 kWh. El consumo de energía reactiva en ese tiempo es de 5 340 kVArh. Calcular:

- Factor de potencia medio.
- Complemento por energía reactiva.

Solución: a) 0,9; b) 0%

7.15-3 Un taller con contador de triple tarifa, consume bimestralmente en horas punta 13 400 kWh, en horas llano 22 430 kWh y en horas valle 27 400 kWh. El consumo de energía reactiva en ese tiempo es de 10 340 kVArh. Calcular:

- Consumo total de energía activa.
- Factor de potencia medio.
- Complemento por energía reactiva.

a) La energía activa total $W_a = 13\,400 + 22\,430 + 27\,400 = 63\,230$ kWh

$$b) \text{ El factor de potencia medio } \cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{63\,230}{\sqrt{63\,230^2 + 10\,340^2}} = 0,99$$

b) El valor porcentual de recargo por complemento por energía reactiva:

$$K_r \% = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21 = \frac{17}{0,99^2} - 21 = -3,7\% \text{ (descuento)}$$

7.15-4 Un local de hostelería con contador de triple tarifa y discriminación de festivos (tipo 4), consume bimestralmente en horas punta 10 400 kWh, en horas llano 20 430 kWh y en horas valle 7 400 kWh. El consumo en sábados y festivos es de 21 340 kWh. El consumo de energía reactiva es de 22 340 kVArh. Calcular:

- Consumo total de energía activa.
- Factor de potencia medio.
- Complemento por energía reactiva.

Solución: a) 59,57 kWh; b) 0,94; c) -1,8%

7.16. COMPLEMENTO POR ESTACIONALIDAD

Se aplica al término de energía cuando se elige el modo 5 de cálculo de potencia de facturación.

Los coeficientes serán: +10% para la energía medida en temporada eléctrica alta y -10% para la medida en la temporada baja. La energía medida en la temporada eléctrica media permanece sin variación.

7.17. COMPLEMENTO POR INTERRUMPIBILIDAD

Utilizable en grandes consumos (mínimo 5 MW). El abonado interrumpe el consumo de toda o parte de la potencia contratada en momentos de gran demanda de energía. La compañía suministradora y el abonado establecen un contrato, en los que además del modo de facturación de potencia, potencia contratada y tipo de discriminación horaria, se especifican las interrupciones, tipo de interrupciones según las horas de interrupción, etc.

7.18. OTROS CONCEPTOS DE LA FACTURACIÓN

- Alquiler del equipo de medida.** Cuando los aparatos de medida son propiedad de la empresa suministradora de energía.
- Impuesto sobre electricidad.** Es el 4,864% sobre los términos de potencia, energía y complementos, multiplicados por un coeficiente regulador de 1,05113.²
- Impuesto sobre el valor añadido (IVA).** Se utiliza el tipo general 16% sobre el valor total.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.18-1 Una vivienda con tarifa 2.0 y potencia contratada 5,5 kW consume en dos meses 637 kWh. Calcular:

- Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 257 pts/kW·mes.
- Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 14,61 pts/kWh.
- Facturación total, si el alquiler del contador es de 106 pts/mes.

$$a) T_p = 5,5 \cdot 257 \cdot 2 = 2\,827 \text{ pts.}$$

$$b) T_e = 637 \cdot 14,61 = 9\,307 \text{ pts.}$$

$$c) \text{ La suma de los dos términos de la facturación } T_p + T_e = 12\,134 \text{ pts.}$$

$$\text{El impuesto sobre la electricidad } IE = \frac{4,864}{100} \cdot 1,051130 \cdot 12\,134 = 620 \text{ pts}$$

$$\text{El alquiler del contador } 106 \cdot 2 = 212 \text{ pts.}$$

$$\text{El impuesto sobre el valor añadido IVA} = \frac{16}{100} \cdot (12\,134 + 620 + 212) = 2\,075 \text{ pts}$$

$$\text{Facturación total} = T_p + T_e + IE + \text{Alquiler} + IVA$$

$$12\,134 + 620 + 212 + 2\,075 = 15\,041 \text{ pts.}$$

7.18-2 Una vivienda con tarifa 2.0 y discriminación horaria nocturna (tipo 0), tiene de potencia contratada 4,4 kW y consume bimestralmente durante el día (horas punta y llano) 143 kWh. Durante la noche (horas valle) el consumo es de 45 kWh. Calcular:

- Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 257 pts/kW·mes.
- Término de energía de consumo día, si el precio unitario es de 15,01 pts/kWh.

²Ley de acompañamiento de los presupuestos (BOE 31-12-97)

- c) Término de energía de consumo noche, si el precio unitario es de 6,81 pts/kWh.
 d) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.
 Solución: a) 2 262 pts.; b) 2 146 pts.; c) 306 pts.; d) 5 748 pts.

7.18-3 Un local con tarifa 3.0, sin discriminación horaria (tipo 1) y potencia contratada 13,86 kW, tiene un consumo bimestral de energía activa de 2 350 kWh y de energía reactiva de 1 865 kVArh. Calcular:

- a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 231 pts/kW·mes.
 b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 13,51 pts/kWh.
 c) Complemento por discriminación horaria.
 d) Complemento por energía reactiva.
 e) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.
 a) $T_p = 13,86 \cdot 231 \cdot 2 = 6 403$ pts.
 b) $T_e = 2 350 \cdot 13,51 = 31 749$ pts.

La suma de los dos términos de la facturación $T_p + T_e = 38 152$ pts.

- c) El complemento por discriminación horaria:

$$C_H = b_1 \frac{\sum W_i C_i}{100} = 13,51 \frac{2 350 \cdot 20}{100} = 6 350 \text{ pts.}$$

- d) El factor de potencia medio $\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{2 350}{\sqrt{2 350^2 + 1 865^2}} = 0,78$

El valor porcentual de recargo por complemento por energía reactiva:

$$K_r \% = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21 = \frac{17}{0,78^2} - 21 = 6,9 \%$$

El recargo por energía reactiva $\frac{6,9}{100} \cdot 38 152 = 2 632$ pts

- e) El impuesto sobre la electricidad:

$$IE = \frac{4,864}{100} \cdot 1,051130 \cdot (38 152 + 6 350 + 2 632) = 2 410 \text{ pts}$$

El impuesto sobre el valor añadido:

$$IVA = \frac{16}{100} \cdot (38 152 + 6 350 + 2 632 + 2 410) = 7 927 \text{ pts}$$

Facturación total:

$$T_p + T_e + C_H + \text{Recargo por energía reactiva} + IE + IVA \\ 38 152 + 6 350 + 2 632 + 2 410 + 7 927 = 57 471 \text{ pts.}$$

7.18-4 Un local con tarifa 3.0, discriminación horaria con doble tarifa (tipo 2) y potencia contratada 13,86 kW, tiene un consumo bimestral de energía activa en horas punta de 664 kWh y en horas llano y valle de 1 250 kWh. El consumo de energía reactiva es de 1 661 kVArh. Calcular:

- a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 231 pts/kW·mes.
 b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 13,51 pts/kWh.
 c) Complemento por discriminación horaria.

- d) Complemento por energía reactiva.
 e) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.
 Solución: a) 6 403 pts.; b) 25 858 pts.; c) 3 588 pts.; d) 2 710 pts.; e) 47 015 pts.

7.18-5 Una industria con tarifa 3.0, discriminación horaria con triple tarifa (tipo 3) y potencia contratada 33 kW, tiene un consumo bimestral de energía activa en horas punta de 4 130 kWh, en horas llano de 6 620 kWh y en horas valle de 8 117 kWh. El consumo de energía reactiva es de 6 953 kVArh. Calcular:

- a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 231 pts/kW·mes.
 b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 13,51 pts/kWh.
 c) Complemento por discriminación horaria.
 d) Complemento por energía reactiva.
 e) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.

Solución: 15 246 pts.; b) 254 893 pts.; c) -8 097 pts.; d) -4 862 pts.; e) 313 582 pts.

7.18-6 Una industria con tarifa 3.0, discriminación horaria con triple tarifa (tipo 4) y potencia contratada 66 kW, tiene un consumo bimestral de energía activa en horas punta de 6 152 kWh, en horas llano de 12 270 kWh y en horas valle de 5 500 kWh. En sábados y festivos el consumo es de 12 723 kWh. El consumo de energía reactiva es de 12 270 kVArh. Calcular:

- a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 231 pts/kW·mes.
 b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 13,51 pts/kWh.
 c) Complemento por discriminación horaria.
 d) Complemento por energía reactiva.
 e) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.

Solución: a) 30 492 pts.; b) 495 074 pts.; c) -22 749 pts.; d) -11 562 pts.; e) 598 990 pts.

7.18-7 Una industria con tarifa 4.0, discriminación horaria con triple tarifa (tipo 3) y potencia contratada 33 kW, tiene un consumo bimestral de energía activa en horas punta de 2 560 kWh, en horas llano de 3 860 kWh y en horas valle de 1 350 kWh. El consumo de energía reactiva es de 4 840 kVArh. Calcular:

- a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 368 pts/kW·mes.
 b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 12,34 pts/kWh.
 c) Complemento por discriminación horaria, si el precio de la energía para la tarifa 3.0 es de 13,51 pts/kWh.
 d) Complemento por energía reactiva.
 e) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.
 Solución: a) 24 288 pts.; b) 95 882 pts.; c) 16 367 pts.; d) 3 004 pts.; e) 170 143 pts.

7.18-8 Un alumbrado público con tarifa B.0, tiene de potencia contratada 13,2 kW. El consumo bimestral de energía activa es de 2 540 kWh y el de energía reactiva es de 1 830 kVArh. Calcular:

- a) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 11,76 pts/kWh.

- b) Complemento por energía reactiva.
c) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.

$$a) T_p = 13,2 \cdot 0 = 0 \text{ pts.}$$

$$T_e = 2\,540 \cdot 11,76 = 29\,870 \text{ pts.}$$

La suma de los dos términos de la facturación $T_p + T_e = 29\,870 \text{ pts.}$

$$b) \text{ El factor de potencia medio } \cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{2\,540}{\sqrt{2\,540^2 + 1\,830^2}} = 0,81$$

El valor porcentual de recargo por complemento por energía reactiva:

$$K_r \% = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21 = \frac{17}{0,81^2} - 21 = 4,9\%$$

$$\text{El recargo por energía reactiva } \frac{4,9}{100} \cdot 29\,870 = 1\,464 \text{ pts}$$

- c) El impuesto sobre la electricidad:

$$IE = \frac{4,864}{100} \cdot 1,051130 \cdot (29\,870 + 1\,464) = 1\,602 \text{ pts}$$

El impuesto sobre el valor añadido:

$$IVA = \frac{16}{100} \cdot (29\,870 + 1\,464 + 1\,602) = 5\,270 \text{ pts}$$

Facturación total:

$$T_p + T_e + \text{Recargo por energía reactiva} + IE + IVA$$

$$0 + 29\,870 + 1\,464 + 1\,602 + 5\,270 = 38\,206 \text{ pts.}$$

7.18-9 Un riego agrícola con tarifa R.0, tiene de potencia contratada 9,9 kW. El consumo bimestral de energía activa en horas punta es nulo y en horas llano y valle es de 940 kWh. El consumo de energía reactiva es de 430 kVAh. Calcular:

- a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 53 pts/kW·mes.
b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 12,49 pts/kWh.
c) Complemento por discriminación horaria.
d) Complemento por energía reactiva.

- e) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.

Solución: a) 1049 pts.; b) 11 741 pts.; c) 0 pts.; d) -64 pts.; e) 15 517 pts.

7.18-10 Una vivienda con tarifa 1.0 y potencia contratada 0,75 kW consume en dos meses 110 kWh. Calcular:

- a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 46 pts/kW·mes.
b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 10,30 pts/kWh.
c) Facturación total, si es nulo el alquiler del contador.

Solución: a) 69 pts.; b) 1 133 pts.; c) 1 465 pts.

7.19. TARIFAS ELÉCTRICAS EN MEDIA TENSIÓN

Las tarifas de uso general para alta tensión no superior de 36 kV son las indicadas en la tabla siguiente:

Tabla 7.3

TARIFA	UTILIZACIÓN	COMPLEMENTOS	EQUIPO DE MEDIDA
1.1	Cualquier suministro, para corta utilización.	-Por energía reactiva. -Por discriminación horaria. -Por estacionalidad.	-Contador de energía activa trifásico de simple, doble o triple tarifa. Contador trifásico de energía reactiva. Reloj. Transformador de tensión. Transformador de intensidad.
2.1	Cualquier suministro, para media utilización.	-Por interrumpibilidad.	
3.1	Cualquier suministro, para larga utilización.		-Igual que el anterior con uno o varios máxímetros.

Se utilizan también las tarifas de tracción (T.1), riegos agrícolas (R.1), y venta a distribuidores (D.1)

Los abonados pueden solicitar acogerse al modo estacional, con una vigencia de contrato de un año, dividido en tres períodos: temporada alta, media y baja.

Los abonados con gran consumo pueden acogerse al complemento de interrumpibilidad, permitiendo que en momentos de una gran demanda de energía por parte de los usuarios, se disponga de toda o parte de la potencia contratada por el abonado para ponerla a disposición del resto de los usuarios.

En la figura 7.9 se representa un cuadro de medida en alta tensión, con contador de activa de doble tarifa y máxímetro, contador de reactiva, interruptor horario, regletas de verificación y transformadores de tensión e intensidad.

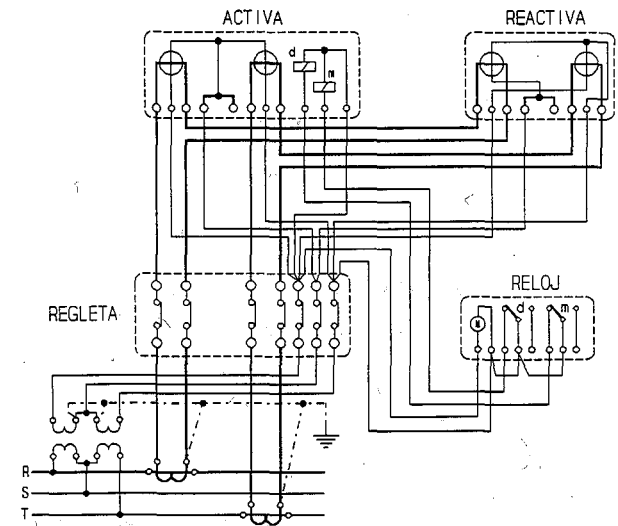


Fig. 7.9

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.19-1 Una empresa recibe energía eléctrica a 20 kV. La potencia contratada es 300 kW, con tarifa 1.1, triple tarifa (tipo 3) y máxímetro (modo 2). El consumo mensual de energía activa es en horas punta 5 340 kWh, en horas llano 12 340 kWh, y en horas valle 9 370 kWh. El consumo de energía reactiva es 10 765 kVAh. Calcular:

- a) Potencia de facturación, si el máxímetro indica 310 kW.
b) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 303 pts/kW·mes.
c) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 10,18 pts/kWh.
d) Complemento por discriminación horaria, si el precio de la energía para la tarifa 2.1 es de 9,15 pts/kWh.

- e) Complemento por energía reactiva.
f) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.

a) $0,85 P_c = 0,85 \cdot 300 = 255 \text{ kW}$

$1,05 P_c = 1,05 \cdot 300 = 315 \text{ kW}$

La potencia que indica el maxímetro $P_{\max} = 310 \text{ kW}$; $255 < 310 < 315$

La potencia de facturación $P_f = 310 \text{ kW}$

b) $T_p = 310 \cdot 303 = 93\,930 \text{ pts.}$

c) $T_e = (5\,340 + 12\,340 + 9\,370) \cdot 10,18 = 27\,050 \cdot 10,18 = 275\,369 \text{ pts.}$

La suma de los dos términos de la facturación $T_p + T_e = 369\,299 \text{ pts.}$

- d) El complemento por discriminación horaria:

$$C_H = b_1 \frac{\sum W_i C_i}{100} = 9,15 \frac{5\,340 \cdot 70 - 9\,370 \cdot 43}{100} = -2\,664 \text{ pts.}$$

e) El factor de potencia medio $\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{27\,050}{\sqrt{27\,050^2 + 10\,765^2}} = 0,93$

El valor porcentual de recargo por complemento por energía reactiva:

$$K_r \% = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21 = \frac{17}{0,93^2} - 21 = -1,3 \%$$

El recargo por energía reactiva $\frac{-1,3}{100} \cdot 369\,299 = -4801 \text{ pts (descuento)}$

- f) El impuesto sobre la electricidad:

$$IE = \frac{4,864}{100} \cdot 1,051130 \cdot (369\,299 - 2\,664 - 4\,801) = 18\,499 \text{ pts}$$

El impuesto sobre el valor añadido:

$$IVA = \frac{16}{100} \cdot (369\,299 - 2\,664 - 4\,801 + 18\,499) = 60\,853 \text{ pts}$$

Facturación total

$$T_p + T_e + C_H + \text{Recargo por energía reactiva} + IE + IVA$$

$$369\,299 - 2\,664 - 4\,801 + 18\,499 + 60\,853 = 441\,186 \text{ pts.}$$

7.19-2 Una empresa recibe energía eléctrica a 20 kV. La potencia contratada es 200 kW, con tarifa 1.1 y doble tarifa (tipo 2). El consumo mensual de energía activa es en horas punta 4 300 kWh, y en horas llano y valle 14 370 kWh. El consumo de energía reactiva es 10 860 kVArh. Calcular:

- a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 303 pts/kW·mes.
b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 10,18 pts/kWh.
c) Complemento por discriminación horaria, si el precio de la energía para la tarifa 2.1 es de 9,15 pts/kWh.
d) Complemento por energía reactiva.
e) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.

Solución: a) 60 600 pts; b) 190 061 pts; c) 15 738 pts; d) 5 13 pts; e) 330 934 pts.

7.19-3 Una industria recibe energía eléctrica a 20 kV. La potencia contratada es 40 kW, con tarifa 2.1 y con contador de triple tarifa (tipo 3). El consumo mensual de energía activa es 3 825 kWh en horas punta, 8 840 kWh en horas llano y 6 705 kWh en horas valle. El consumo de energía reactiva es 11 860 kVArh. Calcular:

- a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 617 pts/kW·mes.
b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 9,15 pts/kWh.
c) Complemento por discriminación horaria.
d) Complemento por energía reactiva.
e) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.

Solución: a) 24 680 pts; b) 177 236 pts; c) -1 882 pts; d) 5 048 pts; e) 250 058 pts.

7.19-4 Una empresa recibe energía eléctrica a 20 kV. La potencia contratada es 1 000 kW, con tarifa 3.1, triple tarifa (tipo 3) y maxímetro (modo 2). El consumo mensual de energía activa es en horas punta 59 430 kWh, en horas llano 17 145 kWh, y en horas valle 145 732 kWh. El consumo de energía reactiva es 120 465 kVArh. Calcular:

- a) Potencia de facturación, si el maxímetro indica 1 035 kW.
b) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 1 635 pts/kW·mes.
c) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 7,36 pts/kWh.
d) Complemento por discriminación horaria, si el precio de la energía para la tarifa 2.1 es de 9,15 pts/kWh.
e) Complemento por energía reactiva.
f) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.

Solución: a) 1 035 kW; b) 1 692 225 pts; c) 2 771 864 pts; d) -192 733 pts; e) 98 210 pts; f) 5 088 347 pts.

7.20. MEDIDA EN B.T. Y FACTURACIÓN EN A.T.

La energía suministrada en A.T. se mide en A.T., pero cuando el consumidor recibe energía en media tensión y dispone de un transformador interior de menos de 50 kVA o intemperie de más de 50 kVA, la medida puede realizarse en B.T..

La medida se realiza como en la tarifa 3.0 y se tienen en cuenta las pérdidas en los transformadores de la forma siguiente:

- La potencia base de facturación se aumenta un 4%.
- La energía consumida se aumenta un 4% y se suman 6 kWh cada mes por cada kVA de potencia del transformador.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.20-1 Una industria está alimentada por una línea de distribución a 20 kV, que se conecta a un transformador de 100 kVA, 20 000/380 V, situado a la intemperie sobre apoyo de hormigón. La potencia contratada en B.T. es de 33 kW. El consumo bimestral de energía activa es de 13 870 kWh y el de energía reactiva 8 550 kVArh. Calcular:

- a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 303 pts/kW·mes.

- b) Término de energía, si el precio unitario de ésta, para la tarifa 1.1, es de 10,18 pts/kWh.
- c) Complemento por discriminación horaria, si el precio para la tarifa 2.1 es de 9,15 pts/kWh.
- d) Complemento por energía reactiva.
- e) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.
- a) $T_p = (33 \cdot 1,04) \cdot 2 \cdot 303 = 20\,798$ pts.
- b) $T_e = (33\,870 \cdot 1,04 + 6 \cdot 100 \cdot 2) \cdot 10,18 = 159\,060$ pts.
- La suma de los dos términos de la facturación $T_p + T_e = 179\,858$ pts.
- c) El complemento por discriminación horaria:

$$C_H = b_1 \frac{\sum W_i C_i}{100} = 9,15 \frac{15\,624,8 \cdot 20}{100} = 28\,593 \text{ pts.}$$

- d) El factor de potencia medio: $\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{13\,870}{\sqrt{13\,870^2 + 8\,550^2}} = 0,85$

El valor porcentual de recargo por complemento por energía reactiva:

$$K_r \% = \frac{-17}{\cos^2 \varphi} - 21 = \frac{17}{0,85^2} - 21 = 2,5 \%$$

El recargo por energía reactiva: $\frac{2,5}{100} \cdot 179\,858 = 4\,496$ pts

- e) El impuesto sobre la electricidad:

$$IE = \frac{4,864}{100} \cdot 1,051130 \cdot (179\,858 + 28\,593 + 4\,496) = 10\,887 \text{ pts}$$

El impuesto sobre el valor añadido:

$$IVA = \frac{16}{100} \cdot (179\,858 + 28\,593 + 4\,496 + 10\,887) = 0,16 \cdot 223\,834 = 35\,813 \text{ pts}$$

Facturación total:

$$T_p + T_e + C_H + \text{Recargo por energía reactiva} + IE + IVA = 223\,894 + 35\,813 = 259\,707 \text{ pts.}$$

7.21. CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Generalmente los receptores funcionan con factor de potencia inductivo e inferior a la unidad. Un receptor funcionando con bajo factor de potencia consume una gran intensidad para una potencia activa determinada.

■ Causas de un bajo factor de potencia

Los receptores que hacen funcionar una instalación con bajo factor de potencia son principalmente:

- Motores asíncronos o de inducción. La potencia reactiva que consumen estos motores es prácticamente constante bajo cualquier condición de carga, por lo que el factor de potencia del motor es bajo cuando funciona en vacío o con cargas mucho menores que la nominal.

- Transformadores. Como en los motores, la potencia reactiva que consumen los transformadores (necesaria para mantener el flujo magnético) es prácticamente constante bajo cualquier condición de carga, aunque menor que en los motores. El factor de potencia de los transformadores baja cuando funcionan en vacío o con poca carga, pero es más alto que en los motores asíncronos.
- Lámparas de descarga. Tienen un bajo factor de potencia debido a la reactancia que se conecta en serie con la lámpara.
- Instalación de soldadura eléctrica. Por la elevada reactancia del transformador de soldadura, el factor de potencia es muy bajo.
- Rectificadores y onduladores. La utilización de tiristores en circuitos de conversión corriente continua/corriente alterna hace variar el factor de potencia según el momento de inicio de conducción.

■ Necesidad de compensar el factor de potencia

La intensidad que circula por una línea para suministrar una determinada potencia activa es inversamente proporcional al factor de potencia de la instalación.

En una línea trifásica, la intensidad de línea:

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi}$$

I_L : Intensidad de línea (A).

P : Potencia activa (W).

V_L : Tensión de línea (V).

Un factor de potencia bajo hace que la intensidad de línea sea elevada; ello provoca en la línea un aumento de la caída de tensión y de las pérdidas de energía por efecto Joule.

■ Modalidad de compensación

Para compensar la energía reactiva debida a los receptores inductivos se utilizan los elementos de compensación:

- Sistemas de condensadores. Utilizados en alta y media tensión en la mayoría de las instalaciones industriales. Para la corrección del factor de potencia se utilizan condensadores conectados en paralelo (fig. 7.10).
- Compensadores síncronos. En redes de gran potencia y de muy alta tensión se utilizan motores síncronos funcionando en vacío como condensadores síncronos (de forma que la intensidad vaya adelantada respecto a la tensión).

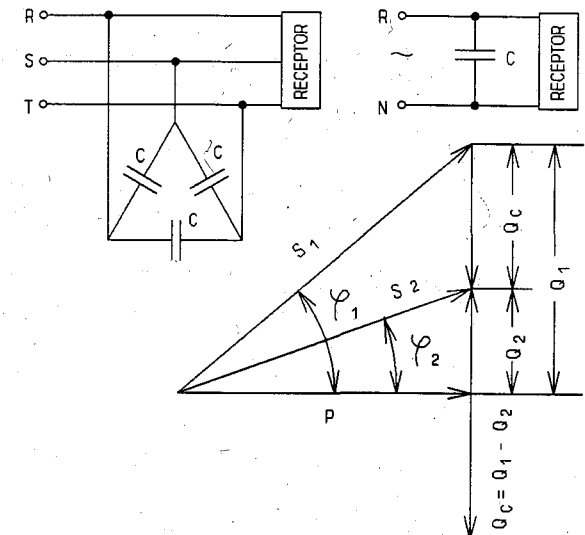


Fig. 7.10

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.21-1 Una instalación trifásica consume una potencia de 10,5 kW a 380 V, 50 Hz, con factor de potencia 0,6. Calcular:

- Intensidad de línea.
- Intensidad de línea si consume la misma potencia activa con factor de potencia 0,95.
- Potencia perdida en la línea de alimentación en los dos casos anteriores, si su resistencia es de 0,4 Ω/fase.

$$a) \text{ La intensidad de línea } I_{L1} = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi} = \frac{10\,500}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,6} = 26,6 \text{ A}$$

- Con factor de potencia 0,95, la intensidad de línea:

$$I_{L2} = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi} = \frac{10\,500}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,95} = 16,8 \text{ A}$$

- La potencia perdida en la línea con factor de potencia 0,6:

$$P_{p1} = 3 \cdot R_L \cdot I_{L1}^2 = 3 \cdot 0,4 \cdot 26,6^2 = 849,1 \text{ W}$$

La potencia perdida en la línea con factor de potencia 0,95:

$$P_{p2} = 3 \cdot R_L \cdot I_{L2}^2 = 3 \cdot 0,4 \cdot 16,8^2 = 338,7 \text{ W}$$

7.21-2 Una industria consume 33 kW con factor de potencia 0,8 y tensión 380 V, 50 Hz. Calcular:

- Intensidad de línea.
 - Intensidad de línea si se eleva el factor de potencia a 0,96.
 - Ahorro de energía en la línea de alimentación si su resistencia por fase es 0,41 Ω.
- Solución: a) 62,67 A; b) 52,22 A; c) 1 477 W.

7.22. CÁLCULO DE LA POTENCIA REACTIVA

El cálculo de la potencia reactiva Q_C de una batería de condensadores para corregir el factor de potencia de un receptor de potencia activa P , desde un valor de $\cos \varphi_1$ a otro $\cos \varphi_2$, se hace según el triángulo de potencias, representado en la figura 7.10.

$$Q_C = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

DEMOSTRACIÓN

Según el triángulo de potencias de la figura 7.10, la potencia reactiva inicial de la instalación:

$$Q_1 = P \operatorname{tg} \varphi_1$$

La potencia reactiva final, después de conectados los condensadores:

$$Q_2 = P \operatorname{tg} \varphi_2$$

La potencia reactiva compensada por los condensadores:

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.22-1 Una instalación alimentada por una línea trifásica de 380 V, 50 Hz, funciona consumiendo una potencia de 6 kW con un factor de potencia de 0,6 inductivo. Calcular:

- Potencia reactiva que debe tener una batería de condensadores para elevar el factor de potencia a 0,9.
- Capacidad de cada rama del triángulo de la batería de condensadores.

a) La potencia reactiva de capacidad:

$$Q_C = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

$$\cos \varphi_1 = 0,6; \quad \varphi_1 = 53,13^\circ; \quad \operatorname{tg} \varphi_1 = 1,333$$

$$\cos \varphi_2 = 0,9; \quad \varphi_2 = 25,84^\circ; \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = 0,484$$

$$Q_C = 6 \cdot (1,333 - 0,484) = 5,094 \text{ kVar}$$

- Partiendo de la potencia reactiva de capacidad, la capacidad del condensador:

$$Q_C = 3 X_C I_C^2; \quad I_C = \frac{V}{X_C}; \quad Q_C = 3 \frac{V^2}{X_C} = 3 \cdot 2 \pi f C V^2; \quad C = \frac{Q_C}{3 \cdot 2 \pi f V^2}$$

$$C = \frac{5\,094}{3 \cdot 2 \pi \cdot 50 \cdot 380^2} = 3,74 \cdot 10^{-5} \text{ F} = 37,4 \text{ } \mu\text{F}$$

7.22-2 Para medir la potencia consumida por un motor trifásico se utiliza un vatímetro trifásico, y para medir la tensión e intensidad de línea se utiliza un voltímetro y un amperímetro. Considerando el sistema trifásico equilibrado y siendo las indicaciones de los aparatos: 5 418 W, 380 V, 10,3 A. Calcular:

- Factor de potencia.
 - Potencia reactiva que debe tener una batería de condensadores conectada en triángulo para elevar el factor de potencia a 0,9.
 - Capacidad de cada rama del triángulo de la batería de condensadores.
- Solución: a) 0,8; b) 1,44 kVar; c) 10,6 μF.

7.22-3 Un motor eléctrico trifásico, de 15 kW, 380/220 V, 50 Hz, factor de potencia 0,82, tiene de rendimiento a plena carga 85%. Calcular:

- Potencia que consume el motor a plena carga.
 - Potencia reactiva necesaria de la batería de condensadores para elevar su factor de potencia a 0,93, cuando funciona a plena carga.
- Solución: a) 17 647 W; b) 5,35 kVar.

7.22-4 Una industria tiene un consumo mensual de energía activa de 31 450 kWh, y un consumo de energía reactiva de 32 345 kVarh. Calcular:

- Potencia media, considerando 22 días laborables al mes, si la industria trabaja 12 horas diarias. A plena carga durante 8 horas y a un cuarto de plena carga durante 4 horas.
- Factor de potencia medio.
- Potencia reactiva que debe tener la batería de condensadores para mejorar el factor de potencia a 0,95.

$$a) \text{ Tiempo diario total de consumo a plena carga: } 8 + \frac{1}{4} \cdot 4 = 9 \text{ horas}$$

$$\text{Horas mensuales } 22 \cdot 9 = 198 \text{ horas.}$$

$$\text{La potencia media: } \frac{31\,450}{198} = 159 \text{ kW}$$

b) Factor de potencia medio $\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{31\,450}{\sqrt{31\,450^2 + 32\,345^2}} = 0,697$

c) La potencia reactiva de capacidad:

$$Q_c = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

$$\cos \varphi_1 = 0,697; \quad \varphi_1 = 45,81^\circ; \quad \operatorname{tg} \varphi_1 = 1,029$$

$$\cos \varphi_2 = 0,95; \quad \varphi_2 = 18,19^\circ; \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = 0,329$$

$$Q_c = 159 \cdot (1,029 - 0,329) = 111 \text{ kVAr}$$

7.22-5 Una industria tiene un consumo mensual de energía activa de 6 542 kWh, y un consumo de energía reactiva de 4 552 kVArh. Calcular:

- Potencia media, considerando 22 días laborables al mes, si la industria trabaja 10 horas diarias. A plena carga durante 8 horas y a un cuarto de plena carga durante 2 horas.
- Factor de potencia medio.
- Potencia reactiva que debe tener la batería de condensadores para mejorar el factor de potencia a 0,96.

Solución: a) 35 kW; b) 0,82; c) 14,21 kVAr.

7.22-6 Una industria trabaja 16 horas diarias a plena carga con una total de 352 horas mensuales. En un año, el menor consumo mensual fue de 30 102 kWh y 32 880 kVArh, y el mayor consumo fue de 32 132 kWh y 35 295 kVArh. Calcular para estos dos consumos mensuales:

- Potencia media.
- Factor de potencia medio.
- Potencia reactiva que necesita la batería de condensadores para elevar el factor de potencia a 0,96.

Solución: a) 85,5 kW; 91,3 kW; b) 0,675; 0,673; c) 68,49 kVAr; 73,68 kVAr

7.23. INSTALACIÓN DE LA BATERÍA DE CONDENSADORES

■ Formas de compensación

La instalación de las baterías de condensadores para compensar el factor de potencia de la instalación puede realizarse:

- En el inicio de la instalación. Compensación global o centralizada, mediante la cual se compensa la energía reactiva total de la instalación.
- En las derivaciones a cuadros secundarios. Compensación parcial o de grupo, mediante la cual se compensa la energía reactiva consumida por varios receptores.
- En bornes de cada receptor. Compensación individual, con la batería de condensadores conectada directamente a los bornes de la carga. En motores asíncronos trifásicos la potencia reactiva de la batería debe estar comprendida entre el 20%-30% del valor de la potencia aparente absorbida.

Suele utilizarse la compensación global, con conexión en los bornes de los cuadros generales de B.T. Esta compensación puede efectuarse:

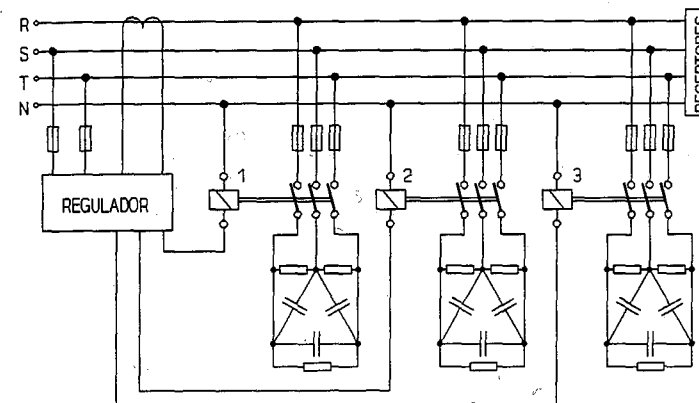


Fig. 7.11

- Por compensación automática, mediante un dispositivo automático regulador, medidor del factor de potencia, que conecta o desconecta escalones de baterías de condensadores según el factor de potencia del conjunto de la instalación. Los aparatos de maniobra pueden ser contactores (fig. 7.11), o interruptores estáticos a base de tiristores, que realizan la conexión de los distintos tramos de baterías de condensadores según la señal que reciben del regulador.
- Por una batería de condensadores de capacidad fija. En este caso la potencia reactiva de la batería en kVAr, no debe sobrepasar el 15% de la potencia nominal en kVA del transformador situado en el centro de transformación que alimenta la instalación, para evitar posibles elevaciones de tensión en caso de funcionamiento en vacío o con muy poca carga.

■ Conexión de la batería de condensadores

Debido a fenómenos transitorios, la intensidad de corriente en el instante de conexión puede ser elevada. En funcionamiento normal la batería de condensadores debe poder soportar una intensidad de corriente de 1,3 veces la nominal.

La conexión de la batería a la instalación de B.T. se realiza mediante:

- Aparatos de maniobra. Los aparatos utilizados en la conexión de la batería, interruptores y contactores, se dimensionan, igual que los conductores de conexión, para un valor mínimo igual a 1,5 veces la intensidad nominal de la batería.
- Fusibles. Utilizados para protección contra cortocircuitos, se dimensionan en baja tensión, para una intensidad 1,6 a 2 veces la intensidad nominal de la batería.

■ Desconexión de la batería de condensadores

Cuando se desconecta la batería de condensadores, ésta tiende a conservar el valor de la tensión del momento de desconexión; por lo que debe tener un circuito de descarga, que origine al cabo de un tiempo, la disminución de tensión por descarga de los condensadores.

Se utilizan resistencias de descarga, que pueden estar conectadas permanentemente o conectarse a la batería en el momento de la desconexión.

En la compensación individual de motores de elevada potencia pueden aparecer sobretensiones en el momento de la desconexión, si el motor continúa girando y los condensadores se descargan sobre sus devanados. Para evitarlo, la batería de condensadores se conecta con un aparato de maniobra independiente del de maniobra del motor.

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.7-1. El equipo de medida de una instalación tiene un contador de energía activa tiene de relación 200/5 A y constante mecánica 10. El contador de energía reactiva tiene de relación 100/5 A y constante mecánica 10. El cuadro de medida se conecta mediante transformadores de intensidad de relación 100/5 A. Calcular:

- Coefficiente de facturación del contador de activa.
- Coefficiente de facturación del contador de reactiva.

Solución: a) 5; b) 10

P.7-2. La potencia contratada por una empresa es 33 kW. Calcular la potencia de facturación con indicación de un máxímetro (modo 2), en el caso de que el máxímetro indique 35 kW.

Solución: 35,7 kW

P.7-3. En el cuadro de medida de un local se utilizan tres máxímetros (modo 4). La potencia contratada en horas punta es de 100 kW. La potencia contratada en horas llano es de 150 kW y la potencia contratada en horas valle es de 200 kW. Calcular la potencia de facturación total si la indicación del máxímetro punta es de 105 kW, la del máxímetro de llano es de 148 kW y la del máxímetro de valle es de 225 kW.

Solución: 147,9 kW.

P.7-4. Calcular el complemento por discriminación horaria con discriminación tipo 1 (sin contador de tarifa múltiple), para un consumo de energía activa de 850 kWh, si el precio unitario de la energía para la tarifa 3.0 es de 13,51 pts/kWh.

Solución: 2 297 pts.

P.7-5. Un local con contador de doble tarifa, consume bimestralmente en horas punta 3 460 kWh, en horas llano y valle 6 984 kWh. El consumo de energía reactiva en ese tiempo es de 4 750 kVArh. Calcular:

- Factor de potencia medio.
- Porcentaje de complemento por energía reactiva.

Solución: a) 0,91; b) -0,5%

P.7-6. Un local comercial con tarifa 3.0, con discriminación horaria de doble tarifa y potencia contratada 11 kW, tiene un consumo bimestral de energía activa en horas punta de 754 kWh y en horas llano y valle de 1 345 kWh. El consumo de energía reactiva es de 1 980 kVArh. Calcular:

- Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 231 pts/kW·mes.
- Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 13,51 pts/kWh.
- Complemento por discriminación horaria.
- Complemento por energía reactiva.
- Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.

Solución: a) 5 082 pts.; b) 28 357 pts.; c) 4 075 pts.; d) 3 645 pts.; e) 50 185 pts.

P.7-7. Una industria recibe energía eléctrica a 20 kV. La potencia contratada es 40 kW, con tarifa 2.1 y con contador de tarifa múltiple (tipo 3). El consumo mensual de energía activa es 3 166 kWh en horas punta, 7 598 kWh en horas llano y 5 699 kWh en horas valle. El consumo de energía reactiva es 11 750 kVArh. Calcular:

- Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 617 pts/kW·mes.
- Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 9,15 pts/kWh.
- Complemento por discriminación horaria.
- Complemento por energía reactiva.
- Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.

Solución: a) 24 680 pts.; b) 150 636 pts.; c) -2 145 pts.; d) 8 590 pts.; e) 221 623 pts.

P.7-8. A la línea de alimentación de una instalación trifásica, de frecuencia 50 Hz se conectan dos vatímetros para medir la potencia consumida, un amperímetro para medir la intensidad de línea y un voltímetro para medir la tensión de línea. Las medidas que indican los aparatos son: 8 654 W, 16,3 A y 380 V. Calcular:

- Factor de potencia.
- Potencia reactiva que debe tener la batería de condensadores conectada en triángulo para elevar el factor de potencia a 0,96.
- Capacidad de cada rama de la batería de condensadores conectada en triángulo.

Solución: a) 0,807; b) 3 808 VAR; c) 28 μ F.

P.7-9 Una industria trabaja 16 horas diarias a plena carga con una total de 352 horas mensuales. En un año, el mayor consumo mensual fue de 32 395 kWh y 34 982 kVArh. Calcular:

- Potencia media.
- Factor de potencia medio.
- Potencia reactiva que necesita la batería de condensadores para elevar el factor de potencia a 0,97.

Solución: a) 92 kW; b) 0,679; c) 76,4 kVAr.

P.7-10 A un motor asíncrono trifásico de potencia nominal 22 kW, 380/660 V, 50 Hz, factor de potencia 0,87, se le conecta una batería de condensadores en triángulo para elevar el factor de potencia a 0,96, cuando funciona a plena carga conectado a 380 V. Calcular:

- Potencia absorbida por el motor a plena carga si el rendimiento es el 90%.
- Potencia reactiva de la batería de condensadores.
- Capacidad de cada rama del triángulo de la batería de condensadores.
- Intensidad de línea a plena carga, sin conectar la batería de condensadores.
- Intensidad de línea a plena carga después de conectada la batería.

Solución: a) 24,44 kW; b) 6,72 kVAr; c) 49,38 μ F; d) 42,68 A; e) 38,68 A.

8

INSTALACIONES DE ENLACE E INTERIORES

8.1. INSTALACIONES DE ENLACE

Son las instalaciones que unen la línea de distribución con las instalaciones interiores o receptoras. Las instalaciones de enlace en B.T. están formadas (fig. 8.1) por: acometida (a), caja general de protección (b), línea repartidora (c), instalación de contadores (d) y derivaciones individuales (e).

Las secciones mínimas de los conductores y demás características de las instalaciones de enlace (acometidas, líneas repartidoras, instalaciones de contadores y derivaciones individuales) deben adaptarse a las normas particulares de las empresas

suministradoras de energía eléctrica, aprobadas por la Dirección General de la Energía del Ministerio de Industria (Artículo 18 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión) o por los organismos competentes de las comunidades autónomas.

8.2. ACOMETIDA EN B.T.

Es la parte de la instalación de enlace comprendida entre la línea de distribución de la empresa suministradora de energía eléctrica y la caja o cajas generales de protección.

La instalación se realiza según el R.B.T. (MIE BT 011) y de acuerdo con las normas de la empresa suministradora.

La acometida puede ser aérea, subterránea o mixta.

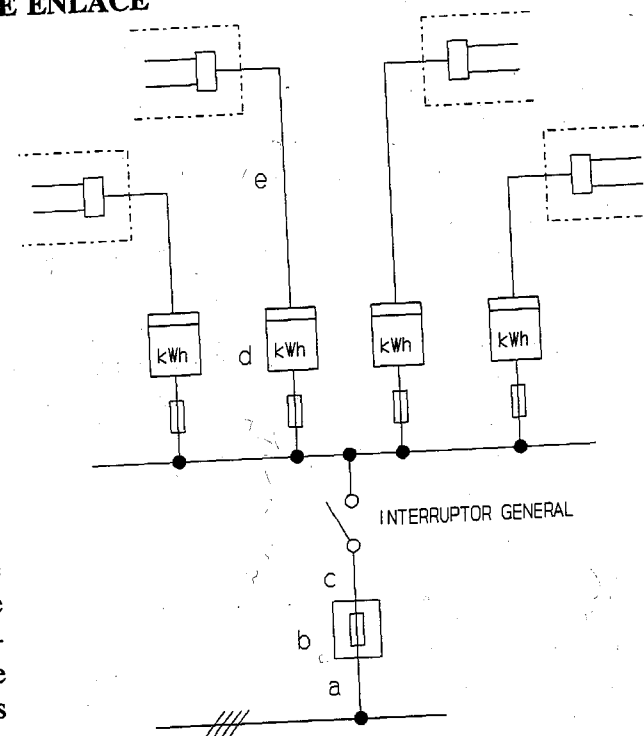


Fig. 8.1

8.3. ACOMETIDA AÉREA

Consiste en conductores colocados sobre postes o por la fachada de los edificios, siendo el origen de la instalación la red de distribución aérea.

El conductor más utilizado actualmente es de aluminio del tipo RZ 0,6/1 kV, conductores aislados con polietileno reticulado de color negro resistente a la intemperie, formando haces de cables unipolares sin cubierta de protección común.

La caída de tensión se fija como máximo en el 1% y la intensidad estará dentro de lo permitido según la instrucción MIE BT 004 del actual Reglamento Electrotécnico para B.T.

La acometida aérea, según la forma de la instalación puede ser:

- Acometida aérea tensada sobre apoyos.** Los conductores se suelen instalar sobre apoyos de hormigón, mediante ganchos de fijación y soportes, con vanos máximos de 40 a 50 m. Los conductores pueden instalarse tensados directamente (cable de poca sección), tensados sobre neutro fiador o tensados sobre fiador de acero.
- Acometida aérea tensada sobre fachada.** Los conductores se instalan ligeramente separados de la pared, se colocan con vanos máximos de 10 m y fijados mediante pinzas de anclaje.
- Acometida aérea posada sobre fachada.** Los conductores se instalan sujetos a la pared mediante abrazaderas, con una distancia entre éstas de 35 a 70 cm según la sección de los conductores.

8.4. ACOMETIDA SUBTERRÁNEA

Consiste en conductores bajo tierra que tienen su origen en una red de distribución subterránea.

Según su formación la acometida subterránea puede ser con conductores aislados directamente enterrados en zanjas, con conductores aislados enterrados bajo tubo o con conductores colocados en galerías subterráneas.

El trazado de la acometida en urbanizaciones sigue las zonas públicas como paseos o aceras.

En la instalación en zanja los conductores se tienden sobre arena cribada y protegidos por ladrillo, teja o loseta de hormigón.

En la instalación bajo tubo, éste es de plástico rígido o fibrocemento. En los cruces de calzada, cimentaciones, muros y paredes, la instalación es bajo tubo hormigonado.

8.5. ACOMETIDA MIXTA

Acometida formada por una parte aérea y otra subterránea. Para cada una de las ramas se siguen las normas correspondientes. Cuando en la acometida se realiza el cambio de subterránea a aérea o a la inversa, los conductores van protegidos por un tubo rígido hasta una altura de unos tres metros sobre el suelo. La boca del tubo se tapa para evitar que penetre el agua de lluvia en su interior.

8.6. CAJA GENERAL DE PROTECCIÓN Y BASES TRIPOLARES VERTICALES

Las cajas generales de protección enlazan la acometida con la línea repartidora. Su función es alojar los elementos de protección de esa línea. Están formadas por una envolvente aislante, precintable, que contiene los bornes de conexión, las bases para cortacircuitos fusibles en los conductores de fase y neutro seccionable mediante pletina.

Los tipos de cajas seleccionados para edificios destinados preferentemente a viviendas, según proyecto tipo UNESA se indican en la figura 8.2.

La caja general de protección (C.G.P.), lleva las siguientes indicaciones: marca y tipo de fabricante, intensidad nominal (A), tensión nominal 440 V, designación UNESA del tipo seleccionado y año de fabricación.

■ Instalación de la C.G.P.

La instalación se realiza según el R.B.T. (MIE BT 012) y de acuerdo con las normas de la empresa suministradora. La C.G.P. se instala en el límite de propiedad y con acceso directo desde la vía pública.

- Si la red de distribución es aérea:
 - 1) En montaje superficial en fachada o cerramiento.
 - 2) En hornacina en fachada o cerramiento.
 - 3) En apoyo de la red de distribución o en apoyo de la acometida.
- Si la red de distribución es subterránea la C.G.P. se sitúa en hornacina, en fachada o cerramiento.

Si el suministro es a un edificio de un sólo abonado se puede utilizar la caja de protección y medida (C.P.M.), que reúne en un sólo elemento la caja general de protección y el conjunto de aparatos de medida. Su instalación puede ser sobre fachada o encajada en la pared de fachada o cerramiento.

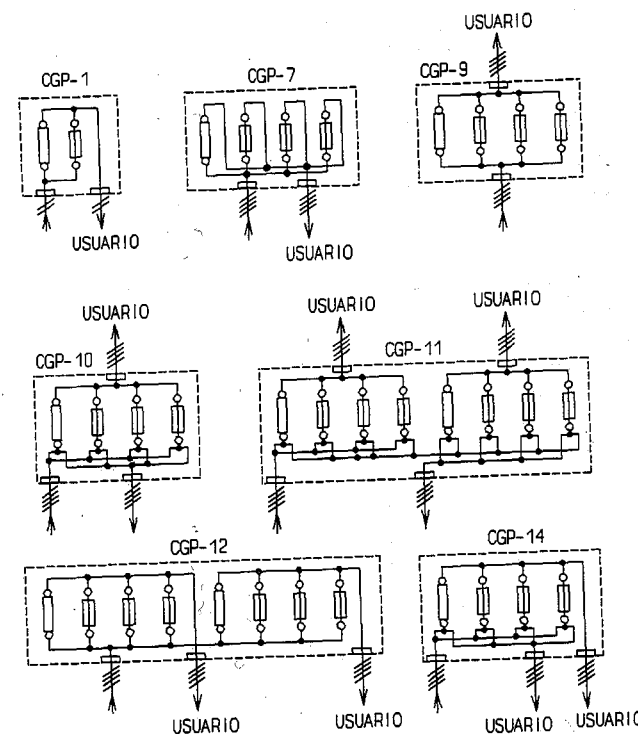


Fig. 8.2

Se utiliza en general una C.G.P. por línea repartidora para cada 160 kW de potencia. El número y tipo de C.G.P. depende de la potencia prevista para el edificio. Si son necesarias más de dos cajas se suele utilizar las barras de distribución con bases tripolares verticales (B.T.V.).

Cuando exista un centro de transformación en el edificio (siempre que la potencia prevista sea mayor de 50 KVA, excepto que por acuerdo con la empresa suministradora de energía eléctrica no se necesite, por tener un centro de transformación próximo), las líneas repartidoras se alimentan desde el cuadro de B.T. del transformador, que lleva fusibles de protección y se considera como C.G.P.

■ Instalación de bases tripolares verticales

Están constituidas por un armario en el cual van sujetas horizontalmente por aisladores cuatro pletinas de cobre. Sobre las tres pletinas de fase se conectan verticalmente los zócalos que sirven de soporte a las tres bases unipolares para cortocircuitos fusibles (fig. 8.3).

Los esquemas de las B.T.V. más utilizadas se indican en la figura 8.4.

8.7. LÍNEA REPARTIDORA

Es la línea que une la C.G.P. con los equipos de medida de energía eléctrica.

La instalación se realiza según el R.B.T. (MIE BT 013) y de acuerdo con las normas de la empresa suministradora. Según proyecto tipo UNESA el trazado de la línea repartidora será lo más rectilíneo posible por zonas de uso común. Los conductores son de cobre con tensión de aislamiento 0,6/1 kV, con policloruro de vinilo (PVC), etileno propileno (EPR) o polietileno reticulado (PRC). La instalación puede estar constituida por:

- Conductores aislados en el interior de tubos empotrados.
- Conductores aislados en el interior de tubos en montaje superficial.

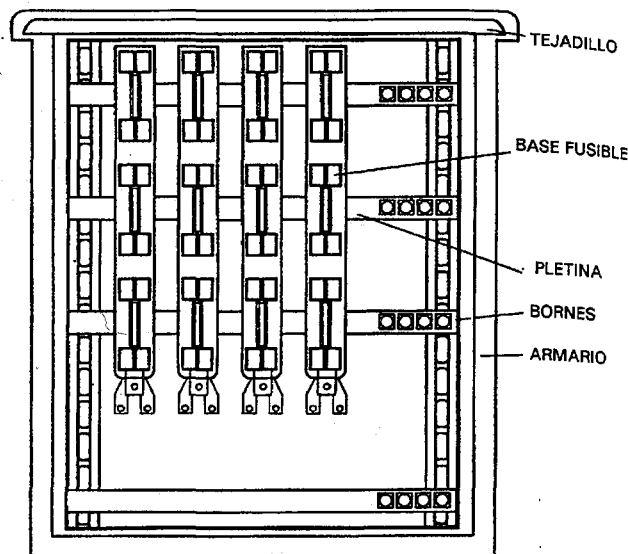


Fig. 8.3

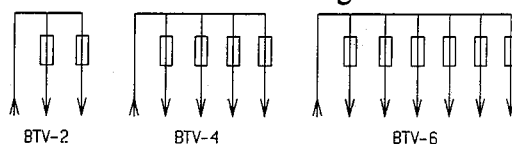


Fig. 8.4

- Canalizaciones prefabricadas.
- Conductores aislados con cubierta metálica en montaje superficial.

El diámetro de los tubos permitirá ampliar un 100% la sección de los conductores.

La instalación puede realizarse en canaladura de fábrica, que discurre verticalmente por la caja de escalera del edificio, con sección mínima 30x30 cm..

La sección de los conductores de la línea repartidora se realiza según la carga prevista, considerando la intensidad permitida en los conductores (MIE BT 004). La caída de tensión permitida es del 1% cuando los contadores están instalados de forma individual o concentrados por plantas y del 0,5% cuando los contadores están totalmente concentrados (MIE BT 013).

Actualmente se permiten en las líneas de enlace conductores de aluminio en instalaciones eléctricas prefabricadas (resolución del 21-01-97 de la Dirección General de Tecnología y Seguridad Industrial).

8.8. EQUIPO DE MEDIDA

Es el conjunto de contadores y demás elementos destinados a medir el consumo de energía eléctrica.

La instalación se realiza según el R.B.T. (MIE BT 015) y de acuerdo con las normas de la empresa suministradora.

El equipo de medida está formado por uno o varios módulos que constan fundamentalmente de embarrado general, fusibles de seguridad, contadores con sus elementos de control horario y transformadores de intensidad si es necesario, y bornes de salida. La empresa suministradora de energía suele considerar en sus normas la colocación de un interruptor general a la entrada de la línea repartidora en el cuadro de la centralización de contadores.

El local para la centralización de contadores es cerrado, dedicado sólo a este fin, situado preferentemente en la planta baja del edificio, lo más cerca posible a la entrada y cerca de la canalización vertical de las derivaciones individuales. Su acceso es por lugares de uso común. Están contruidos con materiales no inflamables, ventilados y con puertas de acceso que se abren hacia el exterior.

8.9. DERIVACIÓN INDIVIDUAL

Es la línea que une el equipo de medida de cada usuario con los dispositivos privados de mando y protección.

La instalación se realiza según el R.B.T. (MIE BT 014) y de acuerdo con las normas de la empresa suministradora, podrán estar constituidas por:

- Conductores aislados en el interior de tubos empotrados.
- Conductores aislados en el interior de tubos en montaje superficial.
- Canalizaciones prefabricadas.

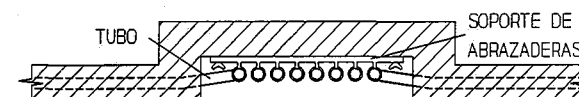


Fig. 8.5

- Conductores aislados con cubierta metálica en montaje superficial.

Según el proyecto tipo UNESA, los conductores utilizados son de cobre rígidos, unipolares con aislamiento para una tensión nominal 750 V, tipo H07V-R en instalación bajo tubo o canaladura empotrada (fig. 8.5) o adosada al hueco de escalera, por lugares de uso común y de sección mínima 30×30 cm. La canaladura tiene placas cortafuegos, que se suelen colocar cada tres plantas, y registros en todas las plantas. La derivación constará de conductor neutro, fase o fases y protección; pero además en tarifa nocturna se incluye un conductor de 1,5 mm² de sección como hilo de mando.

El cálculo de las derivaciones individuales se realiza según la potencia prevista en la derivación, teniendo en cuenta la intensidad admisible por los conductores (MIE BT 017) y que la caída de tensión permitida es del 0,5% cuando los contadores están instalados de forma individual o concentrados por plantas y del 1% cuando los contadores están totalmente concentrados (MIE BT 014). El diámetro de los tubos es tal que permite ampliar la sección de los conductores un 50%. El diámetro mínimo de los tubos según la sección nominal del conductor y número de conductores se calculan en tablas según la instrucción MIE BT 019. Para más de 5 conductores por tubo o conductores de sección diferente instalados en el mismo tubo, la sección interior de éste será como mínimo igual a 3 veces la sección total ocupada por los conductores.

Tabla 8.1

TUBOS									MONTAJE	
Aislantes flexibles normales. Metálicos rígidos normales con aislamiento interior. Metálicos flexibles normales con/sin aislamiento interior.									Empotrados	
Diámetro interior nominal mínimo, en mm, para tubos en función del número y sección de los conductores a alojar.										
Sección nominal de los cables mm ²	1 conductor		2 conductores		3 conductores		4 conductores		5 conductores	
	PVC	Goma	PVC	Goma	PVC	Goma	PVC	Goma	PVC	Goma
1	13	13	13	13	13	13	13	16	13	16
1,5	13	13	13	13	13	13	13	16	13	16
2,5	13	13	13	13	13	13	13	16	13	23
4	13	13	13	16	13	16	16	23	16	23
6	13	16	13	23	16	23	23	23	23	23
10	16	23	23	23	23	23	23	29	29	29
16	23	23	23	29	23	29	29	29	29	36
25	23	29	29	29	29	36	36	36	36	48
35	29	36	29	36	36	48	36	48	48	
50	36	36	36	48	48	48	48	48		
70	36	48	48	48	48					
95	48	48	48							
120	48									

Tabla 8.2

TUBOS EN TRAMOS RECTOS								MONTAJE		
Aislados rígidos normales, curvables en caliente.								Al aire.		
Metálicos rígidos blindados.								Al aire o empotrados.		
Diámetro interior nominal mínimo, en mm, para tubos en función del número y sección de los conductores a alojar.										
Sección nominal de los cables mm²	1 conductor		2 conductores		3 conductores		4 conductores		5 conductores	
	PVC	Goma	PVC	Goma	PVC	Goma	PVC	Goma	PVC	Goma
1	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
1,5	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
2,5	9	9	9	9	9	9	9	9	9	11
4	9	9	9	9	9	9	9	11	9	11
6	9	9	9	11	9	11	11	11	11	16
10	9	9	11	13	11	13	13	16	16	21
16	9	9	13	16	13	21	16	21	21	29
25	11	11	21	21	21	21	21	29	29	29
35	11	13	21	29	21	29	29	29	29	36
50	13	16	29	29	29	29	29	36	36	36
70	16	21	29	36	36	36	36	36	36	48
95	21	21	36	36	36	36	36	48	48	48
120	21	29	36	36	48	48	48	48	48	
150	29	29	48	48	48	48	48			
185	29		48		48					
240	36									
300	36									

Los diámetros mínimos de los tubos en derivaciones individuales, serán 23 mm para edificios destinados preferentemente a viviendas, mientras que en edificios comerciales destinados a concentración de industrias el diámetro mínimo es de 29 mm, con dos tubos por abonado.

Según el proyecto tipo UNESA para instalaciones de enlace en edificios destinados preferentemente a viviendas la sección mínima de las derivaciones individuales con conductores de cobre es de 6 mm².

En edificios de un sólo usuario no existe línea repartidora ni derivación individual, enlazando directamente la C.G.P. con el equipo de medida y este con los dispositivos privados de mando y protección.

8.10. CUADRO PRIVADO DE MANDO Y PROTECCIÓN

Cerca del punto de entrada de la derivación individual en el local o vivienda del usuario se coloca el cuadro de distribución, de donde parten los circuitos interiores del abonado. En este cuadro se instalan los interruptores automáticos de protección contra sobrecargas y cortocircuitos, y la protección contra contactos indirectos.

En la entrada de la derivación individual y antes de la conexión de los dispositivos del cuadro, se coloca el interruptor de control de potencia (I.C.P.), según la potencia contratada y en caja precintable independiente del resto de la instalación.

El cuadro privado de mando y protección lleva un interruptor general automático, que puede ser un interruptor diferencial cuando en el local no existan circuitos diferentes bajo cubierta de protección común.

La instalación se realiza según el R.B.T. (MIE BT 016) y de acuerdo con las normas de la empresa suministradora.

8.11. INSTALACIONES INTERIORES

Según el uso a que se destinan, las instalaciones de baja tensión (B.T.) en el interior de edificios se clasifican en:

- *Instalaciones domésticas*, en el interior de edificios destinados principalmente a viviendas.
- *Instalaciones en edificios singulares*, en el interior de edificios destinados a usos diversos (oficinas, comercios, cines, etc.).
- *Instalaciones industriales*, en el interior de fábricas y talleres.

8.12. CANALIZACIONES ELÉCTRICAS EN B.T.

Las canalizaciones o instalaciones eléctricas de B.T. en el interior de edificios pueden realizarse empotradas o en superficie.

1) *Empotradas*

- Bajo tubo: con conductores aislados en el interior de tubo, siendo el más utilizado el de plástico flexible.
- Directamente: con conductores aislados especialmente para ser empotrados en forma directa.

2) *En superficie*

- Protegidas: con conductores aislados bajo tubo rígido (plástico o acero), bajo canaleta o mediante canalizaciones prefabricadas.
- Canalización al aire: con conductores aislados especialmente para ser fijados sobre superficie.

8.13. PROCESO DE TRABAJO EN UNA INSTALACIÓN EMPOTRADA BAJO TUBO

El orden de realización del trabajo es el siguiente:

- 1) Trazado de la instalación, marcando el lugar de la canalización y la posición de cajas de registro (donde se realizan los empalmes y derivaciones), cajas de mecanismos, tomas de corriente y puntos de luz.
- 2) Colocación y sujeción de tubos, cajas de registro y de mecanismos en los canales o rozas realizados en paredes, techos y suelos, siguiendo el trazado de la instalación.
- 3) Introducción en los tubos de los cables necesarios para proceder al conexionado de la instalación, colocando los mecanismos correspondientes.

Finalmente, después del conexionado, se comprueba el funcionamiento de la instalación.

8.14. INSTALACIONES DOMÉSTICAS

En edificios destinados principalmente a viviendas la instalación se divide en dos partes: instalación de enlace e instalación en el interior de la vivienda.

- 1) *Instalación de enlace*, comprendida entre la vivienda y la línea de distribución.

Las instalaciones de enlace están formadas por: acometida, caja general de protección,

línea repartidora, contadores de energía y derivación individual.

- 2) *Instalación en el interior de la vivienda*. Tiene su origen en el cuadro de distribución privado (fig. 8.6), que comprende los elementos de mando y protección de la instalación interior de la vivienda, y de él parten los circuitos interiores.

Si la demanda de potencia del edificio supera los 50 kVA se debe instalar un centro de transformación en un local, que suele estar ubicado en la planta baja o sótano, con las dimensiones necesarias fijadas por la empresa suministradora de energía. En este caso la acometida al edificio será en alta tensión y las líneas repartidoras se alimentan del cuadro de B.T. del transformador.

■ Grado de electrificación de las viviendas

De acuerdo con la superficie de las viviendas se establece un grado de electrificación mínimo, según la instrucción (MIE BT 010)

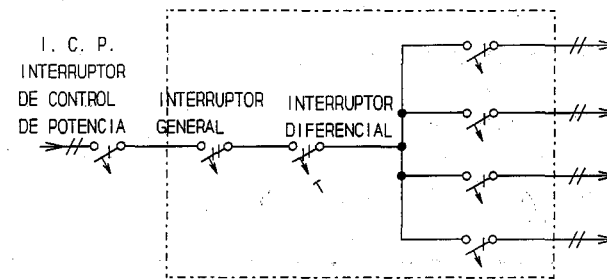


Fig. 8.6

- *Electrificación mínima*, para una superficie máxima de 80 m², con una previsión máxima de potencia de 3 000 W.
 - *Electrificación media*, para una superficie máxima de 150 m², con una previsión máxima de potencia de 5 000 W.
 - *Electrificación elevada*, para una superficie máxima de 200 m², con una previsión máxima de potencia de 8 000 W.
 - *Electrificación especial*, con una previsión de potencia mayor de 8 000 W.
- **Previsión de cargas**

- 1) *Carga correspondiente a un conjunto de viviendas*. Se obtiene multiplicando el número de viviendas por la potencia máxima prevista para cada una según el grado de electrificación; pero este valor viene modificado por un coeficiente de simultaneidad, porque todas las viviendas no tendrán a la vez la demanda máxima. Según la instrucción (MIE BT 010), se utiliza el cuadro siguiente:

Tabla 8.3

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
16 a 25	0,6	0,5
Más de 25	0,5	0,4

También en la hoja de interpretación nº 14 del R.B.T. se halla directamente el valor resultante de la carga correspondiente a un conjunto de viviendas según el número de abonados y el grado de electrificación.

- 2) *Carga correspondiente a los servicios generales del edificio*. Es la carga correspondiente a la suma de las potencias de ascensores, montacargas, alumbrado de portal y escaleras así como todo el servicio eléctrico general del edificio.

Como datos orientativos pueden considerarse los siguientes:

- Alumbrado de zonas comunes, portal, trasteros.
 - Alumbrado de incandescencia, 15-30 W/m².
 - Alumbrado de fluorescencia, 5-10 W/m².

En el proyecto tipo UNESA, se considera como carga mínima por alumbrado común 3 kW.

- Garajes-aparcamientos.
 - Alumbrado fluorescente y ventilación, 15-25 W/m².

- 3) *Carga correspondiente a locales comerciales*. Según la instrucción (MIE BT 010) se tomará como previsión de carga mínima 100 W/m², con un mínimo por abonado de 3 000 W.
- 4) *Carga correspondiente a oficinas*. Se considera, según la instrucción MIE BT 010, una carga de 100 W/m², con un mínimo de 5 000 W.
- 5) *Carga correspondiente a lámparas o tubos de descarga*. La carga mínima prevista en los circuitos de alimentación a lámparas o tubos de descarga, según la instrucción (MIE BT 032), será en voltiamperios de 1,8 veces la potencia en vatios de las lámparas.
- 6) *Carga correspondiente a una instalación de motores*. Los circuitos de alimentación de motores, según la instrucción (MIE BT 034) deben tener la carga mínima prevista siguiente:
- Para alimentación de un solo motor, el 125% de la intensidad nominal o de plena carga del motor.
 - Para alimentación de varios motores, el 125% de la intensidad de plena carga del motor de mayor potencia más la intensidad a plena carga del resto de los motores.

En la alimentación de motores de equipos de elevación la caída de tensión en el arranque no debe ser superior al 5% (MIE BT 028).

8.15. INSTALACIONES EN EL INTERIOR DE LA VIVIENDA

- a) *Naturaleza de los conductores*. Según la instrucción MIE BT 017 los conductores rígidos empleados en las instalaciones pueden ser de cobre o aluminio. Los conductores flexibles serán únicamente de cobre.
- b) *Identificación de los conductores en una instalación interior*. Según la instrucción (MIE BT 023) los conductores se identificarán por el color del aislante:
- Azul claro para el neutro.
 - Negro, marrón o gris para los conductores de fase.
 - Amarillo-verde para el conductor de protección.
- c) *Circuitos en el interior de la vivienda*. La tabla 8.4, resume la instalación en el interior de las viviendas según el R.B.T. con los circuitos mínimos según los grados de electrificación.
- Se utilizan también otros circuitos: señalización acústica, portero eléctrico, antenas receptoras de TV, calefacción, telefonía, seguridad, etc.
- Las instalaciones automatizadas con capacidad de procesamiento informático de datos "domótica", se están utilizando en viviendas y edificios para control y gestión de la energía, automatización de procesos, seguridad y comunicaciones.

Para el cálculo de cada circuito interior se toman como base de cálculo los valores indicados en la tabla siguiente (MIE BT 022):

Tabla 8.5

CIRCUITO	POTENCIA	GRADO DE ELECTRIFICACIÓN
Alumbrado.	66% de la que resulta al considerar todos los puntos de utilización previstos a razón de 60 W cada uno.	Mínima-media-elevada
Tomas de corriente.	En una de las tomas 2 200 W.	Mínima
	En dos de las tomas 2 200 W.	Media
	En dos de las tomas de cada circuito 2 200 W.	Elevada
Cocina.	En la toma para cocina 4 400 W.	Media-elevada
Máquina de lavar, calentador de agua y secador.	En la toma de la máquina de lavar calentador de agua y secadora 3 500 W. En la toma del calentador 2 200 W.	Elevada

Los conductores utilizados son del tipo HO7V-U, HO7V-R y HO7V-K.

d) Elección de interruptores.

- Pequeños interruptores automáticos (PIAs). Su calibre será menor que la intensidad máxima permitida por los conductores, obteniéndose la tabla siguiente:

Tabla 8.6

Sección de los conductores de cobre (mm²)	Calibre del PIA (A)	Potencia máxima del circuito a 220 V
1,5	10	2 200 W
2,5	16	3 520 W
4	20	4 400 W
6	25	5 500 W

- Interruptor diferencial. Es de sensibilidad 30 mA y la intensidad nominal mínima debe ser superior o igual a la de consumo de la instalación, por lo que en los valores de electrificación normativos la intensidad nominal del diferencial es como mínimo: 16 A para electrificación mínima, 32 A para grado de electrificación media y 40 A para electrificación elevada.

e) Tubos protectores. El diámetro de los tubos tiene que cumplir la instrucción MIE BT 019. Se adoptan generalmente los valores de diámetro mínimo siguientes:

- Circuitos de iluminación y de otros usos (tomas de corriente, frigorífico, etc.): diámetro 13 mm.
- Circuitos de electrodomésticos (lavavajillas, etc.): diámetro 16 mm.
- Circuitos de cocina: diámetro 23 mm.

f) Instalación en cuartos de baño. Según la instrucción MIE BT 024, en los cuartos de baño se indican un volumen de prohibición y un volumen de protección.

- Volumen de prohibición: Es el volumen limitado por planos verticales tangentes a los bordes exteriores de la bañera baño-aseo o ducha y los horizontales constituidos por el suelo y un plano situado a 2,25 m por

Tabla 8.4. Número de circuitos y puntos de utilización

CARACTERÍSTICAS	GRADO DE ELECTRIFICACIÓN		
	MÍNIMO	MEDIO	ELEVADO
PREVISIÓN MÁXIMA DE POTENCIA (MIE BT 010)	3 000 W	5 000 W	8 000 W
SUPERFICIE ÚTIL MÁXIMA (MIE BT 010)	80 m²	150 m²	200 m²
NÚMERO MÍNIMO DE CIRCUITOS (MIE BT 022)	Alumbrado (1,5 mm²). Tomas de corriente (2,5 mm²).	Alumbrado (1,5 mm²). Tomas de corriente (2,5 mm²).	Alumbrado (1,5 mm²). Alumbrado (1,5 mm²). Tomas de corriente (2,5 mm²).
SECCIÓN MÍNIMA DE CIRCUITOS (MIE BT 023 y NTE-IEB)	Tomas de corriente (2,5 mm²). Lavadora y calentador (4 mm²). Cocina eléctrica (6 mm²).	Tomas de corriente (2,5 mm²). Lavadora y calentador (4 mm²). Cocina eléctrica (6 mm²).	Tomas de corriente (2,5 mm²). Lavadora y calentador (4 mm²). Cocina eléctrica (6 mm²).
PUNTOS DE UTILIZACIÓN MÍNIMOS (MIE BT 022)	VESTÍBULO	Un punto de luz. Una toma de corriente de 10 A.	Un punto de luz. Tomas de corriente de 10 A cada 12 m². Tomas de corriente para calefacción.
	PASILLOS	Un punto de luz.	Un punto de luz cada 5 m de longitud. Tomas de corriente para calefacción.
	CUARTO DE ESTAR	Un punto de luz. Una toma de corriente de 10 A cada 6 m².	Un punto de luz. Tomas de corriente de 10 A cada 6 m². Tomas de corriente para calefacción.
	COCINA	Un punto de luz. Tres tomas de corriente de 10 A con toma de tierra.	Uno o dos puntos de luz. Dos tomas de corriente de 10 A con toma de tierra. Una toma de corriente de 16 A con toma de tierra. Una toma de corriente de 25 A con toma de tierra. Tomas de corriente para calefacción.
	DORMITORIOS	Un punto de luz. Dos tomas de corriente de 10 A.	Un punto de luz. Tres tomas de corriente de 10 A. Tomas de corriente para calefacción.
	BAÑO O ASEO	Un punto de luz. Una toma de corriente de 10 A con toma de tierra.	Un punto de luz. Una toma de corriente de 10 A con toma de tierra. Tomas de corriente para calefacción.

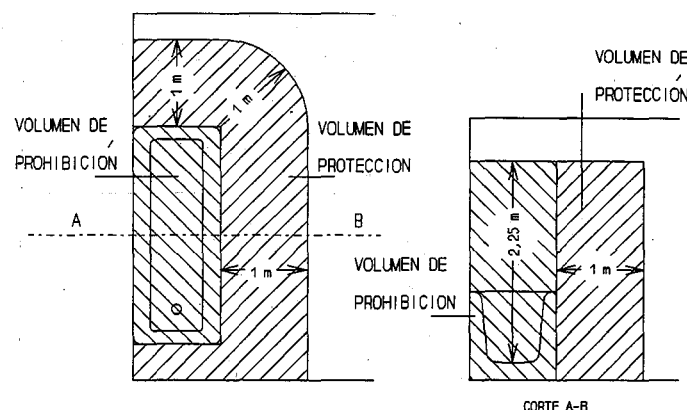


Fig. 8.7

encima del fondo de aquellos o del suelo si estuvieran empotrados en el mismo (fig. 8.7). En este volumen no están permitidos la instalación de interruptores, tomas de corriente ni aparatos de iluminación. Se admite por encima de este volumen contactores de mando de sonería accionados por un cordón o cadena de material aislante no higroscópico.

- 2) Volumen de protección: Es el comprendido entre los mismos planos horizontales indicados para el volumen de prohibición y otros verticales situados a 1 m del citado volumen (fig. 8.7). En este volumen no se pueden instalar interruptores. Pueden instalarse aparatos de alumbrado de instalación fija, preferentemente de aislamiento clase II (doble aislamiento o aislamiento reforzado) que no presenten ninguna parte metálica accesible. Estos aparatos de alumbrado no dispondrán interruptores ni tomas de corriente que no sean de seguridad.

Pueden instalarse también radiadores eléctricos de calefacción con elementos de caldeo protegidos, siempre que su instalación sea fija, están conectados a tierra y se haya establecido una protección exclusiva con interruptores diferenciales de alta sensibilidad. El interruptor de maniobra de estos aparatos debe estar fuera del volumen de protección.

Fuera del volumen de protección podrán instalarse interruptores, tomas de corriente (de seguridad o con contacto de puesta a tierra).

Las masas metálicas existentes en el cuarto de baño o aseo deben unirse entre sí con conductor de cobre formando una conexión equipotencial, que se conecta al conductor de protección de puesta a tierra.

- g) *Instalación en cocinas.* En la cocina, además del alumbrado se instalan un conjunto de electrodomésticos. Para su instalación se tiene en cuenta:

- Cada electrodoméstico debe estar conectado a su propia toma de corriente, que estará provista de toma de tierra. La sección de cada línea de alimentación se dimensiona según la potencia del electrodoméstico y según esa potencia la toma de corriente será de 10, 16 o 25 A.

- Sobre las encimeras de trabajo de la cocina se instalan tomas de corriente con toma de tierra para la alimentación de pequeños electrodomésticos o aparatos auxiliares.

8.16. INSTALACIÓN DE ASCENSOR

Es un aparato elevador que se desplaza entre guías y tiene una cabina que permite su utilización por personas.

- a) *Sistemas de accionamiento.*

- Accionamiento eléctrico. La máquina de accionamiento es un motor eléctrico. Es el sistema más utilizado.
- Accionamiento hidráulico. La máquina de accionamiento es un grupo hidráulico.

- b) *Constitución del ascensor de accionamiento eléctrico.*

- 1) Cuarto de máquinas. En este local se encuentra instalado el motor con sus accesorios de tracción, cuadro eléctrico de maniobra y limitador de velocidad. El cuarto suele situarse en la parte alta del edificio (fig. 8.8) sobre el recinto en el que se mueve el ascensor. Sus dimensiones son función de las de la cabina, permitiendo solamente el acceso del personal de conservación y con la posibilidad de mover la maquinaria. Debe estar ventilado e iluminado. El motor eléctrico puede ser de una velocidad o de dos velocidades (velocidad reducida para el frenado). En el motor de una velocidad, la reducción de velocidad antes de la parada se consigue de varias formas (desconexión del motor y conexión a corriente continua, variación de tensión o variación de frecuencia). Partiendo de la Norma Técnica de Edificación NTE-ITA se indican los valores aproximados de consumo de los aparatos elevadores, según la siguiente tabla:

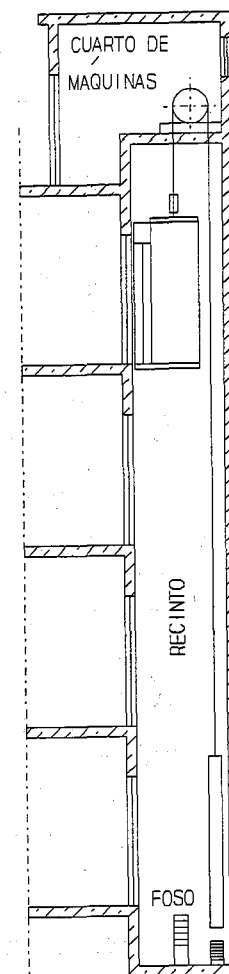


Fig. 8.8

Tabla 8.7

TIPO ASCENSOR	Nº DE PLAZAS	Nº DE PARADAS	POTENCIA (kW)
ITA 1	5	8	4
ITA 2	5	15	6
ITA 3	8	15	12
ITA 4	8	20	16
ITA 5	13	20	26

La instalación eléctrica debe cumplir la instrucción MIE BT 028. La línea de alimentación al motor deberá dimensionarse de forma que la intensidad de arranque no provoque una caída de tensión superior al 5%.

2) Recinto. Espacio por el que se mueven la cabina y el contrapeso. En él van los siguientes elementos:

- Cabina. Es el elemento que efectúa el recorrido y destinado a transportar personas. Su estructura es metálica y su movimiento se controla mediante pulsadores (pulsador para cada parada, pulsador de mantenimiento de apertura de puertas, pulsador de alarma). La cabina debe llevar puertas, que suelen ser automáticas de tipo telescópico.
- Contrapeso. Es el elemento que equilibra el peso de la cabina y la mitad de la carga que puede transportar. Va unido a la cabina por cables metálicos que pasan por la polea del mecanismo de tracción.
- Guías. Son los elementos mecánicos que dirigen el movimiento de la cabina o del contrapeso.
- Paracaídas. Es un sistema mecánico que colocado en la cabina o en el contrapeso, con el fin de parar automáticamente el ascensor en caso de elevada velocidad de descenso.

3) Foso. Es la parte inferior del recinto, donde van colocados los amortiguadores de impacto por si la cabina se desplaza fuera del nivel de las últimas paradas.

c) *Constitución del ascensor de accionamiento hidráulico.* La constitución es igual que la del ascensor de accionamiento eléctrico, pero en lugar de motor eléctrico, la máquina de accionamiento es un sistema hidráulico con motobomba y un émbolo impulsor, conectado directamente o por cables a la cabina y colocado en el foso. El ascensor más utilizado es el de tracción directa (fig. 8.9) con longitud de desplazamiento máxima de unos 8 m.

d) *Maniobras en el ascensor.* Las maniobras más utilizadas son función del uso del ascensor:

- Automática simple. Las llamadas se atienden solamente con el ascensor parado, de forma que mientras está la cabina desplazándose no se registran ni atienden llamadas. Se aplica en edificios con poco tráfico.
- Automática colectiva. Las llamadas se registran con la cabina en desplazamiento y se atienden en el sentido en que fueron realizadas.

La instalación del ascensor debe cumplir el Reglamento de Aparatos Elevadores del Ministerio de Industria.

Según la Norma Técnica de Edificación (NTA-ITA), será necesario la utilización de ascensores en edificios de viviendas cuando la altura entre la cota de la acera a eje de portal y la cota de pavimento de la última planta sea mayor de 10,75 m; en edificios de apartamentos, oficinas y hoteles con 3 o más plantas por encima de la de acceso y en hospitales con una o más plantas sobre la de acceso.

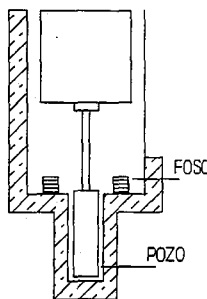


Fig. 8.9

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

8.16-1 Un edificio de 5 plantas, 2 viviendas de 90 m² por planta, tiene un motor de ascensor de 5,5 CV, 380/220 V, 11,8/20,4 A, 50 Hz, cos $\varphi=0,84$. Para servicios generales utiliza 20 lámparas fluorescentes 18 W, 220 V. Tiene un local comercial de 30 m² y un garaje con una potencia a instalar de 5 kW. Dibujar el esquema unifilar del cuadro de mando y protección de un vivienda y calcular:

- Previsión de cargas del edificio.
 - Línea de reparto, trifásica con neutro, para contadores totalmente concentrados. Longitud 20 m.
 - Derivación individual monofásica a una vivienda. Longitud 20 m.
 - Caída de tensión en la derivación individual al motor del ascensor en el arranque, si el conductor utilizado es de cobre de sección 6 mm² y la longitud 30 m.
- La línea de reparto está formada por un cable tetrapolar para distribución de energía, con conductores de cobre, aislados con PVC para 1 000 V, en instalación bajo tubo. Las derivaciones individuales están formadas por conductores unipolares de cobre, aislados con PVC para 750 V, en instalación empotrada bajo tubo. La tensión de servicio es trifásica con neutro 380/220 V y las caídas de tensión serán las máximas permitidas por el R.B.T.

a) La carga total del conjunto de viviendas se calcula según el R.B.T., instrucción 010 (MIE BT 010).

Según la superficie de las viviendas se establece el grado de electrificación, que en este caso corresponde a electrificación media, con una potencia de 5 000 W por vivienda.

Para obtener la potencia correspondiente al conjunto de viviendas se utilizan factores de simultaneidad. En este caso, para las 4 primeras el coeficiente es la unidad y para las 6 restantes el coeficiente es 0,8

$$P_v = 5\,000 \cdot 4 \cdot 1 + 5\,000 \cdot 0,8 \cdot 6 = 44\,000 \text{ W}$$

En la hoja de interpretación nº 14 del R.E.B.T. se halla directamente la potencia de un conjunto de viviendas. Así para 10 viviendas de electrificación media la tabla indica de potencia total 44 kW.

La carga correspondiente al local comercial, según el R.B.T., instrucción 010 es de 100 W/m² con un mínimo de 3 000 W.

$$P_c = 100 \cdot 30 = 3\,000 \text{ W}$$

La potencia del garaje $P_g = 5 \text{ kW}$

La potencia de alumbrado en los locales para servicios comunes se calcula multiplicando la potencia de las lámparas por 1,8 según la instrucción del R.B.T. MIE BT 032.

$$P_s = 18 \cdot 20 \cdot 1,8 = 648 \text{ W}$$

La potencia a considerar en el motor del ascensor, según el R.B.T., instrucción, 034 será la calculada a partir de la intensidad nominal aumentada el 125%. (Algunos proyectistas utilizan el factor 1,3 en lugar de 1,25, porque este factor es el que indica la instrucción MIE BT 034 para el cálculo de la intensidad de arranque de los motores de ascensores y montacargas).

$$P_m = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 1,25 \cdot 11,8 \cdot 0,84 = 8\,154,8 \text{ W}$$

La previsión de cargas del edificio será la suma de todas las potencias

$$P = P_v + P_c + P_g + P_s + P_m = 60\,802,8 \text{ W}$$

- b) La caída de tensión máxima en la línea de reparto, según el R.B.T., instrucción 013, es de 0,5% para contadores totalmente concentrados

$$u = \frac{0,5 \cdot 380}{100} = 1,9 \text{ V}$$

$$\text{La sección de la línea repartidora } s = \frac{LP}{cuV_L} = \frac{20 \cdot 60 \cdot 802,8}{56 \cdot 1,9 \cdot 380} = 30,1 \text{ mm}^2$$

La sección comercial más próxima por exceso es de 35 mm², que según la instrucción MIE BT 004, admite para ese cable 105 A al aire (tabla 2.3) y 105·0,8 = 84 A bajo tubo.

La intensidad total del edificio, considerando un factor de potencia global de 0,9

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi} = \frac{60 \cdot 802,8}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9} = 102,6 \text{ A}$$

Esta intensidad es mayor que la permitida por el conductor de 35 mm², por lo que es necesario escoger una sección de 50 mm², que admite 130 A al aire y 130·0,8=104 A bajo tubo; mayor que la intensidad total del edificio.

El cable tendrá tres conductores de sección 50 mm² para fases y un conductor de 25 mm² para neutro (3×50+1×25), con tubo de diámetro 50 o 75 mm.

La caja general de protección, según las indicaciones de la empresa suministradora, podría ser C.G.P.-7-160.

- c) La caída de tensión máxima en las derivaciones individuales a las viviendas, para contadores totalmente concentrados, será según la instrucción MIE BT 013, es del 1%

$$u = \frac{1 \cdot 220}{100} = 2,2 \text{ V}$$

La sección de la derivación individual a una vivienda, con una potencia normalizada de 5 000 W.

$$s = \frac{2LP}{cuV} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 5 \cdot 000}{56 \cdot 2,2 \cdot 220} = 7,38 \text{ mm}^2$$

La sección comercial más próxima por exceso es de 10 mm², que según el R.B.T., instrucción 017, admite una intensidad de 40 A (tabla 2.12).

La intensidad que circula por la derivación con un factor de potencia unidad

$$I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{5 \cdot 000}{220 \cdot 1} = 22,7 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la admitida en ese conductor, por lo que la sección es válida. La derivación será de dos conductores, fase y neutro de sección 10 mm², y un conductor de protección o de toma de tierra de cobre, con sección 10 mm² (2×10+T.T.), con tubo de diámetro mínimo 23 mm.

La sección del conductor de protección se escoge en función de la sección de los conductores de fase y del tipo de canalización según la instrucción MIE BT 017 (ver tabla 8.8).

Las secciones mínimas, halladas por cálculo, deben adaptarse a las Normas particulares de las empresas suministradoras de energía eléctrica.

- d) La caída de tensión en la derivación al motor del ascensor se considera teniendo en cuenta la instrucción 017 del R.E.B.T., que indica como caída de tensión máxima permitida desde el origen de la instalación el 5%. La caída de tensión en la línea repartidora es como máximo el 0,5%, por lo que queda para la

derivación al motor el 4,5%. (Si los servicios comunes se conectan a un mismo contador y el cuadro de protección de estos servicios no está inmediato al cuadro de contadores, se considera para su derivación una caída de tensión del 1%, quedando para la derivación al motor del ascensor el 3,5%).

Según la instrucción MIE BT 028, debe comprobarse que la intensidad de arranque en el motor del ascensor no provoque una caída de tensión superior al 5%. La intensidad de arranque se calcula, según la instrucción MIE BT 034, utilizando la tabla que indica la constante de proporcionalidad entre la intensidad de corriente de arranque y la de plena carga.

Tabla 8.8

MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA	
Potencia nominal del motor	Constante máxima de proporcionalidad entre la intensidad de la corriente de arranque y la de plena carga.
De 0,75 a 1,5 kW	4,5
De 1,5 a 5,0 kW	3,0
De 5,0 a 15,0 kW	2,0
De más de 15,0 kW	1,5

En los motores de ascensores y aparatos de elevación la constante de proporcionalidad se multiplica por 1,3.

La potencia nominal del motor es 5,5·0,736=4,048 kW, por lo que la intensidad de arranque máxima será 11,8·3·1,3=46,02 A.

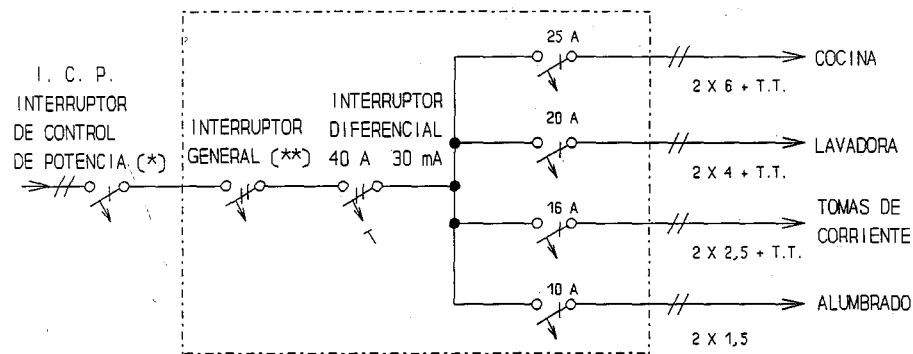
La caída de tensión en función de la intensidad de arranque, admitiendo igual factor de potencia que a plena carga.

$$u = \frac{\sqrt{3} L I_L \cos \varphi}{cs} = \frac{\sqrt{3} \cdot 30 \cdot 46,02 \cdot 0,84}{56 \cdot 6} = 5,98 \text{ V}$$

$$\text{En tanto por cien } u \% = \frac{5,98 \cdot 100}{380} = 1,57 \%$$

El esquema del cuadro de vivienda se indica en la figura 8.10

CUADRO DE MANDO Y PROTECCIÓN DE UNA VIVIENDA



(*) DIMENSIONADO SEGÚN LA POTENCIA CONTRATADA

(**) DIMENSIONADO SEGÚN LA SECCIÓN DE LA DERIVACIÓN INDIVIDUAL. SU INSTALACIÓN VIENE FIJADA POR LAS NORMAS DE LA COMPAÑÍA SUMINISTRADORA

Fig. 8.10

8.16-2 Un edificio de 6 plantas tiene dos viviendas por planta, una de ellas de 90 m^2 de superficie y otra de 65 m^2 . En el entresuelo tiene dos locales para oficinas de 70 m^2 cada uno. En la planta baja tiene dos locales comerciales de 50 m^2 cada uno y otro de 30 m^2 . En el sótano tiene un garaje en el que se instalan 30 luminarias con un tubo fluorescentes de 36 W cada una, el motor de apertura de la puerta, de $0,5 \text{ kW}$ 220 V y la máquina de renovación de aire que consume 2 kW . En el alumbrado de servicios comunes, antena colectiva y portero automático el consumo es de 3 kW . En el motor del ascensor se considera un consumo de 4 kW . La instalación de calefacción, situada en el sótano tiene un consumo de 2 kW .

La línea de reparto está formada por un cable tetrapolar para distribución de energía, con conductores de cobre, aislados con XLPE para 1000 V , en instalación bajo tubo.

Las derivaciones individuales están formadas por conductores unipolares de cobre, aislados con PVC para 750 V , en instalación empotrada bajo tubo.

La tensión de servicio es trifásica con neutro $380/220 \text{ V}$ y las caídas de tensión serán las máximas permitidas por el R.B.T.

Calcular:

- Previsión de cargas del edificio.
- Línea de reparto, trifásica con neutro, para contadores totalmente concentrados. Longitud 15 m .
- Derivación individual monofásica de longitud 15 m , a una vivienda de electrificación media.
- Derivación individual monofásica al garaje aparcamiento, considerando una caída máxima de tensión del 1% . Longitud 8 m .

Solución: a) $85\,244 \text{ W}$; b) 70 mm^2 ; c) 6 mm^2 ; d) 6 mm^2 .

8.17. INSTALACIONES EN EDIFICIOS SINGULARES

En edificios destinados a usos diversos (comercios, oficinas, etc.) el esquema general típico de la instalación es el siguiente (fig. 8.11): acometida (a), caja general de protección (b), línea de enlace (c), cuadro de contadores (d), cuadros generales de distribución de fuerza y alumbrado (e), cuadros secundarios de fuerza y alumbrado (f), y derivaciones individuales a los receptores (g).

El cuadro de contadores lleva los elementos de protección y medida necesarios. Suele llevar como mínimo un contador monofásico o trifásico, para medir la energía activa; pudiendo conectarse también contadores para medir la energía reactiva. Los contadores pueden ser de doble o triple tarifa para facturar a distinto precio la energía consumida en horas de bajo consumo de la consumida en horas de gran consumo (horas punta).

Los cuadros generales de distribución de fuerza y de alumbrado deben llevar un interruptor general de

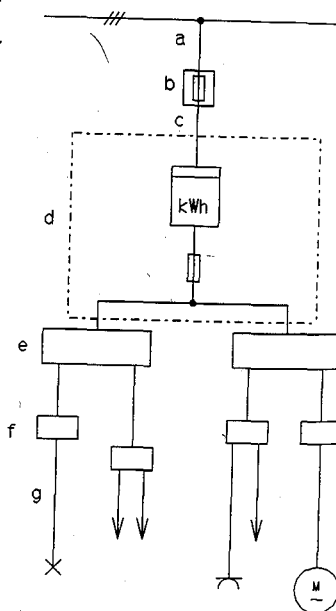


Fig. 8.11

corte omnipolar y por cada salida un interruptor automático o interruptor manual con fusibles. Los dos cuadros de fuerza y alumbrado suelen formar un conjunto único, aunque con circuitos perfectamente separados. Además de la bornas de conexión principales (fases y neutro) los cuadros tienen una conexión a tierra, de donde parte el conductor de protección.

Los cuadros secundarios constan de un interruptor general (que suele ser un interruptor diferencial) y por cada salida un interruptor automático, un interruptor manual con fusibles o un contactor guardamotor.

La carga correspondiente a edificios comerciales y de oficinas. Según la instrucción (MIE BT 010) se tomará como previsión de carga mínima 100 W por metro cuadrado y por planta, con un mínimo por abonado de $5\,000 \text{ W}$.

En estos edificios se necesitan en algunos casos, instalaciones auxiliares de suministro de energía eléctrica, además de alumbrados especiales.

Cuando en la instalación se utilizan equipos electrónicos, se originan armónicos (intensidades de frecuencias múltiplos de 50 Hz), que distorsionan la forma de onda senoidal, por lo que se utilizan filtros o compensadores de armónicos para limitarlos. El tercer armónico, de frecuencia 150 Hz , provoca intensidades de corriente por el neutro, por lo que se tiende en estos casos a no reducir su sección respecto a los conductores de fase.

8.18. INSTALACIONES DE EMERGENCIA

Son instalaciones que tienen por objeto solucionar los fallos del suministro normal de energía eléctrica.

■ Suministros complementarios

Son las que a efectos de seguridad y continuidad del suministro, complementan a un suministro normal (artículo 13 del R.B.T.). Comprenderá los suministros siguientes:

- **Suministro de socorro.** Para una potencia receptora máxima del 15% del suministro normal. Deben disponer de suministro de socorro: teatros, cines, salas de baile y todos los edificios de espectáculos públicos. Si tienen capacidad de asistencia o reunión de más de 300 personas, los centros de enseñanza, bibliotecas, casinos y salas de conferencia (artículo 14 del R.B.T.).
- **Suministro de reserva.** Para mantener en servicio elementos de funcionamiento indispensables de la instalación receptora hasta una potencia máxima del 50% de la potencia de suministro normal. Deben disponer de suministro de reserva: estadios y pabellones deportivos, estaciones de viajeros, aeropuertos y establecimientos comerciales con gran afluencia de público, como grandes almacenes, así como hospitales, clínicas, sanatorios y ambulatorios.
- **Suministro duplicado.** Para suministrar energía al abonado sin las limitaciones de los suministros anteriores.

■ Alumbrados especiales

Las instalaciones de alumbrado especial tienen por objeto asegurar, aun faltando el alumbrado general, la iluminación en los locales y accesos hasta las salidas, para una eventual evacuación del público, o iluminar otros puntos que se señalen (MIE BT 025). Se incluyen dentro de estos alumbrados:

- **Alumbrado de emergencia.** Para la evacuación segura del público al exterior del local cuando falle el alumbrado general o la tensión de alimentación baje a menos del 70%. La alimentación se hará por fuente propia que permitirá el funcionamiento por lo menos una hora (suelen utilizarse baterías que se alimentan directamente de la red normal). El nivel de iluminación es de 5 lm/m² (hoja de interpretación número 25 de la instrucción MIE BT 025). Deben disponer de alumbrado de emergencia: locales de reunión con capacidad de 300 o más personas, locales de espectáculos y establecimientos sanitarios. Se localiza el alumbrado de emergencia en la proximidad de las intersecciones y cambios de dirección de las rutas de evacuación, encima de las puertas de salida, en escaleras, en rellanos y desniveles del suelo.
- **Alumbrado de señalización.** Para señalar de un modo continuo durante determinados períodos de tiempo, puertas, pasillos, escaleras y salidas de los locales. Será alimentado por dos suministros, normal, complementario o propio y deberá proporcionar en el eje de los pasos principales una iluminación mínima de 1 lux. Los pequeños pilotos de señalización instalados en escalones y desniveles se llaman alumbrado de balizamiento. Deben disponer de alumbrado de señalización los estacionamientos subterráneos, teatros, cines, casinos, hoteles, establecimientos comerciales, establecimientos sanitarios y los locales donde puedan producirse aglomeraciones de público.
- **Alumbrado de reemplazamiento.** Permite la continuación del alumbrado total durante un mínimo de 2 horas. Será alimentado por fuentes propias de energía. Deberán disponer de alumbrado de reemplazamiento los establecimientos sanitarios, en quirófanos, salas de cura y unidades de vigilancia intensiva.

■ Grupos electrógenos

La fuente propia de energía estará constituida por baterías de acumuladores o aparatos autónomos automáticos, o grupos electrógenos. En los establecimientos sanitarios, hoteles, locales de espectáculos de gran capacidad, estaciones de viajeros, estacionamientos subterráneos, aeropuertos y establecimientos comerciales con gran afluencia de público, las fuentes propias de energía deberán poder suministrar energía a los alumbrados especiales y tener la potencia necesaria para atender servicios urgentes e indispensables.

El grupo electrógeno está formado por un alternador movido por un motor (generalmente Diesel), que cuando falla el suministro general se pone en marcha, manual o automáticamente. El arranque automático se realiza mediante el dispositivo de control, que arranca el motor, abre el contactor de la red y cierra el grupo

electrógeno (fig. 8.12). El alternador suministra energía a los receptores prioritarios hasta que se restablece la tensión de red, en cuyo momento el equipo de control abre el contactor de grupo y cierra el de red, restableciendo el suministro.

Los sistemas de arranque del motor Diesel pueden ser: manuales, por aire comprimido o eléctrico. El sistema eléctrico es el más utilizado y consiste en un motor de corriente continua alimentado por batería de acumuladores.

La elección de la potencia del grupo electrógeno es función de la potencia que demanda la instalación en el arranque. Por ello es necesario determinar si se conectan al grupo todas las cargas simultáneamente o si la conexión se realiza de forma escalonada.

■ Equipos de suministro de alimentación ininterrumpida (SAI)

El sistema más utilizado está constituido por una batería de acumuladores y dos unidades básicas, cargador de baterías y ondulador, que transforma la corriente continua en alterna de frecuencia constante. Cuando falla la red de alimentación el suministro queda asegurado sin interrupción.

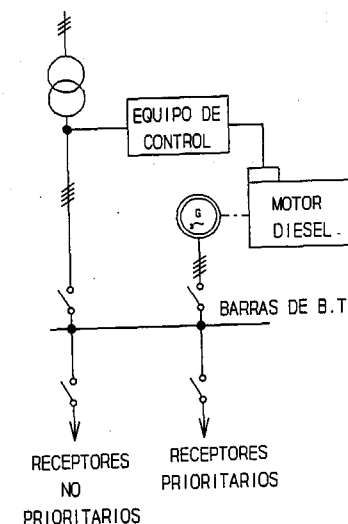


Fig. 8.12

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

8.18-1 En un comercio que ocupa la planta baja de un edificio destinado a viviendas se quieren instalar los receptores siguientes:

Alumbrado:

- Nueve pantallas de dos tubos fluorescentes de 36 W, 220 V en cada una de las seis secciones del comercio.
- Treinta y cinco puntos de luz fluorescentes de 18 W, 220 V, para pasillos y escaleras.

Fuerza:

- Dos motores de 3 CV, 380/220 V, 5/8,7 A, 50 Hz, $\cos\phi=0,8$.
- Un motor de 4 CV, 380/220 V, 6,7/11,6 A, 50 Hz, $\cos\phi=0,82$.

La tensión de servicio es trifásica con neutro 380/220 V, 50 Hz.

Los conductores serán de cobre, unipolares, aislados con PVC para 750 V, en instalación bajo tubo. La caída de tensión permitida en las derivaciones es el 1%.

Calcular:

- Previsión de cargas del local.
- Sección de la derivación individual del cuadro de contadores al cuadro general del local, trifásica con neutro. Longitud 25 m.
- Derivación del cuadro general del local al cuadro de control de motores, trifásico con neutro. Longitud 10 m.
- Diferencial y magnetotérmico para protección de la línea del control de motores.

- a) La previsión de cargas de alumbrado se calcula, según la instrucción 032 del R.B.T., teniendo en cuenta el coeficiente 1,8 para lámparas de descarga. Potencia total de alumbrado $P_a = 9 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 36 \cdot 1,8 + 35 \cdot 18 \cdot 1,8 = 8\,132,4 \text{ W}$. La previsión de cargas para fuerza, según la instrucción 034 del R.B.T. se calcula para la instalación de varios motores, teniendo en cuenta que la carga nominal del mayor debe incrementarse en un 125 %.

$$P_m = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 6,7 \cdot 1,25 \cdot 0,82 + 2 \cdot \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 5 \cdot 0,8 = 9\,785,48 \text{ W}$$

La previsión de carga del local:

$$P = P_a + P_m = 8\,132,4 + 9\,785,48 = 17\,917,88 \text{ W}$$

- b) La caída de tensión en la derivación individual al local $u = \frac{1 \cdot 380}{100} = 3,8 \text{ V}$

$$\text{La sección de los conductores } s = \frac{LP}{cuV_L} = \frac{25 \cdot 17\,917,88}{56 \cdot 3,8 \cdot 380} = 5,5 \text{ mm}^2$$

La sección comercial más próxima por exceso es de 10 mm^2 , que según el R.B.T., instrucción 017, admite la intensidad de 36 A (tabla 2.12).

La intensidad que circula por el conductor, considerando como factor de potencia global de la instalación el más pequeño (0,8) para calcular el caso más desfavorable:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi} = \frac{17\,917,88}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 34 \text{ A}$$

Esta intensidad es inferior a la admitida con sección de 10 mm^2 , por lo que se puede admitir como válida, aunque por ser muy ajustada se suele escoger para posibles ampliaciones una sección de 16 mm^2 que admite, según el R.B.T. una intensidad de 48 A. con tubo de diámetro mínimo 29 mm.

- c) En la derivación al cuadro de motores la caída de tensión $u = \frac{1 \cdot 380}{100} = 3,8 \text{ V}$

$$\text{La sección de los conductores } s = \frac{LP}{cuV_L} = \frac{10 \cdot 9\,785,48}{56 \cdot 3,8 \cdot 380} = 1,21 \text{ mm}^2$$

La sección comercial más próxima es de $1,5 \text{ mm}^2$, que según el R.B.T., instrucción 017, admite 11 A (tabla 2.12).

La intensidad que circula por el conductor con factor de potencia global de los motores el más pequeño (0,8), considerando el caso más desfavorable:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi} = \frac{9\,785,48}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 18,58 \text{ A}$$

Esta intensidad es mayor que la admitida para esa sección, por lo que se puede escoger la sección mínima de 4 mm^2 que, según el R.B.T., admite 20 A. Cuando la sección está muy ajustada se suele escoger la sección inmediatamente superior; en este caso 6 mm^2 , que admite una intensidad de 26 A.

Esta derivación estará formada por cuatro conductores de cobre, de sección 6 mm^2 para las tres fases y neutro, además del conductor de protección ($4 \times 6 + \text{T.T.}$).

- d) El interruptor diferencial tendrá como mínimo una intensidad nominal de 25 A, mayor que la intensidad que circulará por el conductor. La sensibilidad para circuitos de fuerza se escoge de 300 mA. Las características del diferencial pueden ser: 40 A, 300 mA, 400 V.

El interruptor magnetotérmico debe tener una intensidad nominal que cumpla la condición: $18,58 \text{ A} \leq I_n \leq 26 \text{ A}$.

El poder de corte, considerando que el magnetotérmico está alejado del centro de transformación de alimentación, es suficiente de 6 kA.

Las características del magnetotérmico pueden ser: 25 A, 6 kA, 400 V.

- 8.18-2 En un local comercial se desean instalar los siguientes receptores:

Alumbrado:

Siete pantallas de 2 tubos fluorescentes de 58 W, 220 V.

Doce lámparas de incandescencia de 60 W, 220 V.

Fuerza:

Dos motores de 1,5 CV, 380/220 V, 2,7/4,7 A, 50 Hz, $\cos \varphi = 0,82$.

Un motor de 4 CV, 380/220 V, 6,8/11,8 A, 50 Hz, $\cos \varphi = 0,81$.

Instalación de calefacción de 6 KW, 380/220 V, $\cos \varphi = 1$

Calcular la sección mínima de la derivación individual desde el cuadro de contadores al cuadro general del local, trifásico con neutro. Longitud 25 m. Caída de tensión permitida 1 %.

La tensión de servicio es trifásica con neutro, 380/220 V, 50 Hz.

Los conductores son de cobre, unipolares, aislados con PVC para 750 V, en instalación empotrada bajo tubo.

Solución: 10 mm^2

8.18-3 Un supermercado tiene una instalación según el esquema de la figura 8.13, con un cuadro general de fuerza y alumbrado. Las potencias a instalar y los receptores están indicados en el esquema. Las lámparas para alumbrado interior son fluorescentes. Por cada línea de tomas de corriente se considera como potencia a suministrar simultáneamente 1 000 W.

La instalación interior está formada por conductores de cobre unipolares, tipo H07V-R, en instalación empotrada bajo tubo. La derivación individual al cuadro general tiene de longitud 5 m. La longitud máxima de las derivaciones que parten del cuadro es de 15 m para alumbrado y 20 m para otras aplicaciones.

Calcular e indicar sobre el esquema las secciones de los conductores, diámetro de los tubos y características de los aparatos de medida y protección.

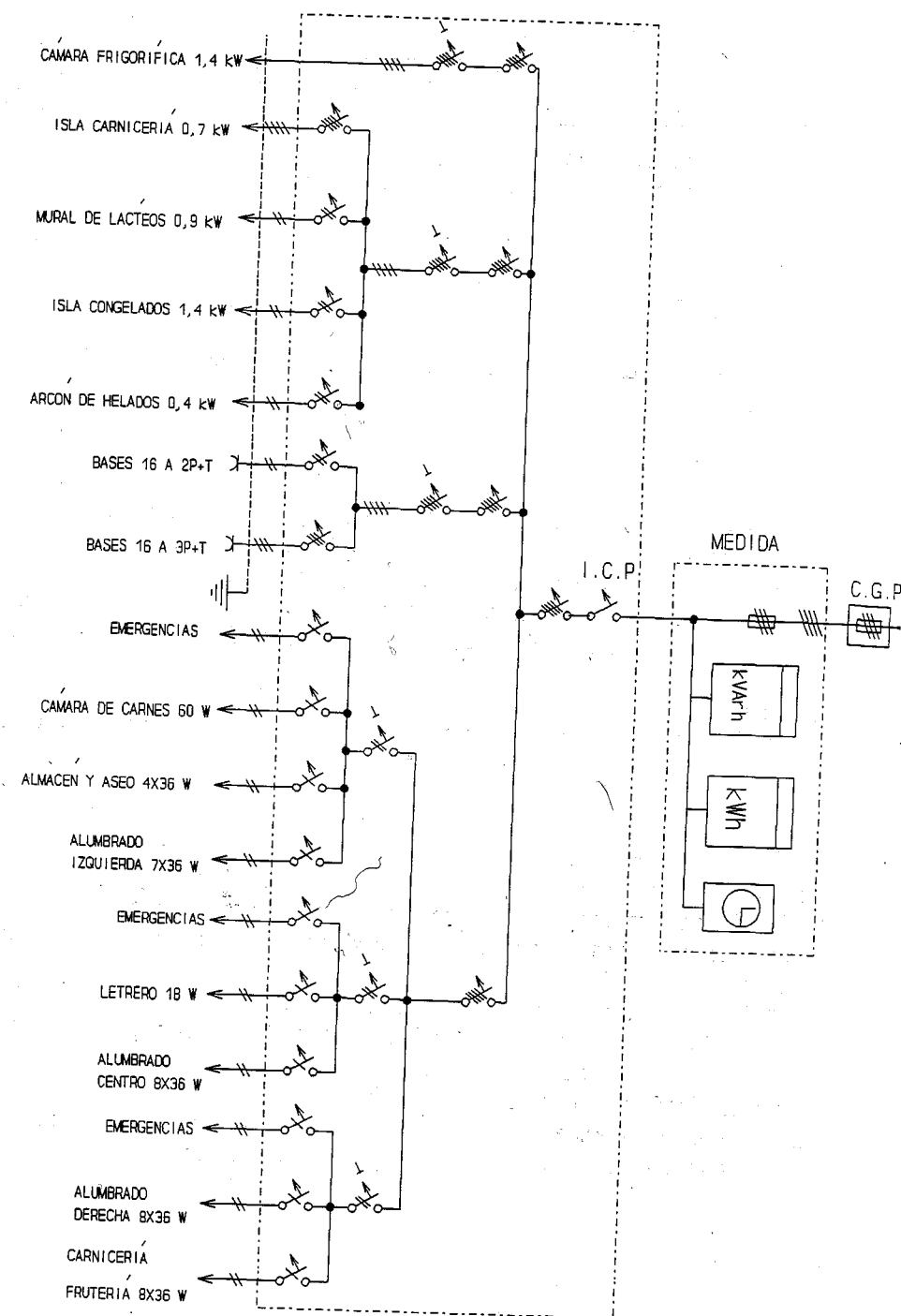


Fig. 8.13

8.19. INSTALACIONES INDUSTRIALES

Hay que distinguir dos casos:

- 1) Instalación con acometida en B.T.: En industrias cuya demanda de potencia es pequeña. El esquema general típico es igual que el de los edificios singulares, según el tipo de industria.
- 2) Instalaciones con acometida en A.T. (fig. 8.14): En industrias cuya demanda de potencia es grande (según las normas de la empresa suministradora) la energía suele suministrarse en A.T., por lo que es preciso instalar un centro de transformación. El esquema general típico de la instalación con un centro de transformación de abonado es el siguiente: acometida (a), apartamta de maniobra y protección en A.T. (b), contadores totalizadores en A.T. (c), transformador de potencia (d) y cuadro de distribución de fuerza y alumbrado para B.T. (e).

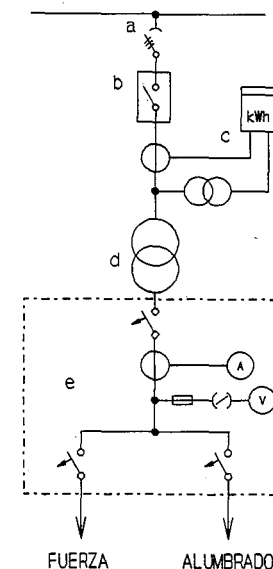


Fig. 8.14

La apartamta de maniobra y protección depende del diseño de la instalación. El cuadro general de distribución en B.T. suele llevar un interruptor automático general de corte omnipolar, aparatos indicadores de tensión e intensidad, interruptores generales automáticos para fuerza y alumbrado.

Los cuadros secundarios de distribución están constituidos igual que en las instalaciones en edificios singulares, adaptándose en cada caso a las particularidades de la instalación.

Carga correspondiente a edificios destinados a concentración de industrias. Según la instrucción (MIE BT 010) se tomará como previsión de carga mínima 125 W por metro cuadrado y por planta.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

8.19-1 Se desea instalar una nave industrial con los siguientes receptores:

Alumbrado:

Catorce puntos de luz con lámparas de vapor de mercurio de 125 W, 220 V.

Seis puntos de luz con lámparas fluorescente de 36 W, 220 V.

Fuerza:

Un motor de 10 CV, 380/220 V, 15,8/27,2 A, 50 Hz, $\cos\phi=0,85$.

Un motor de 20 CV, 660/380 V, 16,86/29,2 A, 50 Hz, $\cos\phi=0,88$.

Un motor de 2 CV, 380/220 V, 3,6/6,2 A, 50 Hz, $\cos\phi=0,8$.

La conexión se hará según el esquema unifilar de la figura 8.15, en donde se indican longitudes, número de conductores y caídas de tensión permitidas. La tensión de servicio es trifásica 380/220 V, 50 Hz. Calcular:

- a) Previsión de cargas de la industria.
- b) Sección de la línea de reparto.
- c) Sección de la derivación individual al cuadro de control de motores.
- d) Sección de la derivación al motor de 10 CV desde su cuadro de control.
- e) Sección de la derivación al cuadro secundario de alumbrado.

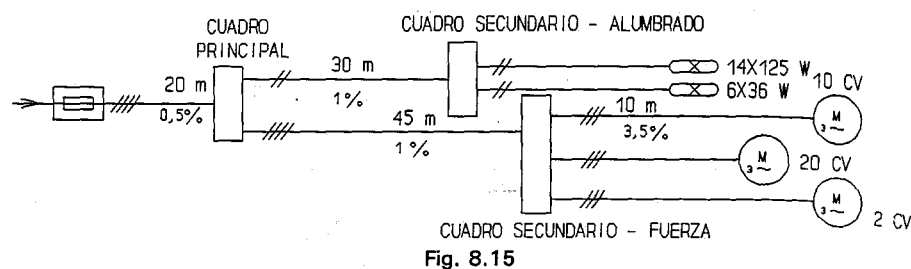


Fig. 8.15

La línea de reparto estará formada por un cable tetrapolar para distribución de energía, con conductores de cobre, aislados con XLPE para 1 000 V, en instalación bajo tubo.

Las derivaciones estarán formadas por conductores de cobre, unipolares, aislados con PVC para 750 V, en instalación bajo tubo.

- a) La previsión de cargas para fuerza, según la instrucción 034 del R.B.T. se calcula para la instalación de varios motores, teniendo en cuenta que la carga nominal del mayor debe incrementarse en un 125%.

$$P_m = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 29,2 \cdot 1,25 \cdot 0,88 + \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 15,8 \cdot 0,85 + \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 3,6 \cdot 0,8 = 31\,875,6 \text{ W}$$

La previsión de cargas de alumbrado se calcula, según la instrucción 032 del R.B.T., teniendo en cuenta el coeficiente 1,8 para lámparas de descarga.

$$P_a = 14 \cdot 125 \cdot 1,8 + 36 \cdot 6 \cdot 1,8 = 3\,538,8 \text{ W}$$

$$\text{La potencia total } P = P_m + P_a = 31\,875,6 + 3\,538,8 = 35\,414,4 \text{ W}$$

- b) La caída de tensión en la línea de reparto $u = \frac{0,5 \cdot 380}{100} = 1,9 \text{ V}$

$$\text{La sección de los conductores } s = \frac{LP}{cuV_L} = \frac{20 \cdot 35\,414,4}{56 \cdot 1,9 \cdot 380} = 17,5 \text{ mm}^2$$

La sección comercial más próxima por exceso es de 25 mm², que según el R.B.T., instrucción 004, admite bajo tubo 110·0,8=88 A (tabla 2.3).

La intensidad que circula por el conductor, considerando como factor de potencia global de la instalación el más pequeño (0,8) para calcular el caso más desfavorable

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi} = \frac{35\,414,4}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 67,25 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la admitida. Es válida la sección de 25 mm².

La línea repartidora estará formada por un cable con tres conductores activos de sección 25 mm² y el conductor neutro con sección 16 mm². (3×25+1×16)

- c) En la derivación al cuadro de motores la caída de tensión $u = \frac{1 \cdot 380}{100} = 3,8 \text{ V}$

$$\text{La sección de los conductores } s = \frac{LP}{cuV_L} = \frac{45 \cdot 31\,875,6}{56 \cdot 3,8 \cdot 380} = 17,74 \text{ mm}^2$$

La sección comercial más próxima por exceso es de 25 mm², que según el R.B.T., instrucción 017, admite 64 A (tabla 2.12).

La intensidad que circula por el conductor, para un factor de potencia global de los motores 0,8 (el más pequeño), para calcular el caso más desfavorable.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi} = \frac{31\,875,6}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 60,53 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la admitida para esa sección, por lo que se escoge con sección mínima 25 mm².

Esta derivación estará formada por tres conductores de cobre, de sección 25 mm² para las tres fases y un conductor neutro de sección 16 mm², además del conductor de protección o de toma de tierra. (3×25+1×16+T.T.)

- d) Derivación al motor de 10 CV

$$\text{La caída de tensión } u = \frac{3,5 \cdot 380}{100} = 13,3 \text{ V}$$

La potencia a considerar en el cálculo, según la instrucción 034 del R.E.B.T. se calcula para la instalación de un motor, teniendo en cuenta que su carga nominal debe incrementarse en un 125%.

$$P_{m1} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 15,8 \cdot 1,25 \cdot 0,85 = 11\,049,2 \text{ W}$$

$$\text{La sección de los conductores } s = \frac{LP}{cuV_L} = \frac{10 \cdot 11\,049,2}{56 \cdot 13,3 \cdot 380} = 0,39 \text{ mm}^2$$

La sección comercial más próxima por exceso es de 1 mm², que según el R.E.B.T., instrucción 017, admite 8,5 A (tabla 2.12).

La intensidad que circula por el conductor $I_{m1} = 15,8 \cdot 1,25 = 19,75 \text{ A}$

Esta intensidad es mayor que la admitida para esa sección, por lo que se escoge la sección de 6 mm² que, según el R.E.B.T., admite 26 A.

Esta derivación estará formada por tres conductores de cobre, de sección 6 mm² para las tres fases, además del conductor de protección (3×6+T.T.).

- e) La caída de tensión en la derivación al cuadro de alumbrado $u = \frac{1 \cdot 220}{100} = 2,2 \text{ V}$

$$\text{La sección de la derivación } s = \frac{2LP}{cuV_L} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 3\,538,8}{56 \cdot 2,2 \cdot 220} = 7,83 \text{ mm}^2$$

La sección comercial más próxima por exceso es de 10 mm², que según el R.E.B.T., instrucción 017, admite una intensidad de 40 A (tabla 2.12).

La intensidad que circula por la derivación con un factor de potencia unidad

$$I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{3\,538,8}{220 \cdot 1} = 16,09 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la admitida en ese conductor, por lo que la sección es válida. La derivación será de dos conductores, fase y neutro de sección 10 mm², y un conductor de protección o de toma de tierra (2×10+T.T.).

8.19-2 En un taller se instalan los siguientes receptores:

Fuerza:

Un motor de 10 CV, 380/220 V, 15,8/27,2 A, 50 Hz, $\cos \varphi = 0,86$

Un motor de 2 CV, 380/220 V, 3,6/6,2 A, 50 Hz, $\cos \varphi = 0,8$.

Dos líneas de tomas de corriente de 16 A, trifásica con neutro y conductor de protección, con una potencia a considerar de 1 kW cada una.

Alumbrado:

Seis luminarias con una lámpara de vapor de mercurio de 125 W, 220 V.

Seis luminarias con 2 tubos fluorescentes de 36 W, 220 V, cada una.

Calcular:

- Sección de la línea general de alimentación, trifásica con neutro, de la caja general de protección a la caja de contadores. Longitud 30 m. Caída de tensión admisible en la línea 0,5%.
- Sección de la derivación al cuadro general, trifásica con neutro. Longitud 15 m. Caída de tensión admisible 0,5%.
- Sección de la derivación al cuadro de fuerza. Longitud 20 m. Caída de tensión admisible 1%.

La tensión de servicio es trifásica con neutro, 380/220 V, 50 Hz.

La línea general de alimentación estará formada por un cable tetrapolar con conductores de cobre, aislados con PVC para 1 000 V, en canalización bajo tubo.

Las derivaciones estarán formadas por conductores de cobre, unipolares, aislados con PVC para 750 V, en canalización bajo tubo.

Solución: a) 16 mm²; b) 10 mm²; c) 10 mm².

8.19-3 Una nave industrial de uso indefinido lleva una instalación según el esquema unifilar de la figura 8.16, con un cuadro general de mando y protección. Las potencias a instalar y los receptores están indicadas en el esquema. Las lámparas para alumbrado interior son fluorescentes y de vapor de mercurio (para almacén), mientras que las de alumbrado exterior son de vapor de sodio. Por cada línea de tomas de corriente se considera como potencia a suministrar simultáneamente 1 000 W.

La línea de alimentación, de longitud 10 m, y la derivación individual, de longitud 6 m, están formadas por un cable tetrapolar, con conductores de cobre, RV 0,6/1 kV, en instalación empotrada bajo tubo.

La instalación interior está formada por conductores de cobre unipolares, tipo H07VR, en instalación empotrada bajo tubo. La longitud máxima de las derivaciones que parten del cuadro es de 12 m.

Calcular e indicar sobre el esquema, las secciones de los conductores, diámetro de los tubos y características de los aparatos de medida y protección.

8.19-4 Un almacén de maquinaria agrícola lleva una instalación según el esquema unifilar de la figura 8.17, con un cuadro general de alumbrado y un cuadro de protección de otras aplicaciones. Las potencias a instalar y los receptores están indicadas en el esquema. Las lámparas para alumbrado interior son fluorescentes y de vapor de mercurio (para almacén), mientras que las de alumbrado exterior son de vapor de sodio. Por cada línea de tomas de corriente se considera como potencia a suministrar simultáneamente 1 000 W.

La línea general de alimentación, de longitud 10 m, y la derivación individual, de longitud 5 m, están formadas por un cable tetrapolar, con conductores de cobre, RV 0,6/1 kV, en instalación empotrada bajo tubo.

La instalación interior está formada por conductores de cobre unipolares, tipo H07VR, en instalación empotrada bajo tubo. La longitud máxima de las derivaciones es de 25 m para alumbrado y 20 m para otras aplicaciones.

Calcular e indicar sobre el esquema las secciones de los conductores, diámetro de los tubos y características de los aparatos de medida y protección.

8.19-5 Una fábrica de decoración de cerámica, con acometida en A.T. a un transformador tipo intemperie, lleva una instalación según el esquema unifilar de las figuras 8.18 y 8.19, desde el interruptor de secundario del transformador, con un cuadro general de fuerza y dos cuadros de protección de alumbrado. Las potencias a instalar y los receptores están indicadas en el esquema. Las lámparas para alumbrado interior son fluorescentes y de vapor de mercurio, mientras que las de alumbrado exterior son de vapor de sodio. Por cada línea de tomas de corriente se considera como potencia a suministrar simultáneamente 1 000 W.

La línea general de alimentación, de longitud 30 m, está formada por un cable tetrapolar, con conductores de cobre, RV 0,6/1 kV, en instalación empotrada bajo tubo.

La instalación interior está formada por conductores de cobre unipolares, tipo H07VR, en instalación empotrada bajo tubo. La longitud del cuadro general al cuadro de alumbrado (para la nave principal) es de 22 m y de este al cuadro de alumbrado 2 (almacén y fabricación de porcelana) es de 12 m. La longitud máxima de las derivaciones es de 20 m para alumbrado y 30 m para los receptores de fuerza.

Calcular e indicar sobre los esquemas, las secciones de los conductores, diámetro de los tubos y características de los aparatos de medida y protección.

8.19-6 Para alimentar una nave industrial se proyecta la instalación de enlace en M.T. y el centro de transformación (CT), con las siguientes características según las indicaciones de la empresa suministradora de energía:

Entronque con la línea de distribución aérea de 20 kV:

- Seccionador de cuchillas unipolares 24 kV/400-630 A, con trinquete (dispositivo loadbuster).
- Autoválvulas 24 kV/10 kA con dispositivo de desconexión a tierra. Línea de tierra con conductor de cobre de 50 mm² de sección, bajo tubo de plástico rígido de diámetro 50 mm, conectado mediante soldadura de alto punto de fusión, a cuatro picas de acero galvanizado de diámetro 22 mm.
- Terminaciones tipo intemperie de material plástico 24 kV.

Línea de M.T. subterránea a 20 kV.

- Tres cables unipolares DHV 12/20 kV 1×50 mm² Al, con tubo de PVC, diámetro 125 mm, longitud 5 m y capuchón protege aguas.
- Tres tubos de fibrocemento bajo losa de hormigón con diámetro 120 mm, a una profundidad de 1,2 m. Seis arquetas de dimensiones 1,2×1,2 m, con tapa de fundición de 0,6 m de diámetro. Longitud de la canalización 200 m.

Centro de transformación interior con cabinas de A.T. prefabricadas 24 kV/630-400 A, embarrados de cobre y alumbrado interior:

- Cabina de remonte, con terminales de interior de 24 kV y seccionador de 400 A.
- Cabina de protección con disyuntor en SF₆, tensión de servicio 24 kV, poder de corte 250 MVA a 20 kV. Disparo del disyuntor por termostato o sonda térmica del transformador. Equipo de relés directos de sobreintensidad y tiempos dependientes (regulables entre I_n y $2 \times I_n$ A y tiempo entre 0,5 y 3 s, tarados a la intensidad $1,5 \times I_n = 18$ A y 0,5 s) disparo instantáneo en cortocircuito.
- Cabina de medida, con 2 transformadores de tensión 22/0,110 kV, clase 0,5, 50 VA, 24 kV y dos transformadores de intensidad, relación X/5 A, clase 0,5, 15 VA, 24 kV.

- Cabina de By-Pass, con tres seccionadores de 400 A, 24 kV, para la comprobación por la empresa distribuidora del equipo de medida con transformadores patrones independientes.
- Transformador de 400 kVA; 20/0,400 kV, $u_{cc}=4,1\%$, en baño de aceite con sonda térmica.

Equipo de medida en A.T.:

- Armario de plástico con puerta transparente y precintable, ubicado en el CT, de dimensiones 750×100×300 mm.
 - Contador de energía activa a tres hilos, con maxímetro.
 - Contador de energía reactiva a tres hilos.
 - Contador de energía activa de doble tarifa a tres hilos.
 - Discriminador horario programable.
 - Regleta de verificación y placa para montaje y colocación de todos los elementos.
- Conexión al cuadro de B.T. Cables unipolares de cobre RV 0,6/1 kV 150 mm², dos por fase y uno para neutro.

Cuadro de B.T. Armario metálico con:

- Interruptor tetrapolar 1000 A/750 V
- Cuatro columnas aisladas seccionables 400 A.
- Fusibles 250 A.

Red de tierras para CT:

- Red de tierras para neutro del transformador con conductor aislado RV 0,6/1 kV de cobre de 50 mm² de sección y longitud 15 m (bajo tubo de PVC de diámetro 50 mm) conectado a 4 picas de tierra de acero galvanizado de diámetro 22 mm, mediante soldadura de alto punto de fusión.
- Red de tierras para masas con conductor de cobre desnudo, de sección 50 mm², conectado a 4 picas de tierra de diámetro 22 mm, con soldadura aluminotérmica.

Iluminación del CT:

- Iluminación general del local del CT con dos pantallas fluorescentes estancas de potencia 2×36 W.
- Iluminación de emergencia con dos bloques autónomos de 300 lúmenes.

Señalizaciones del CT y material de seguridad:

- Cuadro de primeros auxilios.
- Armario metálico con gafas y mascarillas.
- Extintor de incendios.
- Rótulos.

Dibujar el esquema unifilar de la instalación y el esquema multifilar del cuadro de contadores. Calcular:

- Intensidades nominales en primario y secundario del transformador.
- Intensidad de cortocircuito máxima en la línea de M.T. si la potencia de cortocircuito en el punto de entronque es de 500 MVA.
- Intensidad de cortocircuito en el secundario del transformador considerando la red de alimentación de potencia infinita.
- Caída de tensión en la línea de M.T. a plena carga con factor de potencia 0,8, si la resistencia del cable es de 0,4 Ω/km y la reactancia 0,1 Ω/km
- Presupuesto de los materiales de la instalación utilizando catálogos de casas comerciales.

Solución: a) 11,54 A, 577,35 A; b) 14,43 kA; c) 14,1 kA; d) 1,52 V

8.19-7 Para la alimentación de una nave industrial se proyecta un centro de transformación intemperie y la línea de enlace aérea a 20 kV para conexión del CT a la red de distribución de M.T.. La instalación tiene las siguientes características:

Entronque con la línea de distribución aérea de 20 kV:

- Apoyo de seccionamiento HV 1000 R-12, con cruceta recta y cadenas de amarre de dos discos y rótula larga. Vano reducido (20 m) hasta el apoyo de la compañía suministradora de energía.
- Seccionador unipolar 24 kV/400 A con trinquete.

Línea de M.T. aérea a 20 kV.

- Conductor LA-30
- Apoyo de alineación HV 630 R-12, con cruceta tipo bóveda y cadena de suspensión de dos discos y rótula corta. Vano hasta el poste en entronque 70 m.
- Apoyo de protección del centro de transformación HV 1000 R-12, con cruceta recta y cadenas de amarre. Vano hasta el apoyo de alineación 80 m.
- Cortacircuitos de expulsión-seccionamiento 24 kV/100 A (fusible de 6 A), situados en el apoyo de protección.

Centro de transformación intemperie:

- Apoyo metálico de celosía C 3000-12 con cadenas de amarre y forrado antiescala. Vano hasta el apoyo de protección 30 m.
- Autoválvulas 24 kV/10 kA con desconexión a tierra.
- Transformador de 100 kVA, 20/0,400 kV, $u_{cc}=4\%$, en baño de aceite.
- Cable de conexión del transformador al cuadro de B.T., tipo RV 0,6/1 kV 3×95+1×50, de cobre.
- Cuadro de B.T. situado en el apoyo. Armario de poliéster, interruptor tetrapolar, columnas aisladas seccionables 400 A con fusibles de 200 A.
- Línea de puesta a tierra de las masas y autoválvulas, con conductor de cobre sin aislamiento de sección 50 mm², bajo tubo rígido de PVC de diámetro 50 mm a largo del apoyo. Conexión mediante soldadura de alto punto de fusión a cuatro picas de acero galvanizado de diámetro 22 mm.
- Línea de puesta a tierra del neutro, realizada con conductor de cobre RV 0,6/1 kV, de sección 50 mm², bajo tubo rígido de PVC de diámetro 50 mm. Conectada mediante soldadura de alto punto de fusión a cuatro picas de acero galvanizado, de diámetro 22 mm.

Dibujar el esquema unifilar de la instalación y calcular:

- Intensidades nominales en primario y secundario del transformador.
- Intensidad de cortocircuito máxima en la línea de M.T. si la potencia de cortocircuito en el punto de entronque es de 400 MVA.
- Intensidad de cortocircuito en el secundario del transformador considerando la red de alimentación de potencia infinita.
- Caída de tensión a plena carga en la línea de M.T. con factor de potencia 0,8, si la separación entre los conductores es de 1,6-1,6-3,2 m.
- Presupuesto de los materiales de la instalación utilizando catálogos de casas comerciales.

Solución: a) 2,9 A, 144,3 A; b) 11,55 kA; c) 3,6 kA; d) 1,11 V

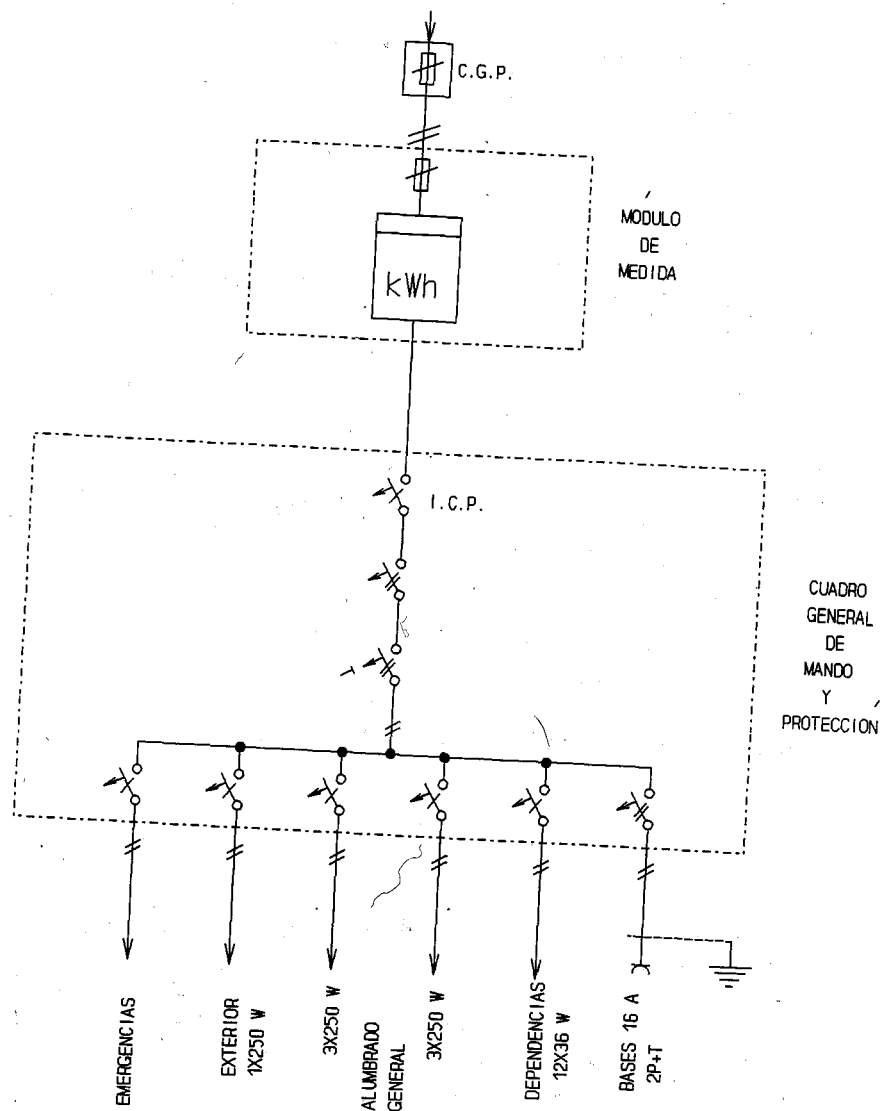


Fig. 8.16

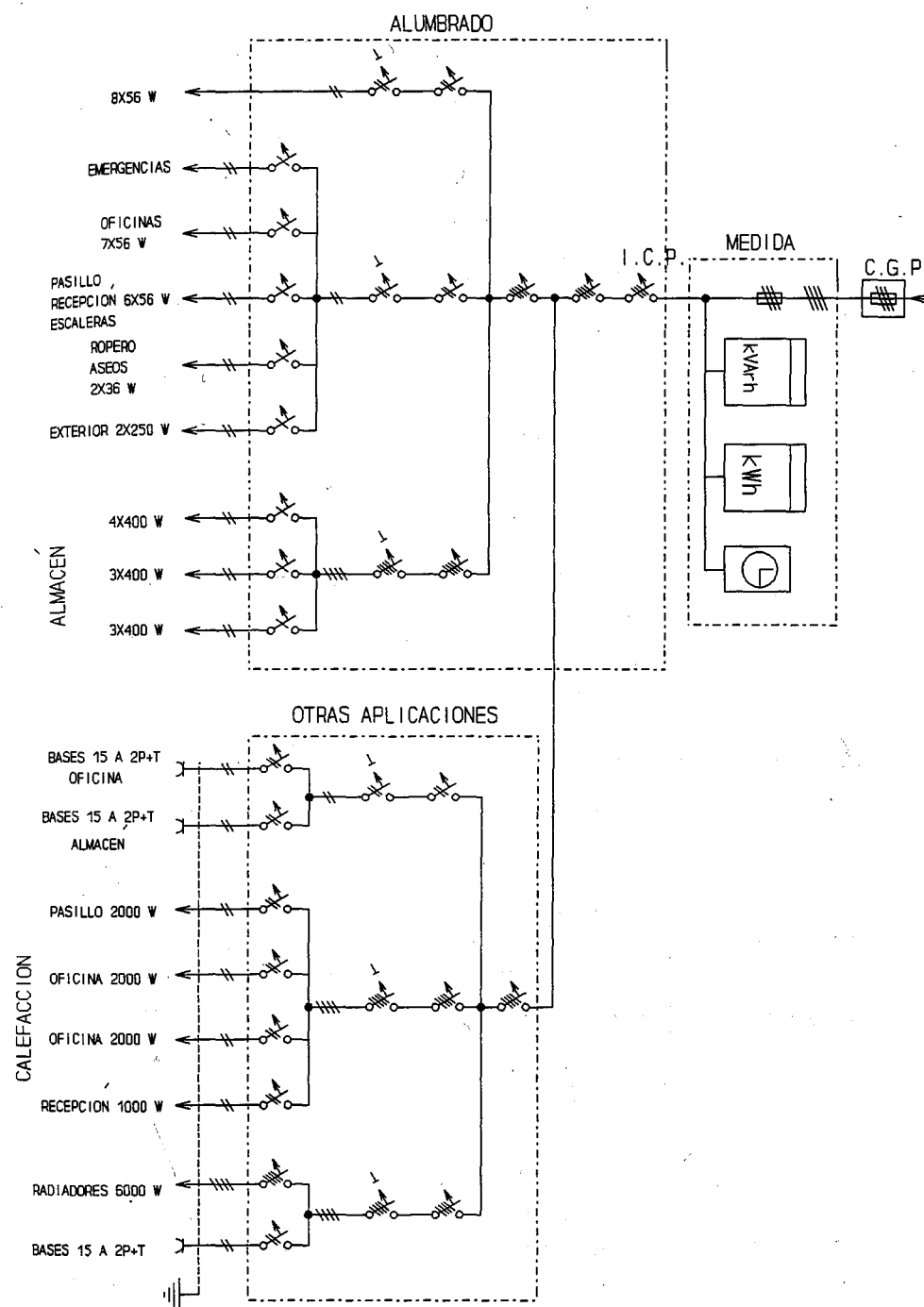
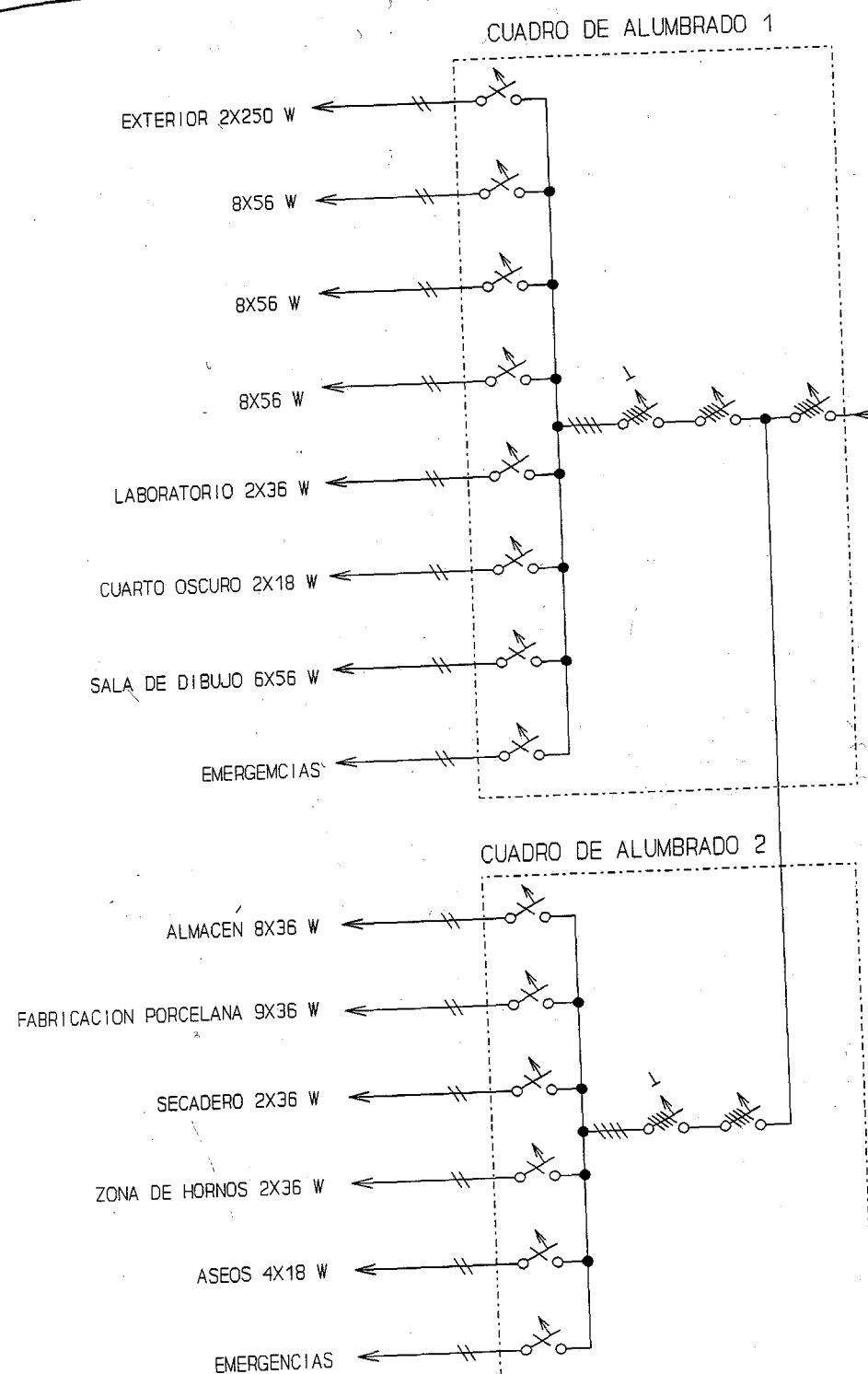
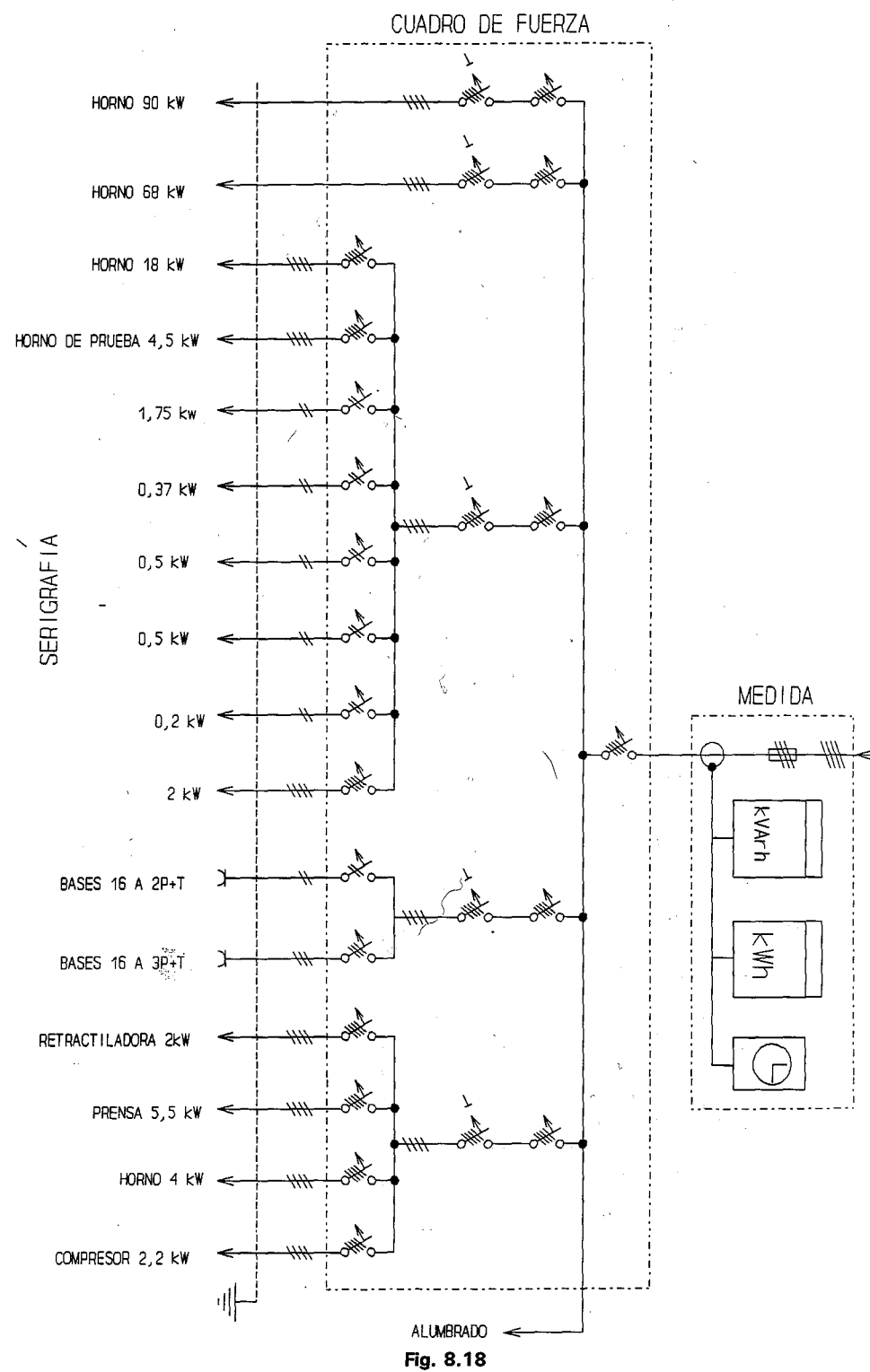


Fig. 8.17



8.20. INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS

Según la instrucción MIE BT 026 se consideran locales con riesgo de incendio o explosión aquellos en los que se fabriquen, procesen, manipulen utilicen o almacenen sustancias susceptibles de inflamarse o de hacer explosión.

El material eléctrico provisto de algún modo de protección que lo hace válido para instalar en atmósferas con riesgo de incendio o explosión, se denomina material *Ex*.

Los sistemas de protección, según normas UNE e instrucción MIE BT 026 son:

- Inmersión en aceite: o
- Sobrepresión interna: p
- Relleno con aislante pulverulento: q
- Seguridad aumentada: e
- Envolvente antideflagrante: d
- Seguridad intrínseca: i
- Encapsulado: m

El material eléctrico *Ex* es apto para ser usado en un tipo de atmósferas con riesgo de incendio o explosión según su temperatura de ignición, que se clasifican en 6 clases:

- Clase T1, con temperatura límite de utilización 450 °C
- Clase T2, con temperatura límite de utilización 300 °C
- Clase T3, con temperatura límite de utilización 200 °C
- Clase T4, con temperatura límite de utilización 135 °C
- Clase T5, con temperatura límite de utilización 100 °C
- Clase T6, con temperatura límite de utilización 85 °C

La elección de la clase de temperatura se escoge según la temperatura de autoignición del gas o de los gases presentes, clasificados, de acuerdo con las temperaturas de autoinflamación, por grupos de explosión IIA, IIB, IIC, según la norma EN 50014.

■ Clasificación del emplazamiento

De acuerdo con las sustancias presentes en el local se clasifican los emplazamientos según la instrucción MIE BT 026 en tres clases:

- Clase I. Que tiene presencia de gases, vapores o nieblas.

Estos emplazamientos se dividen en tres zonas:

Zona 0: con presencia siempre de atmósfera explosiva.

Zona 1: con presencia de atmósfera explosiva de forma ocasional o periódica.

Zona 2: con presencia poco frecuente de atmósfera explosiva.

Pertenecen a esta clase (MIE BT 026) locales como garajes, talleres de reparación de vehículos, gasolineras, refinerías, industrias químicas, cabinas de pintura, etc.

- Clase II. Que tiene presencia de polvo combustible.

Dentro de estos emplazamientos se distinguen dos zonas:

Zona Z: con nubes de polvo.

Zona Y: con capa de polvo.

Pertenecen a esta clase (MIE BT 026) locales como plantas de manipulación y almacenamiento de cereales, plantas de procesado o manipulado de polvos metálicos, etc.

- Clase III. Que tiene presencia de fibras o materiales volátiles fácilmente inflamables.
- Pertenecen a esta clase (MIE BT 026) locales como talleres de confección, procesado y fabricación de fibras combustibles.

■ Elección del material a utilizar en locales con riesgo de incendio o explosión

Para la elección del material eléctrico se tiene en cuenta:

- 1) La clasificación del emplazamiento según MIE BT 026.

En emplazamientos clase I y II, se instalarán materiales *Ex* según los apartados 5, 6, 7, 8 y 9, especificaciones de la instrucción.

Las canalizaciones en las zonas peligrosas pueden realizarse con cables o conductores aislados bajo tubo metálico rígido o flexible o por cables que dispongan de una protección mecánica. Dentro de los tubos se instalan cortafuegos para evitar el corrimiento de gases, vapores y llamas por el interior de los tubos. La intensidad admisible en los conductores deberá disminuirse en un 15% respecto a la instalación convencional y todas las canalizaciones de longitud superior a 5 m, deberán disponer en su comienzo de protección contra cortocircuitos y sobrecargas.

Según el emplazamiento, montaje y utilización se utilizan cables no propagadores de incendio o resistentes al fuego.

En emplazamientos de clase III, se podrá utilizar material eléctrico convencional sin modo de protección, según el apartado 10 de la instrucción. Cuando la manipulación de fibras origine polvo se adoptarán las medidas correspondientes a la clase II.

- 2) El grupo de explosión y la clase de temperatura. De acuerdo con esta clasificación se establecen las características del material eléctrico necesario.

Ejemplo: En un local de pintura están presentes diversas sustancias de grupo de explosión II A, siendo la temperatura de la de más baja ignición 340 °C, la clase de temperatura es T2. Si el material eléctrico a utilizar se desea con protección por seguridad aumentada, la especificación del material será *Ex* e IIA T2.

8.21. INSTALACIONES TEMPORALES Y DE OBRAS

En las instalaciones temporales los elementos de protección y maniobra de la instalación se colocan en armarios o cuadros, que pueden ser desplazados y volver a utilizarse en otra obra.

- Armario de acometida y medida. Alimentado a través de una acometida provisional, contiene la protección general y los equipos de medida.

- Cuadro general de distribución. Alimentado desde el cuadro de medida, contiene un interruptor magnetotérmico de corte omnipolar y un diferencial por cada línea de salida que va a una toma de corriente. Desde este cuadro se alimentan directamente los receptores semifijos (hormigonera, grúa, etc), el alumbrado fijo, los cuadros de alimentación portátil y la salida a 24 V para máquinas portátiles que efectúen el trabajo en zonas mojadas o encima de estructuras conductoras.

- Cuadro auxiliar de maquinaria portátil. Alimentado desde el cuadro general tiene un interruptor magnetotérmico de protección general y corte omnipolar y un interruptor diferencial, de donde parten las salidas a tomas de corriente.

La instalación debe cumplir la instrucción MIE BT 028. Los interruptores diferenciales serán de sensibilidad mínima 300 mA. Suelen utilizarse de esa sensibilidad para líneas de maquinaria semifija, mientras que las restantes líneas se protegen con interruptor de sensibilidad 30 mA. Los armarios son de material aislante de doble aislamiento y todas las tomas de corriente llevan toma de tierra.

Los conductores utilizados para acometida y derivaciones individuales son rígidos o flexibles con tensión de aislamiento 1 kV y del tipo: RZ, VV, DV y RV.

Los conductores utilizados en la alimentación de maquinaria son flexibles, siendo muy usado el DN-F 0,6/1 kV; cable muy resistente al agua.

8.22. INSTALACIÓN DE PARARRAYOS

■ Pararrayos

Es el dispositivo destinado a proteger los edificios de las descargas atmosféricas. Esta constituido por:

- **Cabeza de captación.** Barra metálica con tratamiento anticorrosivo, terminada en punta o puntas (fig. 8.20). En su base se suelda el cable conductor que comunica con tierra. Cuando por encima del pararrayos pasa una nube cargada positivamente, se desplazan electrones hacia la punta y cuando la tensión entre esta y la nube es lo suficientemente grande se origina el rayo.
- **Mástil.** La cabeza de captación va roscada al mástil, que es un tubo de acero galvanizado sujeto al edificio a través de elementos metálicos de fijación.
- **Cable conductor.** Es de cobre y la sección recomendada por la Norma Tecnológica de la Edificación (NTE IPP) es de 50 mm². El cable va sujeto a la cubierta y paredes del edificio mediante grapas colocadas a distancia menor o igual a un metro. En la parte inferior el cable va protegido por un tubo de acero galvanizado de unos 2 m de altura sobre el suelo. Las uniones del conductor se suelen hacer con soldadura aluminotérmica.
- **Toma de tierra.** El cable conductor termina en la toma de tierra, que generalmente se realiza con picas de cobre o acero cobreado, de forma que la resistencia de la toma de tierra no sobrepase los 15 Ω (según la Norma Tecnológica de la Edificación NTE IEP).

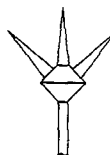


Fig. 8.20

■ Volumen de protección del pararrayos

El volumen o espacio de protección del pararrayos se admite que consiste en un cono de eje vertical, cuyo vértice es la punta y cuya base es un círculo de radio comprendido entre 1 y 2 veces la altura total del pararrayos (fig. 8.21).

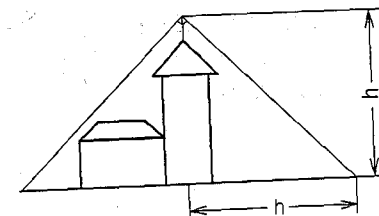


Fig. 8.21

Se utilizan actualmente pararrayos piezoeléctricos. La cabeza de captación, por medio de un dispositivo piezoeléctrico refuerza el campo eléctrico de la punta y entonces la altura del cono de protección se multiplica de 3 a 5 veces por la altura geométrica de la cabeza de captación.

Para la protección de edificios con superficie en planta grande respecto a la altura se pueden instalar varios pararrayos unidos entre sí y con cables conductores independientes, logrando así mediante una superposición de volúmenes la protección de todo el edificio.

Según la Norma Tecnológica de la Edificación (NTE IPP) será necesario la instalación de pararrayos en edificios cuya altura sobrepase los 43 m y en edificios en los que se manipulen sustancias tóxicas, radiactivas, explosivas o fácilmente inflamables. También se instala en edificios cuyo índice de riesgo sobrepase el valor de 27 unidades (el índice de riesgo es función de la zona geográfica, de la estructura del edificio y de las condiciones topográficas del terreno).

8.23. PUESTA A TIERRA EN EDIFICIOS

La instalación de puesta a tierra de los edificios consta de los siguientes elementos (fig. 8.22):

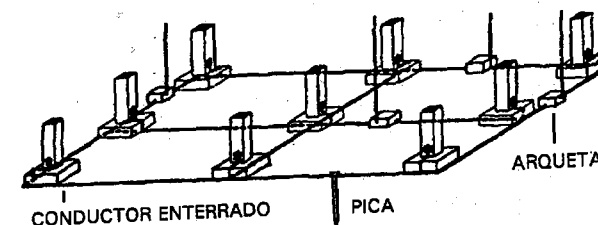


Fig. 8.22

- Un electrodo en anillo de conducción enterrada, que siguiendo el perímetro del edificio conectará todas las puestas a tierra del mismo. Situado en zanja a una profundidad mínima de 80 cm.
- Un conjunto de picas de puesta a tierra, según el terreno y la longitud de la conducción enterrada. Separadas una distancia mínima de 4 m.
- Puntos de puesta a tierra, situados en arquetas, para conexión de las líneas principales de tierra.
- Pletina de puesta a tierra, para conexión de los elementos que deben ponerse a tierra.

Se deben conectar a tierra (según Norma Tecnológica de la Edificación NTE-IEP) las instalaciones siguientes:

- Las instalaciones de pararrayos.
- Las instalaciones de antenas colectivas de TV y FM.

- Las tomas de corriente y masas metálicas de aseos y baños.
- Las instalaciones de fontanería, gas, calefacción, depósitos, caldera, guías de aparatos elevadores y, en general, todo elemento metálico importante.
- Las estructuras metálicas y armaduras de muros y soportes de hormigón.

8.24. CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA

Las partes de una puesta a tierra se estudian en el apartado 5.16. Los conductores que enlazan con la toma de tierra son:

- 1) *Conductores de protección.* La sección mínima de los conductores de protección está fijada en función de la sección de los conductores de fase o polares según el R.B.T., instrucción (MIE BT 017), como se indica en la tabla siguiente:

Tabla 8.9

Secciones de los conductores de fase o polares de la instalación (mm ²)	Secciones mínimas de conductores de protección (mm ²)
$s \leq 16$	s (*)
$16 < s \leq 35$	16
$s > 35$	$s/2$

(*) Con un mínimo de:
 - 2,5 mm² si los conductores de protección no forman parte de la canalización de alimentación y tienen una protección mecánica.
 - 4 mm² si los conductores de protección no forman parte de la canalización y no tienen una protección mecánica.

Los valores de la tabla se refieren a conductores de protección del mismo material que los de fase.

- 2) *Líneas principales de tierra.* Según la instrucción MIE BT 039, la sección mínima es de 16 mm² con conductores de cobre. Esta sección nunca puede ser menor que la sección de las derivaciones de esta línea.

- 3) *Líneas de enlace con tierra.* Según la instrucción MIE BT 039, la sección mínima es de 35 mm² con conductores de cobre, y nunca será inferior a la sección de la línea principal de tierra a la que está conectada.

Los conductores de puesta a tierra forman una línea eléctricamente continua, sin otros elementos en serie ni seccionamientos.

8.25. NÚMERO DE PICAS NECESARIAS PARA LA INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA EN UN EDIFICIO

El número de picas necesarias en la instalación de puesta a tierra de un edificio, se calcula según la longitud L (m) en planta del anillo de la conducción enterrada, la naturaleza del terreno y la existencia de instalación de pararrayos, de acuerdo con la tabla de la Norma Tecnológica de la Edificación NTE IEP. Si la longitud del anillo es menor que la mínima indicada en la tabla 8.10 se debe aumentar la longitud de la conducción.

Tabla 8.10

LONGITUD EN PLANTA DE LA CONDUCCIÓN ENTERRADA (m)								N° de picas
TIPO DE TERRENO								
Terrenos orgánicos, arcillas y margas		Arenas y gravas arcillo- sas, rocas sedimentarias y metamórficas.		Calizas agrietadas y rocas eruptivas.		Grava y arena silicea.		
Sin pararrayos	Con pararrayos	Sin pararrayos	Con pararrayos	Sin pararrayos	Con pararrayos	Sin pararrayos	Con pararrayos	
25	34	28	67	54	134	162	400	0
	30	25	63	50	130	158	396	1
	26		59	46	126	154	392	2
			55	42	122	150	358	3
			51	36	118	146	384	4
			47	34	114	142	380	5
			43	30	110	138	376	6
			39		106	134	372	7
			35		105	130	368	8
					98	126	364	9
					94	122	360	10
					90	118	356	11
					86	114	352	12
					82	110	346	13
					78	105	344	14
					74	102	340	15
					70	98	336	16
						94	328	18
						90	320	20
						86	312	22
						82	304	24
							296	26
							288	28
							280	30
							272	32
							264	34
							256	36
							246	38
							240	40
							232	42
							224	44
							216	46
							208	48
							200	50

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

8.25-1 Calcular el número de picas necesarias en la puesta a tierra de un edificio con pararrayos, construido sobre arena y grava arcillosa y que utiliza un cable de tierra de longitud en planta 50 m.

Para el cálculo se utiliza la tabla 8.10, la cual indica que para una longitud en planta de la conducción enterrada igual o mayor de 47 m y menor de 51 m, se necesitan 5 picas.

8.25-2 Para la puesta a tierra de la estructura de un edificio, que va provisto de pararrayos, situado sobre terreno de arena arcillosa, se dispone de un cable de tierra de cobre desnudo de sección 35 mm², formando anillo con longitud en planta de 31 m, enterrado en zanja a una profundidad de 80 cm, soldado a las armaduras, a la estructura metálica y entre sí por soldadura aluminotérmica. Calcular:

- Longitud necesaria de conductor enterrado.
- Número de picas necesarias.

Solución: a) 35 m; b) 8.

8.25-3 Calcular la mínima longitud que debe tener el cable de tierra de un edificio con pararrayos, construido en un terreno arcilloso, en los siguientes casos:

- Sin utilizar picas.
- Utilizando solamente una pica.

Solución: a) 34 m; b) 30 m.

8.26. NÚMERO DE PICAS NECESARIAS PARA LA INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA PROVISIONAL

El número de picas necesarias en la instalación de puesta a tierra provisional, en función de la naturaleza del terreno se calcula según la tabla de la Norma Tecnológica de la Edificación NTE IEP.

Tabla 8.11

Tipo de terreno	Orgánicos, arcillas y margas	Arenas arcillosas y graveras, rocas sedimentarias y metamórficas	Calizas agrietadas y rocas eruptivas	Grava y arena silíceas
Nº de picas.	2	3	6	12

8.27. PROCESO A SEGUIR EN LA INSTALACIÓN DE ELECTRODOS

■ Conductores enterrados horizontalmente

- Realizar la excavación de la zanja con una profundidad mínima de 80 cm (según la Norma Tecnológica de la Edificación).
- Colocar el conductor en la zanja y recubrirlo de tierra o directamente de hormigón.
- Construir las arquetas de conexión y realizar la conexión de los conductores y las líneas de enlace con tierra.

La arqueta de conexión, enterrada a una profundidad entre 50 y 80 cm, está constituida (según la Norma Tecnológica de la Edificación NTE IEP) por paredes de ladrillo enfoscado, solera y losa de hormigón, con dimensiones interiores en planta de 36x50 cm y altura 25 cm. El punto de puesta a tierra es una barra de cobre recubierta de cadmio.

■ Pica clavada verticalmente

- Realizar un hoyo con una profundidad de unos 80 cm para la arqueta de conexión o pozo de inspección.
- Preparar la pica, colocando la punta de penetración y la cabeza protectora o sufridera.
- Clavar el primer tramo de la pica. Un operario mantiene la pica vertical mientras otro golpea con una maza la cabeza protectora.
- Para clavar otro tramo de la pica se quita la sufridera y se atornilla el segundo tramo, colocando otra vez la cabeza protectora y repitiendo el proceso (a partir de la segunda pica se suele utilizar maquinaria para el clavado).
- Medir la resistencia de tierra cada vez que se introduce un nuevo tramo de la pica.
- Soldar el collar de conexión.
- Realizar el pozo de inspección o arqueta, que pueden ser de materiales prefabricados (fig. 8.23).
- Conectar el conductor de tierra con la pica.

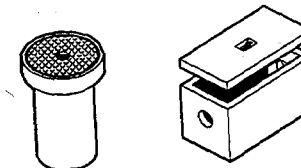


Fig. 8.23 Arquetas de registro prefabricadas. (Cortesía KLK).

■ Placa enterrada verticalmente

- Realizar un hoyo de tal manera que se entierre la placa verticalmente, quedando su parte superior como mínimo a 50 cm de profundidad.
- Colocar la placa enterrada, rellenando el hoyo con tierra arcillosa y regar el terreno.
- Construir el pozo de inspección, colocando un tubo de gres o fibrocemento para pasar por su interior el cable de unión de la placa a la línea de enlace con tierra.
- Conectar la placa a la línea de enlace con tierra.

8.28. CONTROL DE LA REALIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA

Según la Norma Tecnológica de la Edificación NTE IEP, las especificaciones de control de la ejecución de la instalación son:

a) Conducción enterrada:

- Inspección de la conexión con las estructuras metálicas y con las armaduras de muros y soportes de hormigón, que deben estar todos conectados.
- Inspección de la profundidad del cable conductor, que debe ser ajustada a lo especificado con una variación máxima de -10 cm.

b) Arqueta de conexión:

- Control de las dimensiones de una cada cinco arquetas, que deben tener variaciones inferiores a -2 cm.

c) *Pica de puesta a tierra:*

- Control de la separación entre picas, controlando una de cada 10. La distancia entre picas debe ser mayor de 4 m.

8.29. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA

Según la Norma Tecnológica de la Edificación NTE IEP, las pruebas de servicio de la puesta a tierra son:

a) *Puesta a tierra en edificios:*

- Medida de la resistencia de puesta a tierra efectuada en cada arqueta de conexión en los puntos de puesta a tierra; que deberá ser como máximo 15Ω , cuando el edificio tiene instalación de pararrayos.

b) *Puesta a tierra en obra:*

- Medida de resistencia de puesta a tierra para el conjunto de la instalación, que no debe ser mayor de 80Ω .

8.30. MANTENIMIENTO DE LAS PUESTAS A TIERRA

Según la Norma Tecnológica de la Edificación NTE IEP, las especificaciones de mantenimiento son:

a) *Puesta a tierra permanente:*

- Comprobación anual, con terreno seco, en la arqueta de conexión a tierra de la continuidad eléctrica en los puntos de puesta a tierra. Si el edificio tiene instalación de pararrayos la comprobación se realizará después de cada descarga eléctrica.

b) *Puesta a tierra provisional en obra:*

- Inspección visual del estado de la instalación, cada tres días.

8.31. PUESTA EN SERVICIO E INSPECCIÓN DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE B.T.

■ Verificación de las instalaciones

- Verificación del funcionamiento. Consiste en comprobar el funcionamiento de la instalación, realizando la verificación bajo tensión:
 - 1) Interruptores diferenciales. Accionando el botón de prueba o conectando un conductor activo al conductor de protección, el interruptor debe desconectar. Si el interruptor diferencial funciona bien y con la instalación bajo tensión no desconecta, es que no hay fugas a tierra apreciables.
 - 2) Pequeños interruptores automáticos (PIAs). Conectando en la toma de corriente más alejada del PIA dos conductores activos entre sí, el interruptor debe desconectar casi instantáneamente.
 - 3) Puntos de luz. Conectando y desconectando los puntos de luz.
 - 4) Tomas de corriente. Conectando los receptores a las tomas de corriente.
- Verificación antes de la puesta en servicio de la instalación (MIE BT 041). Las empresas suministradoras de energía, antes de la conexión de la

instalación a la red de distribución, proceden a verificar el aislamiento que presentan los conductores activos con relación a tierra y entre ellos (no menor de $250\,000\Omega$, según MIE BT 017), y las corrientes de fuga que se produzcan con respecto a tierra, que no debe ser superior a la sensibilidad del interruptor diferencial.

■ Inspección de las instalaciones

La inspección la realiza el personal técnico de la Administración Pública estatal o autonómica (MIE BT 042). En esta inspección se analizan los defectos que presente la instalación, según los criterios de la instrucción MIE BT 043:

- Defecto crítico: que presenta un peligro inmediato para la seguridad de las personas o de las cosas.
- Defecto mayor: que no supone un peligro inmediato para las personas o las cosas, pero si puede serlo al originarse un fallo en la instalación.
- Defecto menor: que no supone peligro para las personas o las cosas, no perturba el funcionamiento de la instalación y la desviación observada no tiene valor significativo para su uso o funcionamiento.

Como resultado de la inspección se emite un dictamen en el que la instalación será calificada:

- Favorablemente. Cuando no tiene ningún defecto crítico o mayor.
- Condicionadamente. Cuando la instalación tiene algún defecto mayor. La instalación nueva no puede conectarse mientras no se corrija el defecto y en las instalaciones en funcionamiento se fija un plazo para su corrección.
- Negativamente. Cuando la instalación tiene algún defecto crítico. La instalación nueva no puede ser conectada a la red de distribución y las instalaciones en funcionamiento tienen que desconectarse inmediatamente.

Las instalaciones de locales de pública concurrencia, las que presenten riesgo de incendio o explosión y las correspondientes a locales de características especiales deberán ser revisadas anualmente (MIE BT 042) por instaladores autorizados. Se extenderá un boletín de reconocimiento de la instalación revisada, señalando la conformidad con el R.B.T. o las modificaciones a realizar. Este boletín será entregado al propietario o arrendatario del local y una copia, en caso de revisión desfavorable, se enviará a la Administración Pública competente.

Las empresas distribuidoras revisarán periódicamente, por medio de su personal técnico, las redes de distribución de energía eléctrica.

Las instalaciones en servicio serán revisadas por la Administración Pública competente cuando lo juzguen oportuno o necesario, por causa justificada.

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.8-1 Un edificio de 6 plantas, dos viviendas por planta de 96 m^2 cada una, tiene un motor de ascensor de 7,5 CV, 380/220 V, 12/20,8 A, 50 Hz, $\cos \varphi = 0,84$. Para alumbrado de servicios generales se considera una potencia de 3 kW, 220 V. En el bajo tiene un local comercial de 80 m^2 y un garaje con una potencia a instalar de 4 kW. Calcular:

- Previsión de cargas del edificio.
- Línea de reparto trifásica con neutro para contadores concentrados; formada por un cable tetrapolar para distribución de energía, con conductores de cobre, aislados con XLPE para 1 kV, en instalación bajo tubo. Longitud 10 m. Factor de potencia 0,9.
- Derivación individual monofásica al garaje, considerando una caída de tensión del 1%. Longitud 30 m.
- Derivación individual monofásica a un vivienda. Longitud 15 m.

Los conductores de las derivaciones individuales serán de cobre, unipolares, aislados con PVC para 750 V, en canalización bajo tubo.

La tensión de servicio es trifásica con neutro, 380/220 V, 50 Hz y las caídas de tensión serán las máximas permitidas por el reglamento.

Solución: a) 75 293 W; b) 50 mm^2 ; c) 10 mm^2 ; d) 6 mm^2 .

P.8-2 Un local comercial, situado en la planta baja de un edificio, tiene los siguientes receptores:

Alumbrado:

Seis pantallas de 2 tubos fluorescentes de 58 W, 220 V.

Veinte lámparas fluorescentes de 36 W, 220 V.

Fuerza:

Un motor de 2 CV, 380/220 V, 3,6/6,2 A, 50 Hz, $\cos \varphi = 0,80$.

Un motor de 3 CV, 380/220 V, 5,2/8,8 A, 50 Hz, $\cos \varphi = 0,82$.

La tensión de servicio es trifásica con neutro, 380/220 V, 50 Hz.

Los conductores son de cobre, unipolares, aislados con PVC para 750 V, en instalación empotrada bajo tubo y la caída de tensión en la derivación es el 1%.

Calcular:

- Previsión de cargas del local.
- Sección mínima de la derivación individual desde el cuadro de contadores al cuadro general del local, trifásico con neutro. Longitud 10 m.

Solución: a) 7 952,5 W; b) 4 mm^2 .

P.8-3 En un taller se instalan los siguientes receptores:

Fuerza:

Un motor de 7,5 CV, 380/220 V, 12/20,7 A, 50 Hz, $\cos \varphi = 0,83$.

Dos motores de 3 CV, 380/220 V, 5,2/9 A, 50 Hz, $\cos \varphi = 0,82$.

Tres líneas de tomas de corriente de 16 A, trifásicas con neutro y conductor de protección, considerando una potencia de 1 kW en cada una.

Alumbrado:

Ocho luminarias con una lámpara de vapor de mercurio de 125 W, 220 V, cada una.

Seis tubos fluorescentes 58 W, 220 V.

La tensión de servicio es trifásica con neutro, 380/220 V, 50 Hz.

La línea general de alimentación estará formada por un cable tetrapolar con conductores de cobre, aislados con PVC para 1 000 V, en canalización bajo tubo.

Las derivaciones estarán formadas por conductores de cobre, unipolares, aislados con PVC para 750 V, en canalización bajo tubo.

Calcular:

- La previsión de carga del taller.
- Sección de la línea general de alimentación, trifásica con neutro, de la caja general de protección a la caja de contadores. Longitud 30 m. Caída de tensión admisible 0,5%.
- Sección de la derivación al cuadro de control de fuerza, trifásica con neutro. Longitud 30 m. Caída de tensión admisible 1%.
- Sección de la derivación monofásica al cuadro de control de alumbrado. Longitud 25 m. Caída de tensión admisible 1,5%.

Solución: a) 19 234 W; b) 16 mm^2 ; c) 10 mm^2 ; d) 4 mm^2 .

P.8-4 Para la alimentación de una nave industrial se proyecta un centro de transformación intemperie y la línea de enlace aérea a 20 kV para conexión con la red de media tensión. La instalación del centro de transformación se realiza sobre apoyo HV-1000-R11, con cadenas de amarre y conductor LA 30.

Sobre el poste se sitúan: las autoválvulas 24 kV/10 kA con desconexión a tierra; transformador de 50 kVA, 20/0,38 kV, $u_{cc} = 4\%$, en baño de aceite; cable de conexión del transformador al cuadro de B.T., tipo RV 0,6/1 kV $3 \times 95 + 1 \times 50$, de cobre; cuadro de B.T. con interruptor tetrapolar de 160 A; línea de puesta a tierra de las masas y autoválvulas, con conductor de cobre sin aislamiento de sección 50 mm^2 , y línea de puesta a tierra del neutro, con conductor RV 0,6/1 kV, de sección 50 mm^2 de cobre.

Calcular:

- Intensidades nominales en primario y secundario del transformador.
- Intensidad de cortocircuito máxima en la línea de M.T. si la potencia de cortocircuito en el punto de entronque es de 350 MVA.
- Intensidad de cortocircuito en el secundario del transformador considerando la red de alimentación de potencia infinita.
- Caída de tensión en la línea de entronque con la línea de M.T. con factor de potencia 0,8. Longitud de la línea 400 m y separación entre los conductores 1,6-1,6-3,2 m.
- Presupuesto de los materiales de la instalación utilizando catálogos de casas comerciales.

Solución: a) 1,44 A, 76 A; b) 10,1 kA; c) 1,9 kA; d) 1,11 V

P.8-5 Para la puesta a tierra de la estructura de un edificio, que va provisto de pararrayos, situado sobre terreno de arena arcillosa, se dispone de un cable de tierra de cobre desnudo de sección 35 mm^2 , formando anillo con longitud en planta de 45 m, enterrado en zanja a una profundidad de 80 cm, soldado a las armaduras, a la estructura metálica y entre sí por soldadura aluminotérmica. Calcular el número de picas necesarias.

Solución: 6.

9.1. LUZ

La luz es la energía radiante, en forma de ondas electromagnéticas que estimula el sentido de la vista.

La velocidad de desplazamiento de la luz c es constante en cada medio (300 000 km/s en el vacío) y como todo movimiento ondulatorio se caracteriza por una longitud de onda λ (distancia entre dos ondas consecutivas) y por la frecuencia de vibración f

$$c = \lambda \cdot f$$

La longitud de onda de las radiaciones electromagnéticas visibles para el ojo humano, que se suele medir en nanómetros (nm) ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), comprende los colores del espectro de radiación visible (fig. 9.1), desde los 380 nm (violeta) a los 760 nm (rojo), siendo la mayor sensibilidad para el amarillo verdoso a 555 nm. Las ondas más largas que el rojo se llaman infrarrojas y las ondas más cortas que el violeta se llaman ultravioletas.

La luz se propaga en línea recta.

El ojo actúa como una cámara fotográfica (fig. 9.2), formando en la retina una imagen invertida. El nervio óptico conduce las impresiones luminosas al cerebro, donde se percibe la imagen derecha.

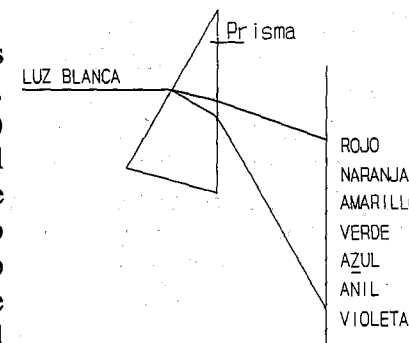


Fig. 9.1

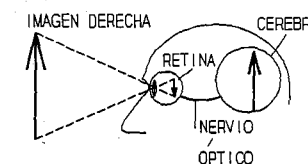


Fig. 9.2

9.2. FUENTES DE LUZ ELÉCTRICA

Son, principalmente, las lámparas de incandescencia y las lámparas o tubos de descarga.

- *Lámparas de incandescencia.* Emitan luz por termorradiación como consecuencia del paso de la corriente eléctrica por un filamento conductor. Son de dos tipos: lámparas incandescentes convencionales e incandescentes halógenas.
- *Lámparas de descarga.* La emisión de luz es el resultado de la descarga eléctrica a través de gases o vapores metálicos. Son de varios tipos: lámparas fluorescentes, de vapor de mercurio a alta presión, de luz mezcla, de halogenuros metálicos, y de vapor de sodio a baja presión o a alta presión.

- **Lámparas de inducción.** La emisión de luz es el resultado de la excitación de átomos de vapores metálicos por inducción electromagnética de alta frecuencia.

9.3. MAGNITUDES LUMINOSAS Y UNIDADES

Flujo luminoso Φ : Energía luminosa emitida por unidad de tiempo. Su unidad es el **lumen (lm)**.

El valor del flujo luminoso de una lámpara viene dado por el fabricante. Su rendimiento luminoso o eficacia es la relación entre el flujo que emite y la potencia que consume.

Intensidad luminosa I : Es el flujo luminoso emitido en una dirección dada por unidad de ángulo sólido (estereorradián). Su unidad es la **candela (cd)**; unidad patrón del sistema internacional de unidades. Se define como la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente de luz que emite una radiación monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$ Hz, y cuya intensidad energética en dicha dirección es 1/683 vatios por estereorradián.

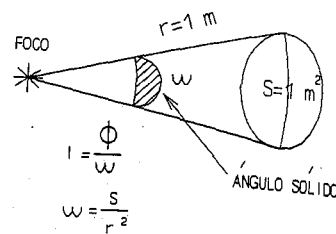


Fig. 9.3

El lumen es el flujo luminoso emitido por un foco puntual de una candela de intensidad sobre una porción de superficie esférica de 1 m^2 a la distancia de 1 m (fig. 9.3), que corresponde a un ángulo sólido de un estereorradián.

Iluminación o iluminancia E : Es el flujo luminoso recibido por unidad de superficie.

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

Se mide en **lux (lx)** con un aparato llamado luxómetro, que consiste en una célula fotoeléctrica que al ser iluminada genera una corriente eléctrica, medida por un miliamperímetro graduado en lux. El lux es la iluminación de una superficie de 1 m^2 que recibe el flujo luminoso de un lumen.

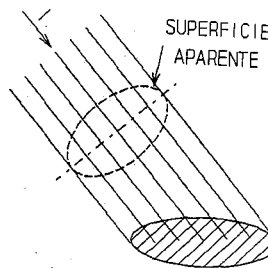


Fig. 9.4

$$1 \text{ lux} = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ m}^2}$$

Luminancia o brillo L : Es la intensidad luminosa en una dirección dada por unidad de superficie aparente luminosa o iluminada (fig. 9.4). Se mide en **nit (nt)**, aunque se utiliza también la cd/cm^2 . El nit es la luminancia de una superficie aparente de 1 m^2 en una dirección en que la intensidad luminosa es una candela.

$$1 \text{ nt} = \frac{1 \text{ cd}}{1 \text{ m}^2}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.3-1 Una local de dimensiones $4 \times 6 \text{ m}$ recibe un flujo luminoso de $7\,200 \text{ lm}$. Calcular la iluminación media sobre esa superficie.

La superficie $S = 6 \cdot 4 = 24 \text{ m}^2$

La iluminación $E = \frac{\Phi}{S} = \frac{7\,200}{24} = 300 \text{ lx}$

9.3-2 Calcular el flujo luminoso que recibe una superficie de 40 m^2 si la iluminación sobre ella es en cualquier punto de la misma 200 lx .

Solución: $8\,000 \text{ lm}$

9.3-3 Calcular el flujo luminoso total en un local de oficinas de 8 m de largo por 5 m de ancho para que la iluminación media sobre las mesas de trabajo sea de 450 lx .

Solución: $18\,000 \text{ lm}$.

9.3-4 Una lámpara de eficacia 40 lm/W está suspendida sobre el centro de una superficie cuadrada de $4 \times 4 \text{ m}$. Calcular:

- Flujo necesario para obtener sobre la superficie una iluminación media de 500 lux .
- Potencia aproximada de la lámpara.

Solución: a) $8\,000 \text{ lm}$; b) 200 W .

9.4. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LAS LÁMPARAS

■ Vida o duración de la lámpara

- **Vida media.** Se mide la vida media de una lámpara mediante ensayos de duración de conjuntos de lámparas. Es el tiempo en horas de funcionamiento hasta que se ha producido el 50% de fallos en el conjunto.
- **Vida útil.** Es el número de horas de funcionamiento hasta que el flujo emitido por la lámpara se ha reducido al 80% de su valor inicial.

■ Propiedades de color

- **Temperatura de color.** La apariencia de color de la fuente de luz está relacionada con la temperatura. Los cuerpos calentados a temperatura suficiente emiten luz rojiza, y aumentando su temperatura emiten luz que se va haciendo más blanca.

La relación entre apariencia de color y temperatura de la fuente de luz se indica en la siguiente tabla:

Tabla 9.1

APARIENCIA DE COLOR	TEMPERATURA K (grados Kelvin)
Cálida	< 3 300
Intermedia	3 300 - 5 000
Fría	> 5 000

No es conveniente la utilización simultánea de fuentes de luz con temperatura de color diferentes, por la adaptación del ojo a los colores.

El aumento del nivel de iluminación debe implicar también el aumento de la temperatura del color.

- **Reproducción cromática.** La reproducción de los colores de los objetos iluminados por una fuente de luz viene indicada por el rendimiento de color o índice de reproducción cromática (IRC). Por convenio el IRC varía entre 0 y 100 y es una indicación de la reproducción global de los colores de una muestra.

Los índices de reproducción cromática mínimos de las fuentes de luz según C.I.E. (Comisión Internacional de Alumbrado), expresados en grupos, se indican en la siguiente tabla:

Tabla 9.2

GRUPO DE REPRODUCCIÓN CROMÁTICA	VALORES EXTREMOS DEL IRC
1	≥ 85
2	70 - 85
3	≤ 70

9.5. LÁMPARAS DE INCANDESCENCIA CONVENCIONALES

■ Producción de luz

La emisión de luz es el resultado de la alta temperatura adquirida por un filamento de wolframio arrollado en hélice, en una atmósfera de gas inerte o de vacío (fig. 9.5), al pasar por dicho filamento corriente eléctrica. La eficacia de esta lámpara es pequeña (10-20 lm/W) porque gran parte de la energía que absorbe se transforma en calor. Se emplea para iluminación de interiores en locales de techos bajos (menos de 4 m).

Las ampollas y los filamentos se fabrican de formas diversas.

Los casquillos metálicos, que sujetan la lámpara al portalámparas, son de varios tipos: rosca Edison (E), bayoneta (B) y de espigas o clavijas (G).

■ Encendido

No necesitan aparato de encendido. Funcionan a cualquier tensión, dando el flujo luminoso nominal a la tensión nominal.

■ Duración

La vida media por rotura de filamento es de 1 000 horas.

■ Propiedades del color

- Temperatura del color de unos 2 700 K.
- Índice de reproducción cromática (IRC): 100.

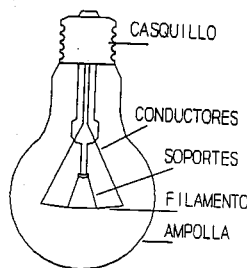


Fig. 9.5

9.6. LÁMPARAS DE INCANDESCENCIA HALÓGENAS

■ Producción de luz

La emisión de luz es igual que en las incandescentes, pero llevan añadido en el interior de la ampolla un elemento halógeno, que suele ser yodo. Este halógeno se combina con el wolframio vaporizado del filamento, consiguiéndose una mayor limpieza dentro de la ampolla y una mayor duración de la lámpara.

■ Encendido

Igual que las incandescentes convencionales no necesita aparato de encendido. Las lámparas halógenas de poca potencia, utilizadas en alumbrado de interiores, necesitan un reductor de tensión porque suelen trabajar a tensiones más bajas que la de la red.

■ Duración

Vida media de 2 000 a 3 000 horas con tensiones bajas.

■ Propiedades del color

- Temperatura de color de 3 000 a 3 200 K.
- Índice de reproducción cromática: 100.

9.7. LÁMPARAS O TUBOS FLUORESCENTES

■ Producción de luz

La emisión de luz es la consecuencia de la descarga eléctrica a través de vapor de mercurio a baja presión (de 1 a 5 N/m²), que da origen a rayos ultravioleta (longitud de onda 253 nm) transformados en luz visible por medio de polvos fluorescentes situados en la pared interior del tubo. La eficacia es del orden de 100 lm/W.

■ Encendido

El encendido es distinto según el tipo de lámparas fluorescentes.

En las *lámparas de baja tensión con encendido diferido* (fig. 9.6), el encendido se produce por una sobretensión instantánea al efectuar el cebador C (lámina bimetálica en atmósfera de neón) el corte del circuito en el que hay la reactancia o balasto L, que sirve también para estabilizar la corriente.

El encendido de la lámpara se produce de la forma siguiente:

- Al cerrar el interruptor se produce una descarga en el cebador, que tiene los contactos abiertos. Esta descarga calienta la lámina bimetálica, que se deforma cerrando el circuito.
- Por el circuito cerrado circula una intensidad que calienta los filamentos del tubo, hasta que enfría la lámina del cebador, que recupera su forma inicial, abriendo el circuito. Esta apertura brusca del circuito provoca una sobretensión, debida a la reactancia, que hace encender el tubo.

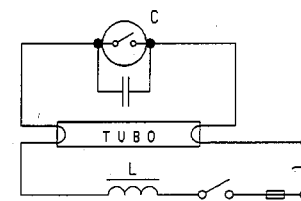


Fig. 9.6

- c) Después del encendido, la tensión entre los filamentos del tubo disminuye, debido a la caída de tensión en la reactancia.

En las *lámparas de encendido instantáneo*, el encendido se produce en el momento de la conexión debido a reactancias especiales (fig. 9.7), que originan la sobretensión y la estabilización de la corriente una vez iniciada la descarga.

Se fabrican *lámparas de encendido electrónico*, con regulación electrónica de la tensión e intensidad en el arranque, consiguiéndose así una menor intensidad de encendido.

Se emplean lámparas en conexión "dúo" (fig. 9.8), para evitar el efecto estroboscópico (oscilación de la emisión luminosa debida a la corriente alterna). Se utiliza en corriente alterna monofásica el montaje en paralelo de dos tubos, conectando uno de ellos por medio de un condensador. En corriente alterna trifásica se corrige este efecto conectando los tubos a distintas fases.

En los tubos fluorescentes se corrige el factor de potencia, igual que en las lámparas de descarga luminosa, conectando un condensador en paralelo.

■ Duración

Vida útil de unas 7 500 horas, con un flujo del 80 % del inicial después de ese tiempo.

■ Propiedades del color

Se fabrican tubos fluorescentes según apariencias de color. Los más usuales se designan según la siguiente tabla:

Tabla 9.3

DESIGNACIÓN	TEMPERATURA DE COLOR K
BLANCO CÁLIDO	2 700 - 3 000
BLANCO	4 000 - 5 000
LUZ DÍA	5 300 - 6 500

El índice de reproducción cromática, se expresa con tres valores dentro de cada apariencia de color, que se designan según la siguiente tabla:

Tabla 9.4

DESIGNACIÓN IRC	IRC
NORMAL	50 - 60
DE LUJO	87 - 92
ESPECIAL DE LUJO	93 - 95

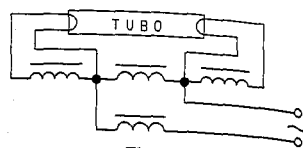


Fig. 9.7

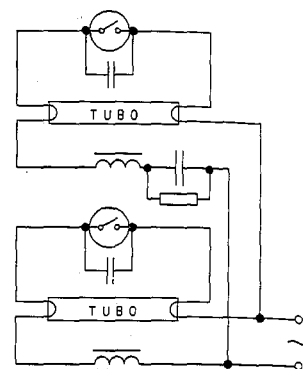


Fig. 9.8

Estas clasificaciones dan lugar a nueve posibles tipos de tubos fluorescentes.

Se fabrican también *lámparas fluorescentes compactas*, con tubo curvado en forma de U, que son básicamente de dos tipos:

- Lámparas compactas, con balasto y cebador incorporados, y casquillo de rosca tipo Edison (E) para poder sustituir a las lámparas de incandescencia.
- Lámparas compactas, sin reactancia incorporada, tamaño miniaturizado y casquillo en forma de espigas (G).

9.8. LÁMPARAS DE VAPOR DE MERCURIO ALTA PRESIÓN

■ Producción de luz

Emiten luz por luminiscencia al producirse la descarga eléctrica en un tubo de cuarzo con vapor de mercurio a alta presión (2-4 bar; 1 bar = 10^5 Pa). La luz producida tiene un color azul verdoso, por lo que se corrige el color por medio de polvos fluorescentes colocados en la pared interior de la ampolla exterior de la lámpara, así se aprovecha la radiación ultravioleta. Esta lámpara es de color corregido y la luz es de color blanco azulado.

El espacio entre el tubo de descarga y la ampolla exterior, de vidrio y forma elipsoidal, está relleno de gas neutro (nitrógeno) a presión algo menor que la atmosférica, que evita la formación de arco entre las partes metálicas que conectan el tubo de descarga.

La eficacia de estas lámparas depende de su potencia, siendo su valor hasta 60 lm/W.

■ Encendido

Estas lámparas no necesitan dispositivo de encendido. El tubo de cuarzo donde se produce la descarga contiene una pequeña cantidad de argón y mercurio. La tensión de la red, aplicada entre los electrodos principales y entre cada electrodo principal y auxiliar próximo (fig. 9.9), hace que se produzca una pequeña descarga entre éstos, ionizando el argón y elevando la temperatura del mercurio, que se vaporiza iniciándose la descarga entre los electrodos principales. El tiempo de encendido es de unos 5 minutos y, puesto que la resistencia de la lámpara disminuye al efectuarse la descarga, para limitar la intensidad es necesario el empleo de una bobina (reactancia o balasto) conectada en serie.

■ Duración

La vida útil de la lámpara, hasta un mantenimiento de flujo del 80 % del inicial y períodos de encendido de 3 horas, es de unas 8 000 horas.

■ Propiedades del color

- Temperatura del color de 3 000 a 4 500 K.
- Índice de reproducción cromática (IRC) de 40 a 50.

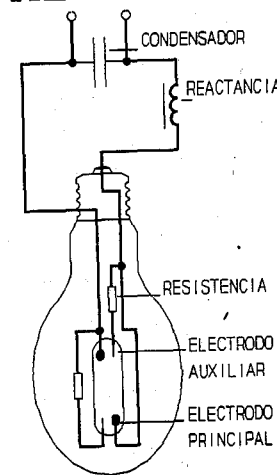


Fig. 9.9

9.9. LÁMPARAS DE LUZ MEZCLA

■ Producción de luz

Igual que en las lámparas de vapor de mercurio, emiten luz por luminiscencia en tubo de descarga con vapor de mercurio a alta presión. Para corregir el color lleva alrededor del tubo de cuarzo un filamento conectado en serie (fig. 9.10), que emite luz, estabiliza la descarga y mejora el factor de potencia de la lámpara.

La eficacia de estas lámparas es del unos 30 lm/W.

■ Encendido

Se realiza igual que en la lámpara de vapor de mercurio. Una vez establecida la descarga, la resistencia del filamento limita la intensidad y no es necesaria reactancia. El tiempo de encendido es de unos 2 minutos.

■ Duración

La vida útil de la lámpara con periodos de encendidos de 3 horas es de unas 5 000 horas. Su duración está limitada por la fusión del filamento.

■ Propiedades del color

- Temperatura de color: 3 600 K
- Índice de reproducción cromática: 60.

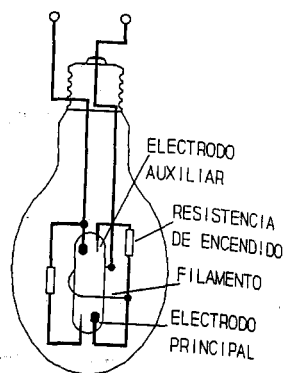


Fig. 9.10

9.10. LÁMPARAS DE HALOGENUROS METÁLICOS

■ Producción de luz

La luz se produce en un tubo de cuarzo igual que en las lámparas de vapor de mercurio sin electrodo auxiliar de arranque. El recipiente contiene en su interior mercurio además de yoduros de sodio, talio, indio y otros elementos. Se consigue así que la emisión luminiscente tenga una buena reproducción cromática, sin usar polvos fluorescentes.

■ Encendido

El encendido, debido a los halogenuros metálicos, necesita tensiones de 1,5 a 5 kV, suministradas por un arrancador electrónico. El tiempo de arranque medio es de unos 5 minutos. La estabilización de la descarga se consigue, igual que en las lámparas de vapor de mercurio, con una reactancia conectada en serie.

■ Duración

Según el tipo de lámpara y la forma de aplicación, la vida útil puede ser de 2 000 a 6 000 horas.

■ Propiedades del color

La temperatura de color y el índice de reproducción cromática IRC depende mucho de los elementos metálicos que se utilicen en el tubo de descarga.

Tabla 9.5

TEMPERATURA DE COLOR	IRC	EFICACIA
4 400 K	65	90 lm/W
3 000-4 800 K	80-85	80 lm/W
5 800-6 000 K	85	75 lm/W

9.11. LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO BAJA PRESIÓN

■ Producción de luz

La descarga luminiscente se produce en un tubo de vidrio especial en forma de U, que contiene gas neón y sodio (fig. 9.11). El tubo tiene pequeñas cavidades en las cuales se condensa el sodio; está rodeado por una ampolla exterior, de forma tubular, en el interior de la cual se ha hecho el vacío. La emisión de luz es en su mayoría con longitud de onda de 589 nm, que corresponde al color amarillo y muy próxima al máximo de sensibilidad del ojo humano. Su eficacia luminosa es del orden de 180 lm/W

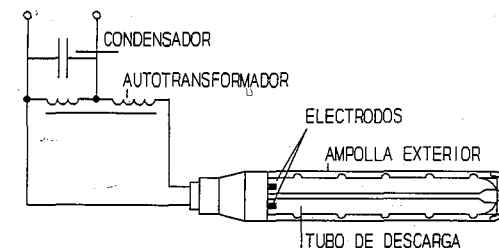


Fig. 9.11

■ Encendido

La lámpara necesita tensiones de encendido del orden de 400 a 600 V, que se consiguen con un autotransformador o un arrancador electrónico.

La descarga se inicia con el gas neón y con el calor generado se vaporiza el sodio, estableciéndose la descarga en éste. El tiempo medio de encendido es de unos 7 minutos.

La estabilización de la descarga se produce por la reactancia del autotransformador de gran de flujo de dispersión, o también por reactancia y arrancador electrónico.

■ Duración

La vida útil de la lámpara es del orden de 8 000 a 12 000 horas

■ Propiedades del color

La luz es prácticamente monocromática, por lo que no se tiene en cuenta la temperatura de color ni el índice de reproducción cromática, que se considera cero.

9.12. LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO ALTA PRESIÓN

■ Producción de luz

La descarga luminiscente se produce en un tubo de cerámica de aluminio transparente, muy resistente al calor (alcanza los 1 000 °C). En su interior contiene sodio, mercurio y un gas inerte (xenón). La ampolla exterior de vidrio puede ser de forma tubular (fig. 9.12) o elipsoidal. La luz producida es de un color blanco dorado y su eficacia luminosa es del orden de 120 lm/W.

■ Encendido

La lámpara necesita una tensión de encendido de 2 a 5 kV (según la potencia de la lámpara), que se consigue con un arrancador electrónico. La descarga empieza con el xenón y el calor resultante vaporiza el sodio y se inicia paulatinamente la descarga principal. El tiempo medio de encendido es de 7 minutos.

La estabilización de la descarga se consigue con reactancia (balasto inductivo).

■ Duración

El valor de vida útil es del orden de 12 000 horas, pudiendo llegar a 20 000 horas según el modelo y la forma de utilización.

■ Propiedades del color

- Temperatura de color, de 2 000 a 2 200 K.
- Índice de reproducción cromática: 25.

9.13. LÁMPARAS DE INDUCCIÓN

■ Producción de luz

La luz se produce en una ampolla de vidrio con vapor de mercurio a baja presión. Una bobina situada dentro de la ampolla y alimentada en alta frecuencia (2,65 MHz), provoca la excitación de los átomos de mercurio que emiten radiación ultravioleta, transformada en luz visible por medio de polvos fluorescentes que recubren la parte interna de la ampolla. La eficacia de esta lámpara es del orden de 70 lm/W.

■ Encendido

Necesita para encendido y funcionamiento un circuito electrónico de alta frecuencia.

■ Duración

Larga duración, con vida útil de unas 60 000 horas.

■ Propiedades del color

- Temperatura de color: 2 700-4 000 K.
- Índice de reproducción cromática: 80.

9.14. LUMINARIAS

Para modificar la distribución de luz de la lámpara se emplean luminarias o aparatos de alumbrado que concentran la luz (reflectores), la reparten (refractores) o atenúan el brillo de la lámpara (difusores). La luminaria contiene la lámpara o lámparas con su equipo auxiliar y los accesorios necesarios para su fijación y conexión.

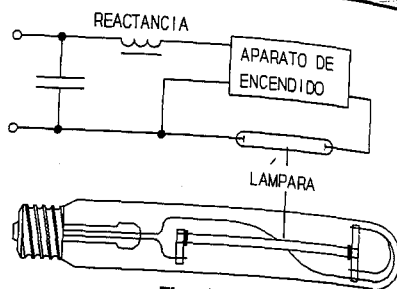


Fig. 9.12

Los reflectores tienen una superficie brillante (habitualmente de aluminio anodizado) que reflejan la luz de la lámpara según la forma de la superficie reflectante.

Los refractores son globos o pantallas (habitualmente de vidrio) que dirigen la luz de la lámpara en las direcciones determinadas.

Los difusores son envolventes (de vidrio o plástico), láminas, rejillas, etc. Evitan el deslumbramiento y originan también una pérdida del flujo luminoso útil.

9.15. CLASES DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA

Para protección de las personas contra contactos eléctricos, las luminarias se clasifican, de acuerdo con el grado de aislamiento, según la tabla siguiente:

Tabla 9.6

Protección	Definición	Símbolo
0	La protección contra los contactos eléctricos recae exclusivamente sobre el aislamiento principal; descansando la protección, en caso de fallos del aislamiento principal, sobre el medio circundante.	
I	La protección contra los contactos eléctricos recae exclusivamente sobre el aislamiento principal y un conductor de protección conectado a tierra (toma de tierra)	
II	La protección contra los contactos eléctricos no recae exclusivamente sobre el aislamiento principal, sino que comprende medidas suplementarias, tales como el doble aislamiento o el aislamiento reforzado. No llevan toma de tierra.	
III	La protección contra los contactos eléctricos, se realiza alimentando las luminarias a una muy baja tensión de seguridad (no superior a 50 V).	

Se utilizan también otros símbolos en las luminarias, como se indica en la tabla siguiente:

Tabla 9.7

Definición	Símbolo
Distancia mínima de seguridad, entre el proyector y la superficie a iluminar, expresada en m.	
Luminaria con equipo incorporado, para montaje directo en superficies normalmente inflamables.	
Lámparas con arrancador incorporado.	

9.16. ÍNDICES DE PROTECCIÓN DE LAS LUMINARIAS

Los grados de protección de las luminarias se refieren a sus cualidades mecánicas y se indican mediante las letras IP seguidas de tres cifras características según la tabla 5.8: protección contra la penetración de cuerpos sólidos y polvo, protección contra la penetración de líquidos, y protección contra daños de origen mecánico.

9.17. LEYES FUNDAMENTALES DE LA LUMINOTECNIA

■ Ley de la inversa de los cuadrados

La iluminación E (lux) en un punto P que dista d (m) del foco, es directamente proporcional a la intensidad de iluminación I (cd) en la dirección del punto e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia:

Esto presupone:

- Que el foco de luz está lo suficientemente alejado para poder ser considerado como puntiforme (luz procedente de un punto)
- Que la superficie es perpendicular a la dirección del rayo luminoso.

En estas condiciones, el flujo luminoso contenido en un ángulo sólido se distribuye sobre una superficie que se hace mayor a medida que aumenta la distancia del foco (fig. 9.13).

$$E = \frac{I}{d^2}$$

■ Ley del coseno

Cuando la superficie no es perpendicular a la dirección de la intensidad de iluminación, formando el rayo incidente un ángulo α con la normal a dicha superficie (fig. 9.14), la iluminación en un punto:

$$E = \frac{I}{d^2} \cos \alpha$$

En este caso la superficie interceptada por el haz de rayos luminosos es mayor que cuando la superficie es perpendicular al rayo, siendo menor la iluminación o densidad de flujo. La superficie interceptada es proporcional al coseno de α .

Cuando el foco está situado a una altura h sobre la superficie a iluminar (fig. 9.15), la iluminación E en un punto P situado sobre esa superficie, formando el rayo incidente un ángulo α con la normal, siendo I la intensidad de iluminación en esa dirección:

$$E = \frac{I}{h^2} \cos^3 \alpha$$

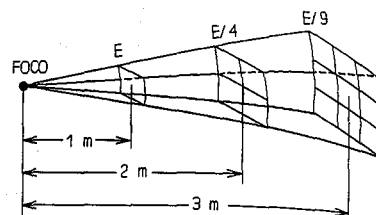


Fig. 9.13

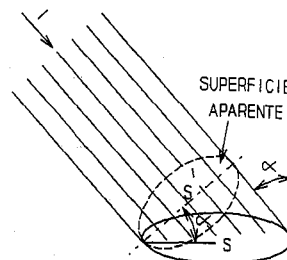


Fig. 9.14

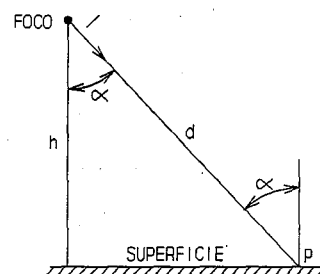


Fig. 9.15

ILUMINACIÓN

DEMOSTRACIÓN

Según la figura 9.15, la distancia del foco al punto P :

$$d = \frac{h}{\cos \alpha}$$

La iluminación:

$$E = \frac{I}{d^2} \cos \alpha = \frac{I}{\left(\frac{h}{\cos \alpha}\right)^2} \cos \alpha = \frac{I}{h^2} \cos^3 \alpha$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.17-1 Calcular, para obtener la iluminación de 5 lux en un punto, qué intensidad luminosa debe tener un foco en la dirección de ese punto, situado a una distancia horizontal de 8 m de la vertical de la luminaria, que está a una altura de 7 m.

La intensidad de iluminación:

$$E = \frac{I}{h^2} \cos^3 \alpha; \quad I = \frac{E h^2}{\cos^3 \alpha}$$

$$\cos \alpha = \frac{h}{d} = \frac{7}{\sqrt{7^2 + 8^2}} = 0,6585$$

$$I = \frac{5 \cdot 7^2}{0,6585^3} = 858 \text{ cd}$$

9.17-2 Calcular la iluminación en un punto situado a 8 m de un foco de intensidad de iluminación en esa dirección de 1 000 cd, si el ángulo que forma la normal a la superficie con el rayo incidente es de 30°.

Solución: 13,5 lx.

9.17-3 Un foco tiene por cada 1 000 lm de flujo una intensidad luminosa de 100 cd en cualquier dirección. Calcular:

- Intensidad de iluminación, si el flujo total es de 23 000 lm.
- La iluminación en un punto situado en un plano a 6 m debajo de la lámpara y a 10 m de la vertical del foco.

Solución: a) 2 300 cd; b) 8,7 lx.

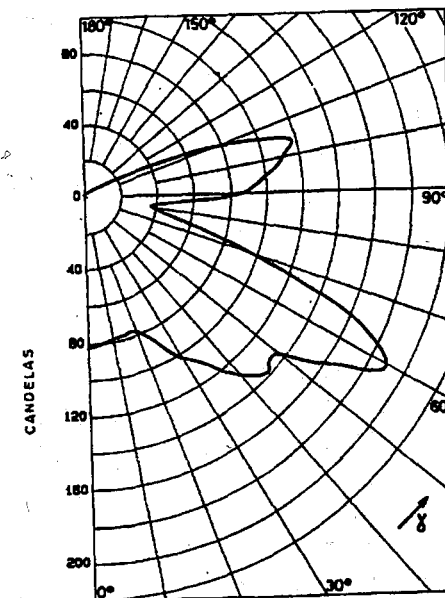


Fig. 9.16. Diagrama polar de luminaria. (Cortesía Hadasa).

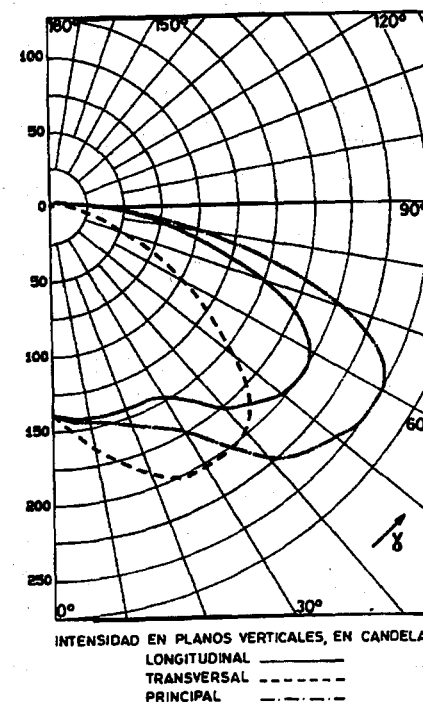


Fig. 9.17. Diagrama polar de luminaria asimétrica. (Cortesía Hadasa)

9.17-4 Calcular la iluminación en un punto iluminado por un foco con una intensidad luminosa de 2000 cd en la dirección del punto, situado en un plano horizontal a 8 m por debajo del foco, si el ángulo que forma la normal a la superficie con el rayo incidente es de 25°

Solución: 23,26 lx.

9.18. DIAGRAMAS DE ILUMINACIÓN

■ Diagrama polar

Es la representación de la intensidad de iluminación de una fuente luminosa, trazando rayos vectores que partiendo de la fuente tienen una longitud proporcional a la intensidad de iluminación. Uniendo los extremos de esos radios vectores se tiene una representación llamada sólido fotométrico.

Estos gráficos de intensidad de iluminación se simplifican porque las fuentes de alumbrado tienen elementos de simetría.

Cuando la fuente luminosa admite un eje de revolución; cortando el sólido fotométrico por un plano que pase por el eje se obtiene del diagrama polar o curva de intensidad de iluminación. Como el plano es simétrico respecto al eje (fig. 9.16), se suele dar por el fabricante de la luminaria la mitad del plano y para una lámpara de 1000 lm de flujo.

Cuando la fuente luminosa no admite eje de rotación, se representa el diagrama de los planos de simetría de la luminaria y sus transversales.

En la figura 9.17 se representa el diagrama polar de una luminaria utilizada para alumbrado público referida a lámpara de 1000 lm. Se representa la intensidad de iluminación en el plano longitudinal o de referencia (según el eje de la vía a iluminar), en el plano transversal (perpendicular al eje de la vía) y en el plano vertical principal, donde se localiza la mayor intensidad de iluminación, que forma un ángulo $C=15^\circ$ con el plano de referencia de la luminaria (fig. 9.18).

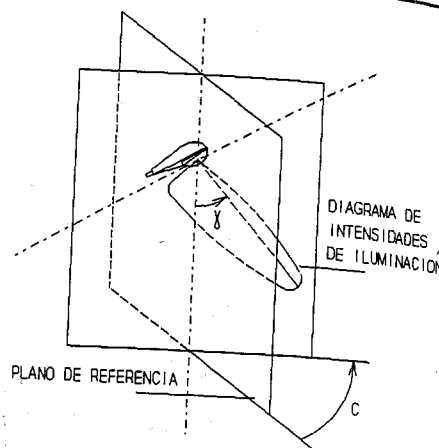


Fig. 9.18

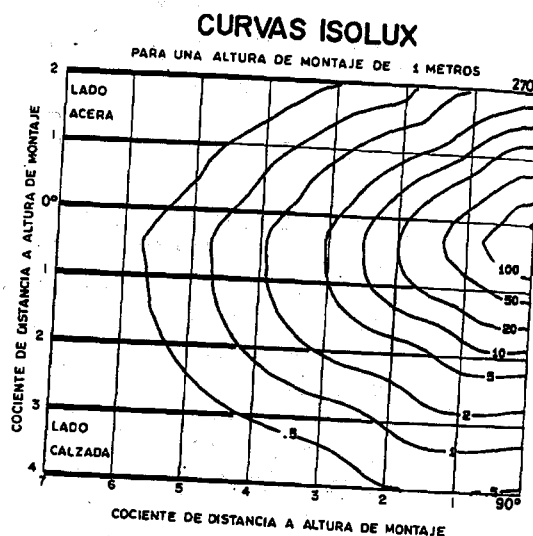


Fig. 9.19. Curvas isolux. (Cortesía Hadasa)

ILUMINACIÓN

■ Curvas isolux

Son curvas que unen puntos de igual iluminación sobre una superficie horizontal. Suelen trazarse para valores enteros de iluminación. En la figura 9.19 se observan las curvas isolux correspondientes a una luminaria de alumbrado de exteriores, para 1000 lm y 1 m de altura de montaje.

Se debe tener en cuenta que las curvas isolux para una lámpara determinada y para una altura de montaje deben de multiplicarse por los miles de lúmenes de la lámpara y dividir por el cuadrado de la altura en metros.

Si varios focos iluminan un plano, se trazan sobre el plano las curvas isolux de cada uno de los focos, sumándose los valores en los puntos donde se cortan las curvas; a continuación se trazan las curvas isolux totales uniendo los puntos de igual iluminación.

Se determina la iluminación media a partir de las curvas isolux dividiendo el plano en cuadrados y tomando como iluminación de cada cuadrado el valor de la curva que lo cruce. A partir de estos valores se halla la media aritmética.

Se llama factor de uniformidad media a la relación:

$$f_{med} = \frac{\text{Iluminación mínima}}{\text{Iluminación media}}$$

■ Diagrama cartesiano

El diagrama de la intensidad luminosa de los proyectores (luminarias que concentran la luz para conseguir una intensidad luminosa elevada en el centro del ángulo de emisión) se suele realizar en forma cartesiana, considerando los planos de simetría vertical y horizontal y representando los ángulos en abscisas y las intensidades de iluminación en ordenadas (fig. 9.20).

■ Diagrama isocandela

Para los proyectores también se dan gráficos isocandela con coordenadas cartesianas angulares. Considerando como origen el centro del proyector, cualquier punto situado delante del proyector queda definido por un ángulo vertical y otro horizontal, de forma similar a un punto de la superficie terrestre localizado en un plano por paralelos y meridianos (fig. 9.21).

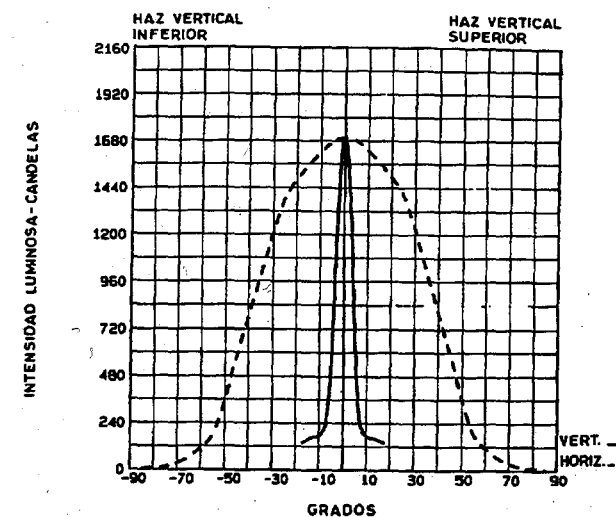


Fig. 9.20. Diagrama cartesiano. (Cortesía Hadasa).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.18-1 Una luminaria con el diagrama polar de la figura 9.17 se utiliza para el alumbrado público de una carretera; tiene una lámpara de vapor de sodio 20 000 lm, y está situada a 12 m sobre la calzada. Calcular la iluminación en un punto del suelo a 17 m de la vertical de la luminaria en el sentido longitudinal de la vía de circulación (fig. 9.22).

$$\alpha = \text{áng tg } \frac{17}{12} = 54,8^\circ$$

La intensidad de iluminación según el diagrama polar de la luminaria, para ese ángulo y para 1 000 lm es 200 cd. Para 20 000 lm la intensidad $I = 200 \cdot 20 = 4 000$ lm.

La iluminación en el punto P:

$$E = \frac{I}{h^2} \cos^3 \alpha = \frac{4 000}{12^2} \cos^3 54,8^\circ = 5,33 \text{ lx}$$

9.18-2 Calcular la iluminación que produce la luminaria del problema anterior sobre la calzada, en un punto situado a 7 m de la vertical de la lámpara en sentido transversal a la vía de circulación.

Solución: 18 lx.

9.18-3 Calcular a que altura sobre el suelo se debe colocar una luminaria, para obtener debajo de ella una iluminación de 300 lx, si la intensidad de iluminación vertical es de 7 500 cd.

Solución: 5 m.

9.18-4 Las curvas isolux de una luminaria indican que para un metro de altura y 1 000 lm, la iluminación en un punto situado frente a la luminaria ($C=90^\circ$) y a dos veces la altura es de 20 lx. Si la luminaria, con lámpara de 23 000 lm se sitúa a 9 m de altura, calcular la iluminación en un punto situado a 18 m frente a la luminaria.

Se multiplica la iluminación por los miles de lúmenes de la lámpara y dividir por el cuadrado de la altura en metros.

$$E = \frac{20}{9^2} \cdot \frac{23 000}{1 000} = 5,68 \text{ lx}$$

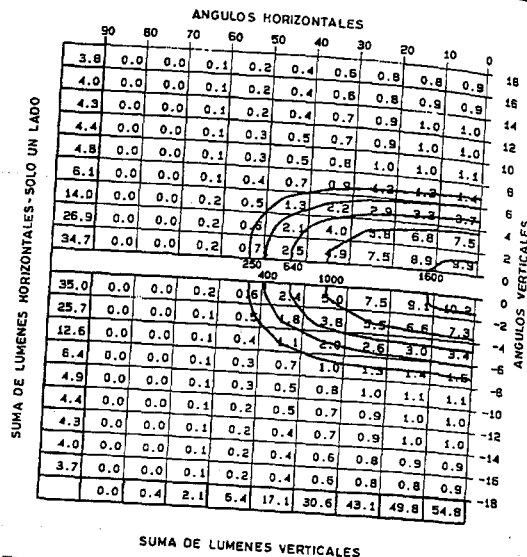


Figura 9.21. Diagrama isocandela de un proyector. (Cortesía Hadasa).

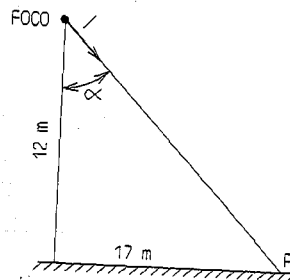


Fig. 9.22

9.18-5 Una curva isolux, para luminaria de 1 000 lm y altura 1 m, tiene un valor de 50 lx. Calcular el valor de esa curva, si la luminaria se coloca a una altura de 10 m y con lámpara de 48 000 lm.

Solución: 24 lx.

9.19. ALUMBRADO DE INTERIORES

El alumbrado debe producir una buena visibilidad de los objetos y crear un ambiente visual satisfactorio.

Según la forma que las luminarias, suspendidas sobre el plano de trabajo (fig. 9.23), reparten la luz, el alumbrado se clasifica en:

1) *Alumbrado directo*: Todo el flujo luminoso producido se dirige al plano de utilización (hacia abajo).

Las luminarias de alumbrado directo con eje de simetría, en función del ángulo bajo el cual se irradia el 50% de su flujo luminoso, *ángulo de apertura del haz* (fig. 9.24), se clasifican en: intensivas (semiángulo α entre 0° y 30°), semi-intensivas (α entre 30° y 40°), dispersoras (α entre 40° y 50°), semi-extensivas (α entre 50° y 60°), extensivas (α entre 60° y 70°) e hiper-extensivas (α entre 70° y 90°).

2) *Alumbrado indirecto*: Todo el flujo luminoso se dirige al techo del local (hacia arriba).

3) *Alumbrado mixto*: El flujo luminoso se dirige al techo y al plano de utilización. Es semi-directo cuando la mayor parte del flujo luminoso se dirige al plano de trabajo, y es semi-indirecto cuando la mayor parte del flujo luminoso se dirige hacia al techo.

La iluminación también puede ser: general (iluminación uniforme); localizada (iluminación sobre puntos determinados) y suplementaria (iluminación localizada dentro de la general).

9.20. CÁLCULO DE UN ALUMBRADO DE INTERIOR

Se utiliza el método del rendimiento de la iluminación y se procede de la forma siguiente:

1) Conociendo la superficie del local (S) y la iluminación necesaria (E), se calcula el flujo útil Φ_u

$$\Phi_u = E \cdot S$$

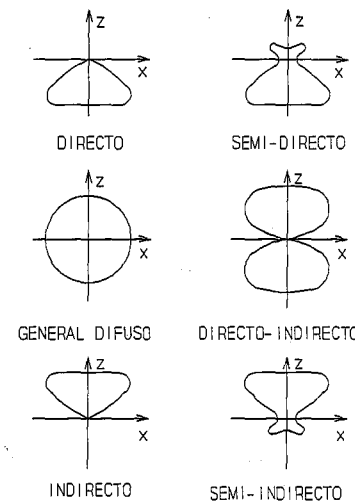


Fig. 9.23

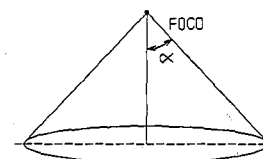


Fig. 9.24

- 2) El flujo total necesario Φ_t es el cociente entre el flujo útil y el rendimiento de la iluminación o factor de utilización η

$$\Phi_t = \frac{\Phi_u}{\eta}$$

El rendimiento de la iluminación se halla en tablas en función del tipo de alumbrado, de la luminaria y de su conservación, de las dimensiones del local, del color del techo, paredes y suelo, y de la altura a la que se hallan suspendidas las lámparas sobre el plano de trabajo o utilización (de 0,85 m a 1 m del suelo en iluminación directa o semi-directa).

Como valores orientativos del rendimiento de iluminación en un local con techo y paredes claros pueden utilizarse los siguientes:

- Alumbrado directo: $\eta=0,5$.
- Alumbrado semi-directo: $\eta=0,4$.
- Alumbrado indirecto: $\eta=0,3$.

Con las paredes y techo de colores muy oscuros (verde oscuro, azul oscuro, etc.) el rendimiento de la iluminación se reduce a la mitad.

- 3) El número de lámparas n_L necesarias, siendo el flujo por lámpara Φ_L se calcula de la forma siguiente:

$$n_L = \frac{\Phi_t}{\Phi_L}$$

Las lámparas se distribuyen uniformemente sobre la superficie del local (fig. 9.25), siendo la distancia entre ellas (d) de una a dos veces la altura de suspensión sobre el plano de trabajo (h). $d = 1 \dots 2 \cdot h$

El factor de uniformidad sobre el área de trabajo no debe ser menor de 0,8 para alumbrado general, y de 0,5 cuando existe alumbrado localizado sobre cada puesto de trabajo.

El *deslumbramiento* (excesivo contraste de luminancias en el campo visual) se corrige:

- Utilizando en el plano de trabajo superficies de acabados mates y colores apropiados.
- Utilizando luminarias de baja luminancia.
- Evitando la colocación de lámparas sin difusores en un cono de visión de 30° de semiángulo sobre un eje horizontal de cualquier observador dentro del local.

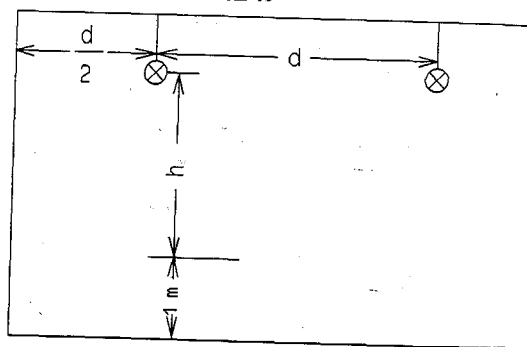


Fig. 9.25

La iluminación necesaria para distintos locales es función de la actividad a realizar en los mismos. En la tabla 9.8 se indican los valores de iluminación recomendados según la Norma Técnica de Edificación (NTE IEI).

Tabla 9.8

E (lux)	CRITERIO DE USO	LOCAL
50-75-100	Solamente orientación para visitas breves y esporádicas.	Almacenes, estacionamiento de coches, cuartos de máquinas, basuras o contadores.
100-150-200	Locales no utilizados continuamente para trabajar.	Vestíbulos, escaleras, ascensores, pasillos, salas de espera, vestuarios, aseos y cuartos de baño, cocinas en vivienda, cuartos de estar, comedores, dormitorios, archivos, salas de actos, cine, teatros o salas de conciertos.
200-300-500	Trabajos con requerimientos visuales limitados.	Oficinas generales, aulas, grandes cocinas, estaciones de servicio, gimnasios, salas de lectura, reuniones o exposiciones, locales industriales con requerimientos visuales limitados.
500-750-1000	Trabajos con requerimientos visuales normales.	Laboratorios, salas de contabilidad, mecanografía o cálculo, aulas para trabajos manuales, costura o dibujo, locales industriales con requerimientos visuales normales.
1000-1500-2000	Trabajos con requerimientos visuales especiales	Salas de delineación, locales industriales para trabajos de precisión.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.20-1 Para iluminar un local de 8 m de largo por 5 m de ancho y 3 m de altura se utilizan tubos fluorescentes de 36 W, 2 600 lm, de manera que el alumbrado sea semi-directo. Sabiendo que la iluminación necesaria es 400 lx con techo y colores claros. Calcular:

- Flujo luminoso útil que se necesita.
- Flujo luminoso total aproximado.
- Número de tubos fluorescentes necesarios.

a) La superficie del local $S = 8 \cdot 5 = 40 \text{ m}^2$.

El flujo luminoso útil $\Phi_u = E S = 400 \cdot 40 = 16\,000 \text{ lm}$

b) El flujo luminoso total $\Phi_t = \frac{\Phi_u}{\eta} = \frac{16\,000}{0,4} = 40\,000 \text{ lm}$

c) Número de tubos fluorescentes $n_L = \frac{\Phi_t}{\Phi_L} = \frac{40\,000}{2\,600} = 15,38 \approx 16 \text{ tubos}$

9.20-2 Una nave industrial de 36 m de largo por 12 m de ancho tiene alumbrado directo con iluminación uniforme, mediante 8 lámparas de 250 W y 13 500 lm cada una. El techo y las paredes son de colores claros. Calcular de forma aproximada:

- Flujo luminoso útil.
- Iluminación media.

Solución: a) 54 000 lm; b) 125 lx.

2.20-3 Una nave industrial de 30 m de largo por 10 m de ancho se desea iluminar por lámparas de vapor de mercurio de 250 W, 13 500 lm con alumbrado directo. Sabiendo que la iluminación necesaria es de 180 lx y que el techo y paredes son de color claro. Calcular de forma aproximada:

- Flujo luminoso útil.
- Flujo luminoso total aproximado.
- Número de lámparas necesarias.

Solución: a) 54 000 lm ; b) 108 000 lm; c) 8 lámparas.

9.21. RENDIMIENTO DE LA ILUMINACIÓN

Se calcula según catálogos de los fabricantes de luminarias, y es el producto de dos factores, rendimiento del local o recinto a iluminar y de la luminaria:

■ Rendimiento del local (η_R)

Se calcula según el índice del local K , siendo a la anchura del local en metros y b su longitud, para alumbrado directo:

$$K = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)}$$

Es necesario conocer el grado de reflexión del techo, paredes y suelo del local, que se indican en la tabla 9.9

Tabla 9.9

Color	Grado de reflexión %	Color	Grado de reflexión %	Material	Grado de reflexión %	Material	Grado de reflexión %
Blanco	70-85	Rosa	45-55	Espejo plata	80-90	Hormigón claro	30-50
Techo acústico blanco	50-65	Rojo claro	30-50	Aluminio anodizado	80-85	Hormigón oscuro	30-40
Gris claro	40-50	Rojo oscuro	10-20	Aluminio pulido	65-75	Mortero claro	35-55
Gris oscuro	10-20	Verde claro	45-65	Esmalte blanco	75-85	Mortero oscuro	20-30
Negro	4	Verde oliva. Ocre	25-35	Acero pulido	55-65	Arenisca blanca	30-40
Amarillo claro	55-65	Verde oscuro	10-20	Madera clara	30-50	Arenisca oscura	15-25
Marrón claro	30-40	Azul claro	45-55	Madera oscura	10-25	Ladrillo claro	30-40
Marrón oscuro	10-20	Azul oscuro	5-10	Mármol blanco	60-70	Ladrillo oscuro	15-25

A partir del índice del local, del grado de reflexión de techo, paredes y plano útil, y según el tipo de iluminación; se halla el rendimiento del local η_R en tablas distintas según la luminaria utilizada. En la tabla 9.10 se indica el rendimiento del local para una luminaria con alumbrado directo.

Tabla 9.10

FACTORES DE REFLEXIÓN									
Techo	0,8		0,7				0,5		0,3
Paredes	0,7		0,7		0,5		0,3	0,3	0,1
Plano útil	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1
Índice del local	Rendimiento del local								
0,60	0,72	0,66	0,70	0,65	0,58	0,56	0,50	0,55	0,49
0,80	0,83	0,76	0,81	0,74	0,70	0,66	0,60	0,64	0,59
1,00	0,91	0,81	0,88	0,80	0,77	0,72	0,66	0,71	0,66
1,25	0,98	0,87	0,95	0,85	0,85	0,79	0,73	0,77	0,73
1,50	1,02	0,90	0,99	0,88	0,90	0,82	0,77	0,81	0,76
2,00	1,08	0,94	1,05	0,94	0,97	0,88	0,83	0,86	0,82
2,50	1,12	0,97	1,09	0,95	1,02	0,91	0,87	0,89	0,86
3,00	1,15	0,99	1,11	0,97	1,05	0,93	0,90	0,91	0,89
4,00	1,19	1,01	1,14	0,99	1,09	0,96	0,94	0,94	0,92
5,00	1,21	1,02	1,16	1,01	1,12	0,98	0,961	0,96	0,94

■ Rendimiento de la luminaria η_L

Es la relación entre el flujo emitido por la luminaria y el total de la lámpara. Lo proporciona el fabricante de la luminaria.

El rendimiento de la iluminación: $\eta = \eta_R \cdot \eta_L$

9.22. FACTOR DE CONSERVACIÓN

Para tener en cuenta el envejecimiento de la lámpara y el ensuciamiento por polvo del interior de la luminaria, el rendimiento de la iluminación se multiplica por un factor de conservación f_c , en función del ambiente de trabajo, según se indica en la siguiente tabla.

Tabla 9.11

TIPO DE LOCAL	FACTOR DE CONSERVACIÓN (f_c)
Acerías y fundiciones.	0,65
Soldadura y mecanizado.	0,7
Oficinas industriales.	0,75
Pacios y locales públicos.	0,8
Despachos y oficinas.	0,85

2.20-3 Una nave industrial de 30 m de largo por 10 m de ancho se desea iluminar por lámparas de vapor de mercurio de 250 W, 13 500 lm con alumbrado directo. Sabiendo que la iluminación necesaria es de 180 lx y que el techo y paredes son de color claro. Calcular de forma aproximada:

- Flujo luminoso útil.
- Flujo luminoso total aproximado.
- Número de lámparas necesarias.

Solución: a) 54 000 lm ; b) 108 000 lm; c) 8 lámparas.

9.21. RENDIMIENTO DE LA ILUMINACIÓN

Se calcula según catálogos de los fabricantes de luminarias, y es el producto de dos factores, rendimiento del local o recinto a iluminar y de la luminaria:

■ Rendimiento del local (η_R)

Se calcula según el índice del local K , siendo a la anchura del local en metros y b su longitud, para alumbrado directo:

$$K = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)}$$

Es necesario conocer el grado de reflexión del techo, paredes y suelo del local, que se indican en la tabla 9.9

Tabla 9.9

Color	Grado de reflexión %	Color	Grado de reflexión %	Material	Grado de reflexión %	Material	Grado de reflexión %
Blanco	70-85	Rosa	45-55	Espejo plata	80-90	Hormigón claro	30-50
Techo acústico blanco	50-65	Rojo claro	30-50	Aluminio anodizado	80-85	Hormigón oscuro	30-40
Gris claro	40-50	Rojo oscuro	10-20	Aluminio pulido	65-75	Mortero claro	35-55
Gris oscuro	10-20	Verde claro	45-65	Esmalte blanco	75-85	Mortero oscuro	20-30
Negro	4	Verde oliva. Ocre	25-35	Acero pulido	55-65	Arenisca blanca	30-40
Amarillo claro	55-65	Verde oscuro	10-20	Madera clara	30-50	Arenisca oscura	15-25
Marrón claro	30-40	Azul claro	45-55	Madera oscura	10-25	Ladrillo claro	30-40
Marrón oscuro	10-20	Azul oscuro	5-10	Mármol blanco	60-70	Ladrillo oscuro	15-25

A partir del índice del local, del grado de reflexión de techo, paredes y plano útil, y según el tipo de iluminación; se halla el rendimiento del local η_R en tablas distintas según la luminaria utilizada. En la tabla 9.10 se indica el rendimiento del local para una luminaria con alumbrado directo.

Tabla 9.10

FACTORES DE REFLEXIÓN										
Techo	0,8		0,7				0,5		0,3	
Paredes	0,7		0,7		0,5		0,3	0,3	0,1	0,3
Plano útil	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Índice del local	Rendimiento del local									
0,60	0,72	0,66	0,70	0,65	0,58	0,56	0,50	0,55	0,49	0,49
0,80	0,83	0,76	0,81	0,74	0,70	0,66	0,60	0,64	0,59	0,59
1,00	0,91	0,81	0,88	0,80	0,77	0,72	0,66	0,71	0,66	0,65
1,25	0,98	0,87	0,95	0,85	0,85	0,79	0,73	0,77	0,73	0,72
1,50	1,02	0,90	0,99	0,88	0,90	0,82	0,77	0,81	0,76	0,75
2,00	1,08	0,94	1,05	0,94	0,97	0,88	0,83	0,86	0,82	0,81
2,50	1,12	0,97	1,09	0,95	1,02	0,91	0,87	0,89	0,86	0,85
3,00	1,15	0,99	1,11	0,97	1,05	0,93	0,90	0,91	0,89	0,87
4,00	1,19	1,01	1,14	0,99	1,09	0,96	0,94	0,94	0,92	0,90
5,00	1,21	1,02	1,16	1,01	1,12	0,98	0,961	0,96	0,94	0,92

■ Rendimiento de la luminaria η_L

Es la relación entre el flujo emitido por la luminaria y el total de la lámpara. Lo proporciona el fabricante de la luminaria.

El rendimiento de la iluminación: $\eta = \eta_R \cdot \eta_L$

9.22. FACTOR DE CONSERVACIÓN

Para tener en cuenta el envejecimiento de la lámpara y el ensuciamiento por polvo del interior de la luminaria, el rendimiento de la iluminación se multiplica por un factor de conservación f_c , en función del ambiente de trabajo, según se indica en la siguiente tabla.

Tabla 9.11

TIPO DE LOCAL	FACTOR DE CONSERVACIÓN (f_c)
Acerías y fundiciones.	0,65
Soldadura y mecanizado.	0,7
Oficinas industriales.	0,75
Patios y locales públicos.	0,8
Despachos y oficinas.	0,85

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.22-1 Se quiere iluminar una oficina de 6×16 m de planta y altura 3 m, con luminarias sujetas al techo y de dos tubos fluorescentes de 36 W cada uno, para iluminación directa extensiva, siendo el flujo luminoso por tubo 3 200 lm. La iluminación media deseada es de 500 lux. Los factores de reflexión según el color del techo, paredes y suelo son respectivamente: 0,7, 0,5 y 0,3. El rendimiento de la luminaria es de 0,82, según el fabricante, y como factor de conservación se utiliza 0,8. Calcular:

- Índice del local, considerando el plano de trabajo a 0,80 m del suelo.
- Flujo útil necesario.
- Número de luminarias.

a) La altura de las luminarias sobre el plano de trabajo: $h = 3 - 0,8 = 2,2$ m

$$\text{El índice del local: } K = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 16}{2,2 \cdot (6 + 16)} = 1,98$$

b) El flujo útil: $\Phi_u = ES = 500 \cdot 6 \cdot 16 = 48\,000$ lm

c) El rendimiento del local, utilizando la tabla 9.10, es de 0,97.

$$\text{El flujo luminoso total: } \Phi_t = \frac{\Phi_u}{\eta f_c} = \frac{48\,000}{0,97 \cdot 0,82 \cdot 0,8} = 75\,434 \text{ lm}$$

$$\text{El número de luminarias: } n_L = \frac{\Phi_t}{\Phi_L} = \frac{75\,434}{2 \cdot 3\,200} = 12 \text{ luminarias}$$

9.22-2 En la iluminación de un taller de 50×20 m se colocan a 8 m de altura lámparas de vapor de mercurio de 400 W y 23 000 lm, para conseguir a una altura del suelo de 0,8 m una iluminación de 250 lx. Los factores de reflexión de techo, paredes y plano de utilización son: 0,7, 0,5 y 0,3. El rendimiento de la luminaria es de 0,8 y el factor de conservación 0,7. Calcular el número de luminarias, utilizando la tabla 9.10.

Solución: 20 luminarias.

9.22-3 Para la iluminación a 0,85 m del suelo de un local de 25×10 m de planta y altura 2,8 m, se colocan 44 luminarias formadas por dos tubos fluorescentes de 36 W y flujo 3 000 lm cada uno. Los factores de reflexión de techo, paredes y plano de utilización son 0,7, 0,5 y 0,1. El factor de conservación es 0,8 y el rendimiento de la luminaria 0,7. Calcular:

- Índice del local.
- Rendimiento del local utilizando la tabla 9.10.
- Flujo útil.
- Iluminación media.

Solución: a) 3,66; b) 0,95; c) 140 448 lm; d) 562 lx.

9.23. CONTROL Y REGULACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE ALUMBRADO DE INTERIORES

■ Control de la instalación

Puede realizarse de forma local, de forma centralizada (para toda la instalación), o combinando ambas formas.

ILUMINACIÓN

Según los medios utilizados para el control de alumbrado, este puede ser:

- Control manual.
- Control automático.
- Control remoto.

Para el control manual local del alumbrado se utilizan:

- Interruptores y conmutadores.** Los esquemas de conexiones más usuales en el interior de edificios para el mando de lámparas de alumbrado se indican en la figura 9.26. El uso de conmutadores (interruptor de dos circuitos) permite el encendido y apagado desde dos puntos distintos (esquema b). El conmutador de cruzamiento (conmutador de cuatro bornes de conexión dos a dos), conectado entre los otros dos conmutadores, permite el encendido y apagado desde tres o más puntos distintos (esquema c).

- Pulsadores.** Al pulsador va asociado un sistema de control, que permite el encendido y apagado dependiendo de otras variables (programado, temporizado, etc.). El circuito más utilizado es el que utiliza un relé temporizado (fig. 9.27); cuando se acciona un pulsador el contacto del relé cierra y se encienden las lámparas. Al cabo de un tiempo programado el contacto del relé se abre apagando las lámparas. La temporización puede ser para un valor fijo o según la hora mediante un relé programable. Una variante de este circuito es utilizando en lugar del relé temporizado un *telerruptor* (relé biestable), que cierra o abre su contacto por el accionamiento de los pulsadores. Si está abierto al pulsar se cierra, y se está cerrado se abre al pulsar.
- Potenciómetro.** Que regula el flujo luminoso de la lámpara variando la intensidad, mediante la inserción de una resistencia en el circuito.

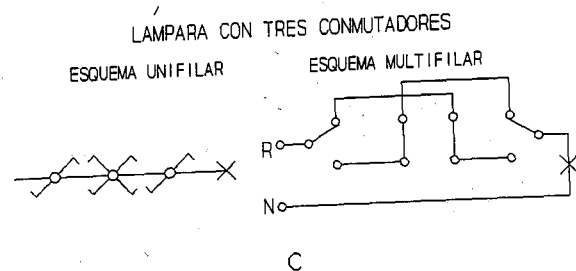
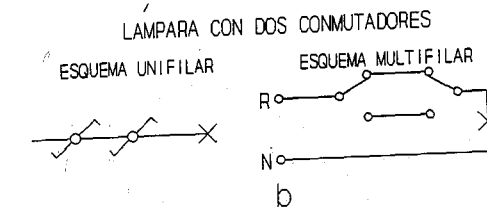
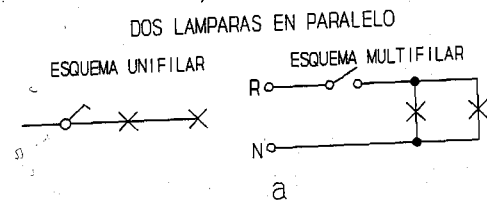


Fig. 9.26

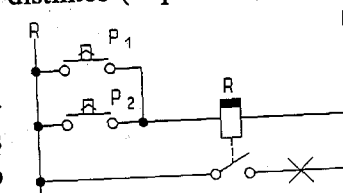


Fig. 9.27

• **Telemando.** Mando a distancia, generalmente por rayos infrarrojos. Necesitan emisores de infrarrojos, detectores y dispositivos de control. En el *control automático*; para la utilización del alumbrado solamente en caso necesario, se utilizan varias medios:

- Detectores de presencia. Mecanismo sensible a la cercanía o al movimiento, asociado a un temporizador.
- Fotocélulas. Controlan el uso del alumbrado según el aporte de la luz natural.
- Multifuncional. Utilizando para el control de alumbrado varios tipos de sensores (telemando, infrarrojos, interruptores, etc.).
- Luminarias inteligentes. Luminarias con control y regulación propios; como fotocélula y detector de presencia.

El *control remoto*, consiste en el control centralizado de la instalación, que permite el encendido, el apagado y la regulación total o por zonas del alumbrado.

■ Regulación del alumbrado

La regulación del flujo luminoso se realiza de varias formas:

- Variación de la tensión de alimentación. Mediante transformadores de tensión de salida variable y en lámparas fluorescentes con inductancias regulables.
- Variación del tiempo en el que la intensidad circula por las lámparas. Mediante el uso de circuitos electrónicos con tiristores o triacs.
- Variación de la frecuencia de la tensión de alimentación. Con balastos electrónicos para lámparas fluorescentes, en las que la eficacia luminosa aumenta con la frecuencia.

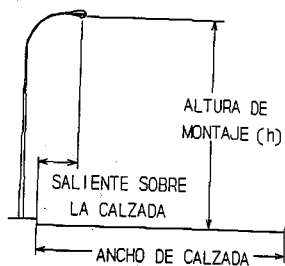


Fig. 9.28

9.24. ALUMBRADO EXTERIOR

Es el alumbrado de vías de comunicación, plazas u otra extensión descubierta.

Las luminarias son colocadas sobre soportes en forma de báculo (fig. 9.28), sobre columna o sobre brazo de sujeción, a una altura h sobre la vía a iluminar.

9.25. CÁLCULO DEL ALUMBRADO DE EXTERIORES POR EL MÉTODO DEL FLUJO LUMINOSO

Se utiliza el método del rendimiento de la iluminación, igual que en el alumbrado de interiores, considerando la superficie S iluminada por cada foco.

$$\Phi_t = \frac{\Phi_u}{\eta} = \frac{E S}{\eta}$$

El rendimiento de la iluminación o coeficiente de utilización η se halla en tablas en función de las características de la luminaria y de la vía pública. Como valores orientativos pueden considerarse los siguientes:

- Colocación axial de los focos: $\eta = 0,5$.
- Colocación lateral de los focos: $\eta = 0,4$.

La colocación axial de los focos (según el eje de la vía), no se suele utilizar. En las vías de comunicación con mediana central se utilizan dos focos, iluminando cada uno la mitad de la vía. Las colocaciones laterales más utilizadas son: tresbolillo, unilateral y bilateral pareada (fig. 9.29).

La altura recomendada del punto de luz es función del flujo de la lámpara, según la siguiente tabla.

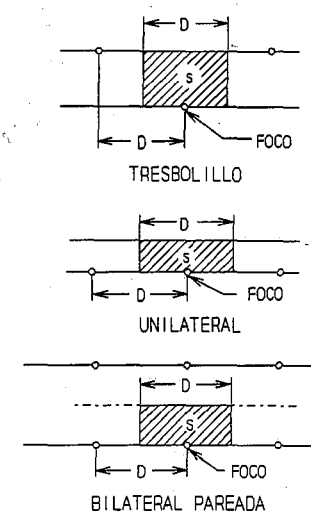


Fig. 9.29

Tabla 9.12

ALTURA DEL PUNTO DE LUZ (m)	FLUJO DE LA LÁMPARA (lm)
< 7,5	< 15 000
7,5 - 9	15 000 - 20 000
9 - 12	20 000 - 40 000
> 12	> 40 000

La altura de la luminaria está también en relación directa con la anchura de la vía a iluminar y la disposición de los focos, según la tabla siguiente:

Tabla 9.13

TIPO DE COLOCACIÓN	RELACIÓN ALTURA/ANCHO
Unilateral	0,85 - 1
Tresbolillo	0,5 - 0,85
Pareada	0,33 - 0,5

La relación de la separación a la altura de la luminaria es función de la iluminación media a conseguir sobre la vía, según la siguiente tabla:

Tabla 9.14

ILUMINACIÓN MEDIA E_m (lux)	RELACIÓN SEPARACIÓN/ALTURA
$2 \leq E_m < 7$	5 - 4
$7 \leq E_m < 15$	4 - 3,5
$15 \leq E_m \leq 30$	3,5 - 2

En la tabla 9.14 se indican valores orientativos de iluminación exterior y deportiva.

Tabla 9.15

TIPO	E (lux)
Autopistas, autovías y carreteras principales.	35
Vías urbanas de tráfico rápido.	30
Vías urbanas y provinciales.	25-28
Campos de tenis.	100-300
Campos de baloncesto	300-500
Campos de fútbol.	300-1000

La iluminación recomendada por la CIE (Comisión Internacional de Iluminación) según la importancia de las vías de comunicación, varía de 18 a 35 lux, con un factor de uniformidad medio de 0,35 a 0,65 y una luminancia de 1,1 a 2 cd/m².

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.25-1 Para iluminar una calle de 9 m de ancho se utilizan lámparas de vapor de sodio de 250 W, con luminarias (fig. 9.30), colocadas lateralmente por una acera. Si se desea obtener una iluminación media de 30 lx y el flujo por foco es de 25 000 lm, con un coeficiente de utilización de 0,4. Calcular la distancia entre focos.

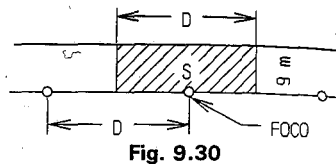


Fig. 9.30

El flujo útil de cada foco:

$$\Phi_u = \Phi_t \eta = 25\,000 \cdot 0,4 = 10\,000 \text{ lm}$$

La superficie iluminada por cada foco:

$$S = 9D = \frac{\Phi_u}{E} = \frac{10\,000}{30} = 333,33 \text{ m}^2$$

La distancia entre focos: $D = \frac{333,33}{9} = 37 \text{ m}$

9.25-2 En una calle de 14 m de ancho se colocan luminarias al tresbolillo con lámparas de vapor de mercurio de 400 W, 23 000 lm. La iluminación media sobre la calzada es de 25 lx. Considerando un coeficiente de utilización de 0,4, calcular la distancia entre focos.

Solución: 26,3 m.

9.25-3 Para conseguir en una calle de 17 m de ancho una iluminación media de 30 lx, se colocan bilateralmente luminarias con lámparas de vapor de sodio de 250 W y flujo luminoso 25 000 lm. Calcular la distancia entre focos considerando un coeficiente de utilización de 0,4.

Solución: 39,2 m.

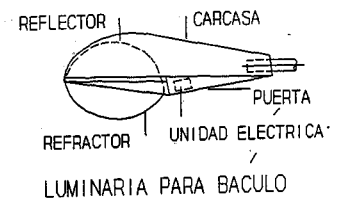
9.25-4 En una calle de 12 m de ancho se colocan luminarias al tresbolillo, separadas entre sí 26 m. Si se desea obtener una iluminación media de 30 lm y el coeficiente de utilización o rendimiento es 0,4. Calcular el flujo necesario en la lámpara.
Solución: 23 400 lm.

9.26. LUMINARIAS PARA EL ALUMBRADO EXTERIOR

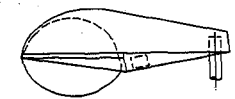
Las luminarias para el alumbrado exterior o público (fig. 9.31) son asimétricas, emitiendo mayor flujo en la dirección del eje de la vía a iluminar.

Según sus características de emisión de luz las luminarias se clasifican en tres grupos (fig. 9.32):

- 1) *Luminarias cut-off (haz de luz recortado)*. Su intensidad en la horizontal es menor del 5% de la máxima y la intensidad a 80° es inferior a 30 cd por 1 000 lm. Son las más utilizadas en alumbrado público.
- 2) *Luminarias semi cut-off (haz de luz semirrecortado)*. Su intensidad en la horizontal es menor del 3% de la máxima y la intensidad a 80° es inferior a 100 cd por 1 000 lm.
- 3) *Luminarias non cut-off (haz de luz no recortado)*. Su intensidad en la horizontal es superior a la de las luminarias semi cut-off.



LUMINARIA PARA BACULO



LUMINARIA PARA COLUMNA

Fig. 9.31

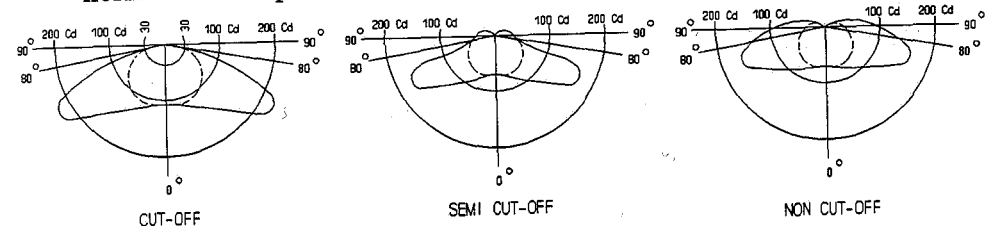


Fig. 9.32

Las luminarias para alumbrado público suelen ser de grado de aislamiento clase I y con protección mínima:

- Luminarias abiertas IP33.
- Luminarias cerradas IP43 o IP54 (ambiente con contaminación).
- Luminarias herméticas IP655.

9.27. CURVAS DE UTILIZACIÓN

El factor de utilización de la luminaria η (relación entre el flujo luminoso que llega a la superficie y el emitido por la lámpara) se calcula según las curvas de utilización de la luminaria (fig. 9.33) suministradas por el fabricante.

Para una relación de *distancia transversal a la vertical de la luminaria/altura* se obtiene un factor para el lado de la calzada η_c y otro para el lado de acera η_a . Cuando la vertical de la luminaria cae sobre la calzada, la suma de los dos factores es el coeficiente de utilización $\eta = \eta_c + \eta_a$. Si la vertical cae dentro de la acera, se restan los dos factores que resultan del lado de la calzada.

Si se tiene en cuenta la conservación de la luminaria, el factor de utilización queda multiplicado por el *factor de conservación* f_c , suministrado por el fabricante, según el envejecimiento de la lámpara y la suciedad que se va acumulando sobre la luminaria. Para una luminaria hermética y para lámparas de vapor de mercurio o de vapor de sodio suele utilizarse 0,75.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.27-1 Para iluminar un vía urbana de ancho de calzada 12 m y de las aceras 3 m, se utilizan lámparas de vapor de mercurio de 400 W y 23 000 lm, con luminaria cerrada, de reparto de luz asimétrico y colocada sobre báculo de acero. El báculo se coloca en la acera de forma que la vertical de la luminaria está sobre la calzada a 1 m de la acera. La iluminación media debe ser de 30 lux. Calcular:

- Tipo de colocación de los focos si se escoge un báculo que tiene como altura de suspensión de la luminaria 10 m.
- Factor de utilización si las curvas de utilización, suministradas por el fabricante de la luminaria, son las de la figura 9.33.
- Distancia entre focos, si se considera un factor de conservación de 0,75.

a) La relación altura/ancho $\frac{10}{12} = 0,83$

Según la tabla 9.13, el tipo de colocación debe ser al tresbolillo.

b) La relación para la acera es $\frac{1}{10} = 0,1$, por lo que el factor de acera según la figura 9.33 es $\eta_a = 0,01$.

La relación para la calzada es $\frac{11}{10} = 1,1$, por lo que el factor de calzada es $\eta_c = 0,46$.

El coeficiente de utilización: $\eta = 0,01 + 0,46 = 0,47$.

c) El flujo útil: $\Phi_u = ES = 30 \cdot 12 \cdot D$

El flujo total: $\Phi_t = \frac{30 \cdot 12 \cdot D}{0,47 \cdot 0,75} = 23\,000$; $D = \frac{23\,000 \cdot 0,47 \cdot 0,75}{30 \cdot 12} = 22,52 \text{ m}$

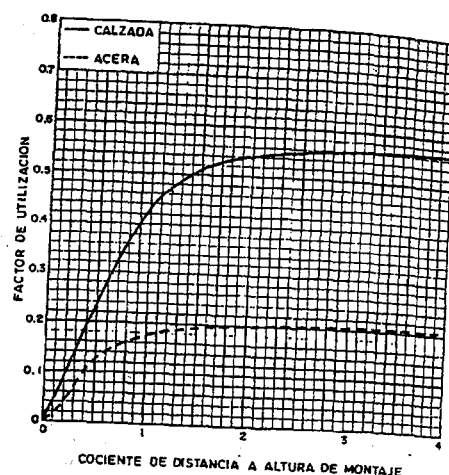


Fig. 9.33. Curva de utilización de una luminaria de exterior. (Cortesía Hadasa).

9.27-2 Para iluminación de una vía de 9 m de ancho se utiliza lateralmente un luminaria asimétrica cerrada con lámpara de vapor de mercurio 250 W, 13 500 lm, colocada sobre un báculo de 7 m con la vertical de la luminaria sobre la orilla de la calzada. Considerando un factor de utilización de la luminaria de 0,4 y un factor de conservación de 0,8, calcular la distancia entre luminarias para una iluminación media de 25 lx.

Solución: 19,2 m

9.27-3 Se desea iluminar con luminaria cerrada y lámparas de vapor de sodio 150 W, 14 500 lm, una vía con circulación en los dos sentidos, de calzada 9 m con colocación de los focos unilateral. La luminaria se coloca a una altura de 10 m. Calcular, para obtener una iluminación media de 25 lux.

- Distancia entre lámparas, considerando un coeficiente de utilización de 0,4 y un factor de conservación de 0,8.
- Iluminación sobre la calzada en la vertical de la luminaria, si la curva polar indica una intensidad de iluminación de 200 cd para 1 000 lm.

Solución: a) 20,6 m; b) 29 lx.

9.28. ALIMENTACIÓN Y CONTROL DE LAS INSTALACIONES DE ALUMBRADO DE EXTERIORES

■ Líneas de alimentación

La alimentación de las instalaciones de alumbrado público o exterior suele realizarse con una red de corriente alterna trifásica con neutro en B.T., con las luminarias repartidas entre las tres fases. Según el R.B.T. (MIE BT 009) los conductores serán aislados como mínimo con tensión de aislamiento 1 000 V. La sección mínima de cobre es para líneas sobre fachada 2,5 mm² y para líneas subterráneas 6 mm², colocados los conductores a una profundidad mínima de 0,40 m. En la conexión de las columnas o brazos a la red de alumbrado, la sección mínima para conductores de cobre es 1,5 mm² en modalidad aérea y 2,5 mm² en subterránea.

La acometida de la instalación se conecta según el R.B.T. y las normas de la Empresa suministradora, en un armario donde se colocan los aparatos de medida, maniobra y protección. Cada línea monofásica de alimentación a las lámparas (que se conectan en paralelo) lleva un interruptor diferencial y un interruptor automático. Además cada lámpara está protegida con fusibles que se colocan en la parte inferior del poste o báculo que soporta la luminaria. Los báculos o postes metálicos están conectados a tierra mediante cable de cobre desnudo de sección 35 mm² a una profundidad no menor de 50 cm y conectados a una pica de tierra cada 5 o 6 postes con soldadura aluminotérmica (según NTE-IEE).

Si la potencia del alumbrado es muy grande, la acometida se realiza en M.T. a un centro de transformación, y la instalación se conecta en B.T. al secundario del transformador.

El cálculo de las secciones de la línea de alimentación por caída de tensión, se puede realizar:

- 1) Considerando circuitos monofásicos:
 - Cuando la alimentación es monofásica.
 - Cuando la reducción de alumbrado se realiza desconectando dos fases de la instalación.
- 2) Considerando circuitos trifásicos.
 - Calculando la sección de la fase con mayor carga. El método más simple consiste en considerar el circuito trifásico equilibrado, con lo que no se tiene en cuenta la caída de tensión por el neutro de la instalación, por el que no circularía corriente.

■ Regulación y control

- *Regulación de la iluminación de exteriores.* Para disminuir el consumo se disminuye el nivel de iluminación a partir de un momento prefijado. Actualmente se realiza:
 - 1) *Interruptores crepusculares.* Células fotoeléctricas, que realizan el encendido y apagado de la instalación de forma automática según la iluminación de la luz diurna.
 - 2) *Interruptor horario astronómico.* Se emplea actualmente un programador electrónico que realiza automáticamente la maniobra de apagado y encendido de las instalaciones de alumbrado exterior, variando automáticamente la hora de encendido y apagado a lo largo del año según las coordenadas geográficas.
 - 3) *Balastos de doble nivel.* Una inductancia auxiliar conectada a la principal hace que la impedancia total aumente, con lo que la lámpara funciona en régimen reducido, con menor tensión en bornes y menor flujo luminoso.
 - 4) *Reductores de tensión.* Dispositivos que actúan bajando la tensión de alimentación de las lámparas para reducir su flujo luminoso.
 - 5) *Reguladores-estabilizadores.* Dispositivos que estabilizan la tensión de alimentación de las lámparas, evitando las sobretensiones, y regulan el flujo emitido por las mismas variando la tensión de alimentación.
- *Control de la iluminación de exteriores.* El encendido y apagado del alumbrado y la vigilancia e información sobre el estado de la instalación puede realizarse actuando:
 - Sobre cada punto de luz.
 - Sobre el cuadro de alumbrado, que controla varios puntos de luz.
 - Sobre puesto centralizado, que comanda varios cuadros de alumbrado.

En las instalaciones de alumbrado público se suelen desconectar parte de las lámparas a determinadas horas de la noche por medio de un interruptor horario para reducción del consumo. Actualmente, en lugar de la desconexión de una parte

de las lámparas, se utilizan reductores de consumo, con reloj programable, que actúan bajando la tensión de alimentación de las lámparas (fig. 9.34), con lo que baja también el nivel de iluminación, en el tiempo programado previamente.

Según el R.B.T. (MIE BT 009) se debe disponer para control del alumbrado, además de los dispositivos automáticos que se utilicen, un interruptor manual para el apagado y encendido de la instalación.

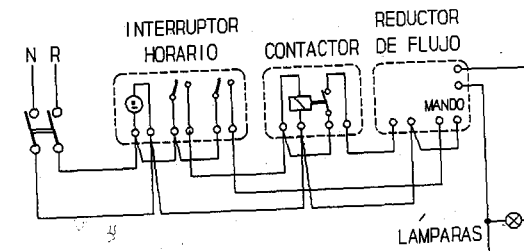


Fig. 9.34

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.28-1 Se conectan mediante un línea subterránea con conductores de cobre, unipolares, aislados con XLPE, bajo tubo, 11 báculos con luminarias de 250 W, 220 V y separados entre sí 35 m. El tramo inicial es de 20 m. La línea de alimentación es trifásica con neutro 380/220 V y la caída de tensión máxima es el 2%. La derivación a cada luminaria es de 2,5 mm². Calcular la línea de alimentación, de sección uniforme:

- a) Considerando la línea trifásica equilibrada.
 - b) Considerando circuitos monofásicos.
 - a) La potencia a considerar en cada luminaria (MIE BT 009), es:
250 · 1,8 = 450 W
- La caída de tensión en la línea.

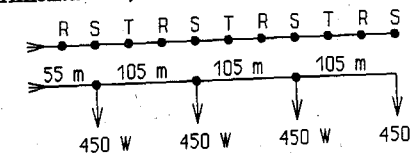


Fig. 9.35

$$u = \frac{2 \cdot 220}{100} = 4,4 \text{ V}$$

Conectando las lámparas sucesivamente a las tres fases, la fase más cargada es la S (fig. 9.35). Para el cálculo de la sección, se considera como una línea monofásica sin tener en cuenta el neutro.

$$s = \frac{\sum (LP)}{cuV} = \frac{55 \cdot 450 + 160 \cdot 450 + 265 \cdot 450 + 370 \cdot 450}{56 \cdot 4 \cdot 220} = 7 \text{ mm}^2$$

La sección más próxima por exceso es de 10 mm², que admite bajo tubo una intensidad de 96 · 0,8 = 76,8 A.

La intensidad que circula por el tramo más desfavorable con un factor de potencia de 0,86.

$$I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{450 \cdot 4}{220 \cdot 0,86} = 9,5 \text{ A}$$

Mucho menor que la intensidad permitida por el conductor, por lo que es válida la sección de 10 mm². En las líneas de alumbrado público la caída de tensión es la que marca la sección.

- b) Considerando el circuito de la fase S como monofásico, con el neutro de igual sección que la fase:

$$s = \frac{2 \sum (LP)}{cu V} = 2 \cdot 7 = 14 \text{ mm}^2$$

La sección a utilizar para fases y neutro es de 16 mm²

9.28-2 Calcular la línea de sección uniforme que alimenta a 380/220 V, un alumbrado público con 12 lámparas de 400 W, 220 V, repartidas sobre las tres fases y separadas entre sí 30 m. El tramo inicial de la línea es de 70 m y la caída de tensión máxima 2%. Los conductores son de cobre, unipolares, aislados con PVC, en instalación enterrada bajo tubo. Para reducción del flujo luminoso, se utilizan reductores de consumo, que disminuyen la tensión de alimentación.

Solución: 16 mm²

9.29. ALUMBRADO CON PROYECTORES

Se llama *proyector* a una luminaria (fig. 9.36) que concentra la luz en un ángulo sólido determinado para conseguir una iluminación elevada. Se utiliza para iluminar un objeto o escena de forma que su iluminación será superior a la de sus alrededores.

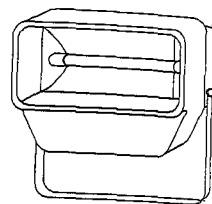


Fig. 9.36

La iluminación por proyectores, según sus aplicaciones, puede ser:

- Iluminación decorativa o arquitectónica: fachadas, edificios, etc.
- Iluminación utilitaria o industrial: muelles de carga, parques de almacenamiento, astilleros, etc.
- Iluminación deportiva.

Los proyectores se clasifican en 7 tipos según el ángulo de apertura del haz (ángulo sólido que contiene a todas las intensidades luminosas de valor igual o mayor al 10% de la máxima). La elección del tipo de proyector viene condicionada por su aplicación; para ello hay que considerar:

- La apertura del haz del proyector será tanto más pequeña cuanto mayor sea la distancia al objeto o escena a iluminar.
- Los bordes de los haces de los proyectores que inciden sobre una superficie deben superponerse para conseguir una iluminación uniforme.

Para el alumbrado industrial con proyectores, la separación entre estos no debe ser superior a 4 veces la altura a la que están situados.

Para calcular un alumbrado por proyección por el método de los lúmenes, se utiliza el rendimiento de la iluminación, igual que en el alumbrado de vías públicas, considerando la superficie iluminada por cada proyector.

$$\Phi_t = \frac{\Phi_u}{\eta} = \frac{ES}{\eta}$$

El rendimiento de la iluminación o coeficiente de utilización η es la relación entre los lúmenes que inciden sobre la superficie a iluminar y los lúmenes totales. Debe estar comprendido entre 0,6 y 0,9. Puede estar determinado por experiencia o calcularse con el diagrama isocandelas del proyector sobre la superficie a iluminar, sumando los lúmenes que quedan dentro de la superficie y dividiendo por los lúmenes totales del proyector.

Si se considera el factor de conservación del proyector f_c , el coeficiente de utilización queda multiplicado por este coeficiente, que para proyectores cerrados, en función del ambiente de trabajo, se utilizan los valores siguientes:

- Zonas industriales: 0,7.
- Zonas de aparcamiento, almacenaje, etc: 0,75.
- Zonas deportivas: 0,8 - 0,95.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.29-1 Se desea iluminar una pista de tenis de dimensiones 24×11 m, rodeada de un borde de 5 m de ancho. Se utilizan reflectores con lámpara de halogenuros metálicos de 400 W y 24 000 lm. El coeficiente de utilización es de 0,6 y el factor de conservación 0,7. Si se desea una iluminación media de 200 lux, calcular:

- Flujo útil necesario.
- Número de proyectores.

a) El flujo útil necesario sobre la pista $\Phi_u = ES = 200 \cdot 24 \cdot 11 = 52\,800 \text{ lm}$

b) El flujo luminoso total $\Phi_t = \frac{\Phi_u}{\eta f_c} = \frac{52\,800}{0,6 \cdot 0,7} = 125\,714 \text{ lm}$

El número de proyectores necesarios $n_p = \frac{\Phi_t}{\Phi_p} = \frac{125\,714}{24\,000} = 5,24 \approx 6$ proyectores

9.29-2 Calcular el número de proyectores necesario para iluminar la fachada de un edificio de superficie 240 m² y obtener una iluminación media de 100 lux, considerando un factor de utilización de 0,7 y un factor de conservación de 0,8. Los proyectores utilizan lámparas de 24 000 lm.

Solución: 2 proyectores.

9.29-3 Se desea iluminar un espacio abierto de superficie 29×72 m mediante proyectores que contienen cada uno una lámpara de vapor de sodio a alta presión 250 W, 25 000 lm. para una iluminancia media de 40 lux, calcular el número de proyectores necesarios, considerando un coeficiente de utilización de 0,6 y un factor de conservación de 0,7.

Solución: 8 proyectores.

9.30. MANTENIMIENTO DE LAS INSTALACIONES DE ALUMBRADO

1) *Inspección de la instalación.* Se programan inspecciones periódicas, comprobando:

- Para cada equipo de luz: aspecto de los conductores, apriete de tornillos y aspecto de los elementos del equipo auxiliar de las lámparas.
- Para el cuadro de mando: interruptores horarios, contactores y elementos de protección. Con menor frecuencia medidas sobre aislamiento, resistencia de puesta a tierra y factor de potencia.

2) *Limpieza.* Se establecen programas de periodicidad de limpieza de las luminarias, nunca superior a un año (según la NTE-IEI). Las lámparas se limpian preferiblemente en seco. Las luminarias se limpian mediante paño con agua jabonosa. Para las luminarias de aluminio se utilizan soluciones jabonosas ni muy alcalinas ni muy ácidas.

3) *Reposición.* La reposición de las lámparas puede realizarse de forma individual, cuando se produce el fallo, pero es preferible realizarla por grupos según la vida media mínima, según un plan de reposición.

Para elaborar un plan de reposición es necesario considerar la depreciación del flujo y la vida media de las lámparas.

En el alumbrado exterior la comprobación de la iluminación se realizará con luxómetro, por personal técnico, al menos una vez al año (según NTE-IEE).

Durante el mantenimiento, para la limpieza y reposición, se desconecta la instalación. Las herramientas estarán aisladas con grado de aislamiento II o alimentadas con tensión inferior a 50 V.

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.9-1. Calcular el flujo luminoso que recibe una superficie de 50 m^2 si la iluminación sobre ella es en cualquier punto de la misma 200 lx .

Solución: $10\,000 \text{ lm}$.

P.9-2. Calcular que intensidad luminosa debe tener un foco en la dirección de un punto, situado a una distancia horizontal de 9 m de la vertical de la luminaria, que está a una altura de 8 m , para obtener la iluminación de 20 lux en ese punto.

Solución: $4\,365 \text{ cd}$.

P.9-3. Una luminaria situada a una altura de 10 m sobre la calzada, tiene una intensidad luminosa de 100 cd en cualquier dirección para un flujo de $1\,000 \text{ lm}$. Calcular, si se utiliza una lámpara de $20\,000 \text{ lm}$, la iluminancia sobre la calzada:

- En la vertical de la luminaria.
- En un punto situado a 12 m de la vertical de la luminaria.

Solución: a) 20 lx ; b) $5,25 \text{ lx}$.

P.9-4. El valor de una curva isolux, para luminaria de $1\,000 \text{ lm}$ y altura 1 m , tiene un valor de 20 lx . Calcular el valor de iluminación de esa curva, cuando la luminaria se coloca a una altura de 12 m y con lámpara de $45\,000 \text{ lm}$.

Solución: $6,25 \text{ lx}$.

P.9-5. Un local de techo y paredes de color claro y dimensiones 18 m de largo, 9 m de ancho y 3 m de alto se ilumina uniformemente con 8 luminarias de dos tubos fluorescentes de 36 W , $3\,000 \text{ lm}$ cada uno. El alumbrado es directo. Calcular:

- Flujo luminoso total.
- Flujo luminoso útil considerando un rendimiento de la iluminación de $0,5$
- Iluminación media sobre el plano de trabajo.

Solución: a) $48\,000 \text{ lm}$; b) $24\,000 \text{ lm}$; c) 148 lx .

P.9-6. En la iluminación de un local industrial de $40 \times 20 \text{ m}$ se colocan a 5 m de altura lámparas de vapor de mercurio de 400 W y $23\,000 \text{ lm}$, para conseguir a una altura del suelo de $0,8 \text{ m}$ una iluminación de 300 lux . Los factores de reflexión de techo, paredes y plano de utilización son: $0,7$, $0,5$ y $0,3$. El rendimiento de la luminaria es de $0,8$ y el factor de conservación $0,8$. Calcular:

- Índice del local.
- Rendimiento del local utilizando la tabla 9.10.
- Número de luminarias necesarias.

Solución: a) $3,17$; b) $1,06$; c) 16 luminarias.

P.9-7. En una calle de 10 m de ancho se colocan luminarias unilateralmente, separadas entre sí 34 m, sobre una acera. Si se desea obtener una iluminación media de 20 lux y el coeficiente de utilización es 0,4, calcular el flujo necesario por foco.

Solución: 17 000 lm.

P.9-8. Para iluminación de una vía de 17 m de ancho se utilizan bilateralmente pareadas luminarias asimétricas cerradas con lámparas de vapor de sodio 250 W, 23 500 lm, colocadas sobre báculos de 9 m, con la vertical de la luminaria sobre la orilla de la calzada. Considerando un factor de utilización de la luminaria de 0,43 y un coeficiente de conservación de 0,75, calcular la distancia entre luminarias para una iluminación media de 30 lux.

Solución: 29,7 m.

P.9-9. Un alumbrado público con 16 lámparas de 250 W, 220 V, está alimentado con una línea trifásica 380/220 V. Las lámparas se reparten sobre las tres fases y están separadas entre sí 35 m. El tramo inicial de la línea es de 100 m y la caída de tensión máxima 2,5%. Los conductores son de cobre, unipolares, aislados con PVC, en instalación enterrada bajo tubo. Calcular la sección de los conductores si la línea es de sección uniforme y se desprecia la intensidad que circula por el neutro.

Solución: 16 mm².

P.9-10. Para iluminar una superficie de 320 m² se utilizan 2 reflectores con lámpara de vapor de sodio de 24 000 lm. El coeficiente de utilización es de 0,65 y el factor de conservación 0,75. Calcular la iluminación media.

Solución: 73 lx.



CORRIENTE ALTERNA

A.1. CORRIENTE ALTERNA

Es una corriente eléctrica que se repite cambiando de sentido periódicamente. La corriente alterna más utilizada es la que realiza un ciclo de valores senoidales.

A.2. PERÍODO, FRECUENCIA Y ALTERNANCIA DE LA CORRIENTE ALTERNA

Período: Es el tiempo mínimo T , que tarda la corriente en repetir sus valores. En el tiempo de un período la corriente realiza una oscilación completa o ciclo.

Frecuencia: Es el número de ciclos f , realizados en un segundo.

La frecuencia es la inversa del período. $f = \frac{1}{T}$

El período por segundo recibe el nombre de **hercio** o hertz (Hz).

Alternancia: Cuando la corriente alterna, circula en un sentido realiza una alternancia. En cada período hay dos alternancias, una que consideramos positiva y otra negativa.

A.3. VALORES CARACTERÍSTICOS DE LAS MAGNITUDES ALTERNAS

Valor instantáneo: Es el valor (i o v), que toma la intensidad de la corriente o la tensión en un instante.

Valor máximo: Es el mayor valor ($I_{\text{máx}}$ o $V_{\text{máx}}$) que toma la intensidad de corriente o la tensión en una alternancia. Se llama también amplitud.

Valor medio: Es la media aritmética de los valores instantáneos de intensidad o tensión en una alternancia. El valor medio de una intensidad de corriente alterna, es el valor I_m que transporta la misma carga en el mismo tiempo que una corriente continua de igual intensidad.

El valor medio de la intensidad de corriente alterna senoidal en función del valor máximo es:

$$I_m = \frac{2I_{\text{máx}}}{\pi} = 0,636 I_{\text{máx}}$$

El valor medio de la tensión alterna senoidal en función del valor máximo es, de forma análoga que para la intensidad:

$$V_m = \frac{2V_{\text{máx}}}{\pi} = 0,636 V_{\text{máx}}$$

Valor eficaz: Matemáticamente es la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de valores instantáneos de intensidad de corriente o tensión durante un período. El valor eficaz es el valor (I) de una intensidad de corriente alterna que produce en un circuito la misma cantidad de calor por efecto Joule que una corriente continua de igual intensidad.

El valor eficaz de la intensidad de corriente alterna senoidal en función del valor máximo es:

$$I = \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = 0,707 I_{\text{máx}}$$

El valor eficaz (V) de una tensión alterna senoidal en función del valor máximo es, de forma análoga que para la intensidad:

$$V = \frac{V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = 0,707 V_{\text{máx}}$$

Se llama *factor de forma* a la relación entre el valor eficaz y el valor medio; para una tensión o intensidad alterna senoidal vale siempre 1,11

$$\frac{V}{V_m} = \frac{\frac{V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}}{\frac{V_{\text{máx}}}{\pi}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

A.4. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UNA MAGNITUD ALTERNA SENOIDAL

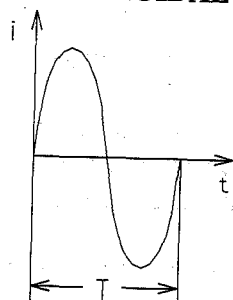


Fig. A.1

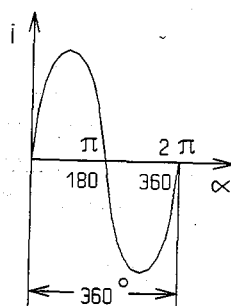


Fig. A.2

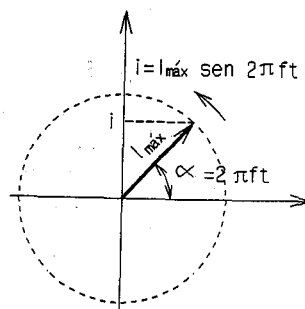


Fig. A.3

1) **Representación cartesiana:** Se representa mediante senoides.

- En función del tiempo (fig. A.1): se toma el valor de la magnitud en ordenadas y el del tiempo en abscisas.
- En función del ángulo (fig. A.2): se toma el valor de la magnitud en ordenadas y el del ángulo en abscisas; teniendo en cuenta que al tiempo de un período le corresponde un ángulo de 360°.

2) **Representación vectorial:** Se representa por un vector giratorio o fasor (fig. A.3), de módulo el valor máximo de la magnitud, y que gira con movimiento uniforme describiendo una rotación completa en el tiempo de un período; con velocidad angular.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

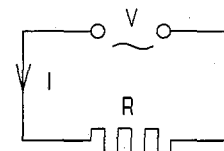
En los cálculos se suele representar el vector con el módulo del valor eficaz.

Dos magnitudes alternas están en fase cuando tienen en el mismo instante sus valores máximos y mínimos. Están desfasadas un ángulo φ o un tiempo t , cuando sus valores máximos y mínimos están desfasados ese ángulo o ese tiempo.

A.5. CIRCUITOS SIMPLES DE CORRIENTE ALTERNA

■ Circuito con resistencia óhmica

Un circuito tiene sólo resistencia óhmica cuando está desprovisto de autoinducción y capacidad. Al conectar una resistencia R a una tensión alterna senoidal de valor eficaz V y frecuencia f , como indica la figura A.4:



- Por la resistencia circula una corriente alterna senoidal de frecuencia f e intensidad eficaz:

$$I = \frac{V}{R}$$

Fig. A.4

- La intensidad de corriente está en fase con la tensión aplicada.
- La potencia consumida por efecto Joule en la resistencia se llama potencia activa P y se mide en vatios.

$$P = RI^2 = V_R I$$

DEMOSTRACIÓN

La intensidad en valor instantáneo

$$i = \frac{v}{R} = \frac{V_{\text{máx}} \sin 2\pi ft}{R} = \frac{V_{\text{máx}}}{R} \sin 2\pi ft = I_{\text{máx}} \sin 2\pi ft$$

La intensidad máxima $I_{\text{máx}} = \frac{V_{\text{máx}}}{R}$; $\sqrt{2} I = \frac{\sqrt{2} V}{R}$

Entonces, la intensidad eficaz $I = \frac{V}{R}$

■ Circuito con autoinducción

Un circuito tiene sólo autoinducción cuando está desprovisto de resistencia óhmica y capacidad. Al conectar una autoinducción de coeficiente L a una tensión alterna senoidal de valor eficaz V y frecuencia f (fig. A.5):

- Por la autoinducción circula una corriente alterna senoidal de frecuencia f e intensidad eficaz:

$$I = \frac{V}{2\pi fL}$$

El valor $X_L = 2\pi fL$ se denomina reactancia de autoinducción o inductancia y se mide en ohmios. Es la oposición que presenta la autoinducción a la circulación de la corriente alterna.

- La intensidad de corriente está desfasada en retraso 90° (un cuarto de período) respecto a la tensión aplicada.
- La potencia consumida por la autoinducción, se llama potencia reactiva Q_L y se mide en voltiamperios reactivos (VAr).

$$Q_L = X_L I^2 = V_L I$$

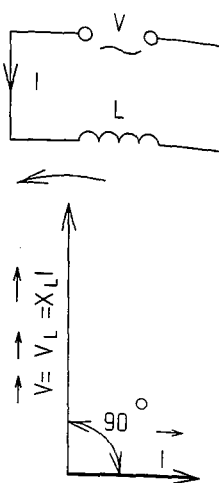


Fig. A.5

DEMOSTRACIÓN

En la autoinducción la intensidad de corriente es alterna variando de $-I_{\text{máx}}$ a $I_{\text{máx}}$ en el tiempo de medio período. La variación media de la intensidad es:

$$\frac{2I_{\text{máx}}}{T} = \frac{4I_{\text{máx}}}{T} = 4fI_{\text{máx}}$$

La tensión media en la autoinducción es igual a la variación media de flujo magnético, y como el flujo está relacionado con la intensidad por el coeficiente de autoinducción:

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

La tensión media es igual al coeficiente de autoinducción por la variación media de la intensidad de corriente:

$$V_m = 4LfI_{\text{máx}}$$

Por la relación entre valores medios y máximos en funciones senoidales:

$$V_{\text{máx}} = \frac{\pi}{2} V_m = 2\pi fLI_{\text{máx}}$$

La tensión eficaz $V = 2\pi fLI = X_L I$

■ Circuito con capacidad

Un circuito tiene sólo capacidad cuando está desprovisto de resistencia óhmica y de autoinducción. Al conectar un condensador de capacidad C a una tensión alterna senoidal de valor eficaz V y frecuencia f (fig. A.6):

- Por el dieléctrico del condensador no circula corriente eléctrica; pero la influencia eléctrica entre las dos armaduras transmite la variación de tensión y el condensador se carga y descarga alternativamente. Por el circuito pasa una corriente alterna senoidal de frecuencia f y valor eficaz:

$$I = \frac{V}{2\pi fC}$$

Se llama reactancia de capacidad o capacitancia X_C :

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Esta reactancia se mide en ohmios y representa la oposición que ofrece la capacidad a la circulación de la corriente alterna.

- La intensidad de corriente alterna está desfasada en adelanto 90° (un cuarto de período) respecto a la tensión aplicada.
- La potencia consumida por el condensador se utiliza para la carga del mismo, se llama potencia reactiva Q_C y se mide en voltiamperios reactivos (Var).

$$Q_C = X_C I^2 = V_C I$$

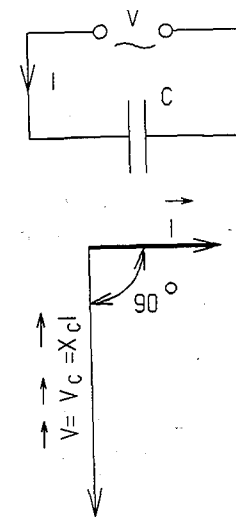


Fig. A.6

DEMOSTRACIÓN

En el circuito de corriente alterna senoidal, el condensador se carga desde cero a su valor máximo $Q_{\text{máx}}$ en un cuarto de período, por lo que la intensidad media será:

$$I_m = \frac{Q_{\text{máx}}}{T} = \frac{4Q_{\text{máx}}}{T} = 4fQ_{\text{máx}}$$

La capacidad del condensador es la relación entre la carga y la tensión:

$$C = \frac{Q_{\text{máx}}}{V_{\text{máx}}}$$

La intensidad media de carga $I_m = 4fCV_{\text{máx}}$

Por la relación entre valores medios y máximos en funciones senoidales:

$$I_{\text{máx}} = \frac{\pi}{2} I_m = 2\pi fCV_{\text{máx}}$$

La intensidad eficaz $I = 2\pi fCV = \frac{V}{\frac{1}{2\pi fC}} = \frac{V}{X_C}$

A.6. CIRCUITO SERIE DE CORRIENTE ALTERNA

Al conectar un circuito con varias resistencias, reactancias y capacidades en serie a una tensión alterna senoidal de valor eficaz V y frecuencia f :

- Por el circuito pasa una corriente alterna senoidal de frecuencia f e intensidad eficaz:

$$I = \frac{V}{\sqrt{R_t^2 + (X_{Lt} - X_{Ct})^2}}$$

R_t : Suma de las resistencias óhmicas.

X_{Lt} : Suma de reactancias de autoinducción.

X_{Ct} : Suma de reactancias de capacidad.

- La impedancia del circuito es el valor $Z_t = \sqrt{R_t^2 + (X_{Lt} - X_{Ct})^2}$
- La intensidad de corriente está desfasada un ángulo φ respecto a la tensión.

$$\varphi = \text{áng} \operatorname{tg} \frac{X_{Lt} - X_{Ct}}{R_t}$$

- La potencia que consume el circuito se divide en:
 - Potencia activa $P = R_t I^2 = VI \cos \varphi$
 - Potencia reactiva $Q = (X_{Lt} - X_{Ct}) I^2 = VI \sin \varphi$
 - Potencia aparente $S = Z_t I^2 = VI$

La relación entre las tres potencias $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

- La intensidad de corriente puede considerarse analíticamente formada por dos componentes perpendiculares entre sí (fig. A.7):
 - Intensidad activa I_a en fase con la tensión
 - Intensidad reactiva I_r desfasada 90° respecto a la tensión.

$$I_a = I \cos \varphi$$

$$I_r = I \sin \varphi$$

La intensidad es la suma vectorial de las dos componentes:

$$\vec{I} = \vec{I}_a + \vec{I}_r; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

A.7. CONSTRUCCIONES GRÁFICAS

Considerando un circuito con resistencia, autoinducción y capacidad en serie (fig. A.8), se pueden realizar las gráficas siguientes:

- Triángulo de tensiones: La representación vectorial de las tensiones (fig. A.9) forma el triángulo de tensiones.

$$\vec{V} = \vec{V}_R + \vec{V}_L + \vec{V}_C = \vec{V}_R + \vec{V}_X$$

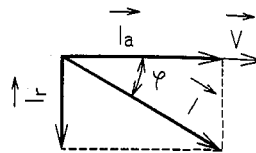


Fig. A.7

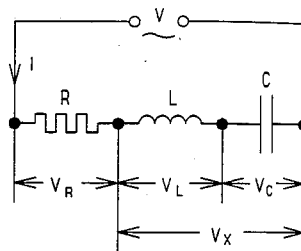


Fig. A.8

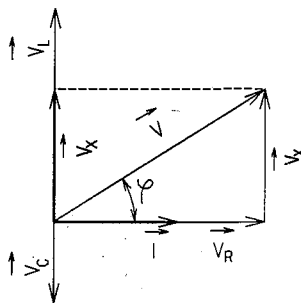


Fig. A.9

Tensión activa $V_R = RI = V \cos \varphi$

Tensión reactiva $V_X = (X_L - X_C)I = V \sin \varphi$

Tensión aplicada al circuito $V = ZI = \sqrt{V_R^2 + V_X^2}$

- Triángulo de resistencias: Dividiendo los tres lados del triángulo de tensiones por el valor de la intensidad se obtiene (fig. A.10), el triángulo de resistencias.

Resistencia óhmica $R = Z \cos \varphi$

Reactancia total $X = X_L - X_C = Z \sin \varphi$

Impedancia del circuito $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

- Triángulo de potencias: Multiplicando los tres lados del triángulo de tensiones por el valor de la intensidad se obtiene el triángulo de potencias (fig. A.11).

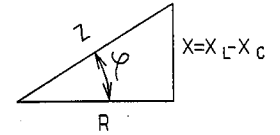


Fig. A.10

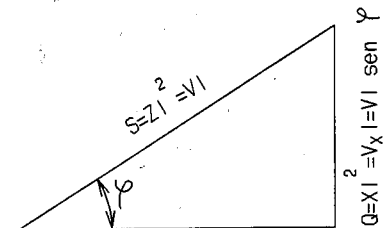


Fig. A.11

A.8. PRINCIPIO DE SEPARACIÓN DE POTENCIAS

En una red de corriente alterna de frecuencia constante se conservan por separado las potencias activas y reactivas (teorema de Boucherot).

- La potencia activa total de un conjunto de receptores conectados en la red es igual a la suma aritmética de sus potencias activas.

$$P = P_1 + P_2 + \dots$$

- La potencia reactiva total de un conjunto de receptores conectados a la red es igual a la suma algebraica de sus potencias reactivas.

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots$$

La potencia reactiva de capacidad tiene distinto signo que la reactiva de autoinducción.

- La potencia aparente total del conjunto de receptores:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

A.9. CIRCUITO PARALELO DE CORRIENTE ALTERNA

Al conectar varios receptores en paralelo a una tensión alterna senoidal de valor eficaz V y frecuencia f (fig. A.12):

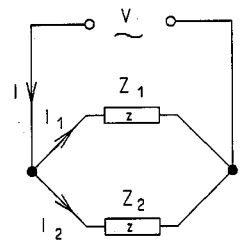


Fig. A.12

- Por los receptores circula corriente alterna senoidal, siendo el valor de la intensidad total I , según la primera ley de Kirchhoff¹, igual a la suma vectorial de las intensidades eficaces que circulan por cada receptor (fig. A.13).

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

La intensidad activa total I_a es igual a la suma de las intensidades activas que circulan por cada receptor.

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2$$

La intensidad reactiva total I_r es igual a la suma de las intensidades reactivas que circulan por cada receptor.

$$I_r = I_{r1} + I_{r2} = I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2$$

- La intensidad de corriente está desfasada un ángulo φ respecto a la tensión aplicada.

$$\varphi = \text{áng} \text{tg} \frac{I_r}{I_a}$$

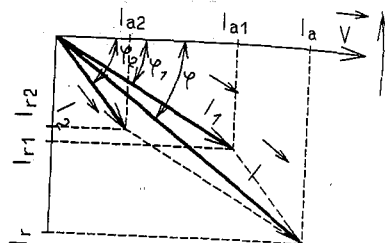


Fig. A.13

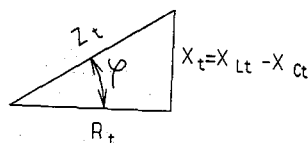


Fig. A.14

- Impedancia total del circuito (fig. A.14): $Z_t = \frac{V}{I}$

Resistencia total del circuito $R_t = Z_t \cos \varphi$

Reactancia total del circuito: $X_t = X_{Lt} - X_{Ct} = Z_t \sin \varphi$

- La potencia consumida por el circuito se divide en:

- Potencia activa $P = VI \cos \varphi = P_1 + P_2 = VI_1 \cos \varphi_1 + VI_2 \cos \varphi_2$

- Potencia reactiva $Q = VI \sin \varphi = Q_1 + Q_2 = VI_1 \sin \varphi_1 + VI_2 \sin \varphi_2$

- Potencia aparente $S = VI = \sqrt{P^2 + Q^2}$

A.10. RESONANCIA

■ Resonancia en un circuito serie de corriente alterna

Un circuito de resistencia R , autoinducción L y capacidad C en serie, conectado a una tensión alterna senoidal de valor eficaz V y frecuencia f , está en resonancia (fig. A.15), cuando la intensidad de corriente alterna que lo recorre está en fase con la tensión aplicada. Esto ocurre cuando el valor de la reactancia de

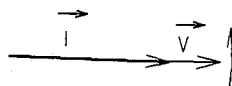


Fig. A.15

¹Las leyes de Kirchhoff pueden aplicarse en corriente alterna representando los valores de las tensiones, fuerzas electromotrices e intensidades en forma vectorial.

autoinducción es igual al valor de la reactancia de capacidad $X_L = X_C$.

La intensidad tomará un valor muy elevado al estar limitada solamente por la resistencia óhmica del circuito.

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + 0}} = \frac{V}{R}$$

Si la resistencia es muy pequeña (prácticamente nula) el circuito actúa, cuando está en resonancia, como un cortocircuito.

La frecuencia a la que se verifica la resonancia es $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

DEMOSTRACIÓN

$$\text{Si } X_L = X_C, \text{ se verifica: } 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}; \quad f^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}; \quad f = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

■ Resonancia en un circuito paralelo de corriente alterna

Una bobina de resistencia R y coeficiente de autoinducción L , en paralelo con un condensador de capacidad C , conectados a una tensión alterna senoidal de valor eficaz V y frecuencia f , están en resonancia cuando la intensidad total absorbida I está en fase con la tensión aplicada (fig. A.16).

Cuando el circuito está en resonancia la intensidad total absorbida es muy pequeña; el circuito tiene una impedancia muy grande.

Si la resistencia de la bobina es muy pequeña (prácticamente nula), la resonancia tiene lugar cuando la reactancia de autoinducción es igual a la reactancia de capacidad y la frecuencia a la cual se verifica la resonancia se calcula igual que en el circuito serie. La intensidad total absorbida es nula y el circuito actúa como si estuviese abierto (impedancia infinita).

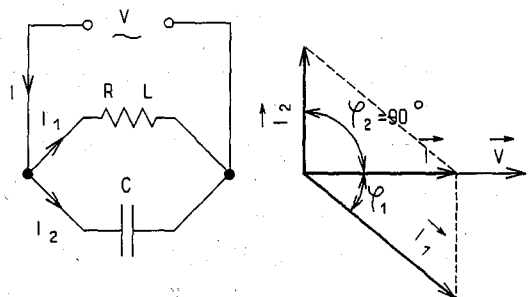


Fig. A.16

A.11. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

Es un conjunto de tres corrientes alternas de iguales características y desfasadas entre sí un tercio de período o 120° ($2\pi/3$ radianes).

A.12. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE MAGNITUDES TRIFÁSICAS SENOIDALES

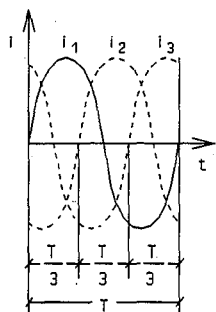


Fig. A.17

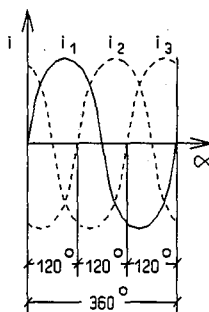


Fig. A.18

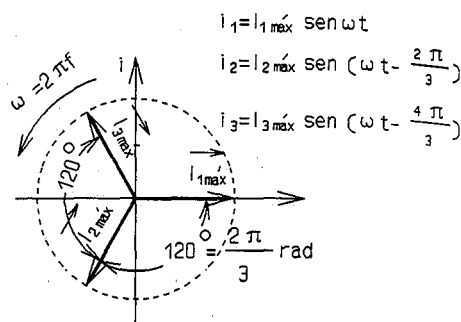


Fig. A.19

1) **Representación cartesiana:** Se representa mediante tres senoides desfasadas 120° o un tercio de período.

- En función del tiempo (fig. A.17): se toma el valor de la magnitud en ordenadas y el tiempo en abscisas.
- En función del ángulo: se toma el valor de la magnitud en ordenadas y el del ángulo en abscisas, teniendo en cuenta que al tiempo de un período le corresponden 360° o 2π radianes (fig. A.18).

2) **Representación vectorial:** Se representan las magnitudes mediante tres vectores giratorios iguales (fasores), de módulo el valor máximo de la magnitud y que giran con movimiento uniforme (fig. A.19), realizando una rotación en el tiempo de un período con velocidad angular:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi \text{ rad}}{T \text{ s}}$$

En la práctica se representan los vectores con módulo del valor eficaz.

La suma de las tres magnitudes del sistema trifásico en cualquier instante es nula:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

A.13. CONEXIÓN EN ESTRELLA

Tanto un receptor como un generador trifásico pueden conectarse en estrella en un punto común, llamado neutro (fig. A.20). Los tres extremos libres de las fases se conectan a tres conductores llamados activos o de fase y el punto común puede conectarse a un conductor llamado neutro.

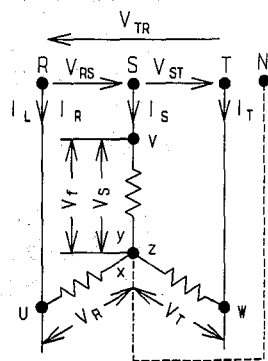


Fig. A.20

Se llama tensión de línea V_L a la tensión existente entre los conductores o hilos de fase de una línea trifásica.

Se llama tensión de fase V_f a la tensión existente entre extremos de una fase.

Se llama intensidad de línea I_L a la intensidad que circula por cada conductor o hilo de fase de una línea trifásica.

Se llama intensidad de fase I_f a la intensidad que circula por una fase.

■ Relación de tensiones y de intensidades

La conexión se llama equilibrada cuando son iguales las tres fases. En una conexión estrella equilibrada, las relaciones entre valores de línea y de fase son fijas.

La intensidad de línea es igual a la de fase.

$$I_L = I_f; \quad I_R = I_S = I_T = I_L = I_f$$

La tensión de línea es $\sqrt{3}$ veces la de fase (fig. A.21).

$$V_L = \sqrt{3} V_f; \quad V_{RS} = V_{ST} = V_{TR} = V_L; \quad V_R = V_S = V_T = V_f$$

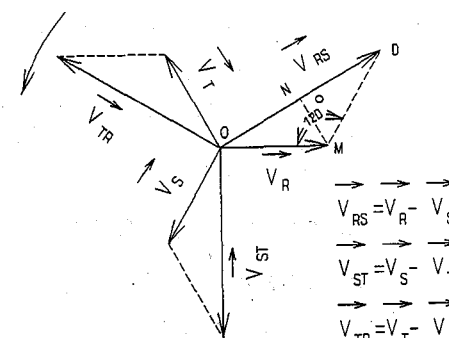


Fig. A.21

DEMOSTRACIÓN

En el triángulo ONM de la figura A.21, se deduce:

$$\frac{V_L}{2} = V_f \sin 60^\circ = V_f \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad V_L = \sqrt{3} V_f$$

A.14. CONEXIÓN EN TRIÁNGULO

Tanto un receptor como un generador trifásico pueden conectarse en triángulo, uniendo el final de una fase con el principio de la siguiente (fig. A.22), y el final de la tercera con el principio de la primera para cerrar el triángulo.

Las conexiones entre las fases se conectan a tres conductores llamados activos o de fase.

■ Relación de tensiones y de intensidades

En la conexión triángulo equilibrada las relaciones entre valores de línea y de fase son fijas.

La tensión de línea es igual a la de fase. $V_L = V_f; \quad V_{RS} = V_{ST} = V_{TR} = V_L = V_f$

La intensidad de línea es $\sqrt{3}$ veces la de fase (fig. A.23).

$$I_L = \sqrt{3} I_f; \quad I_R = I_S = I_T = I_L; \quad I_{RS} = I_{ST} = I_{TR} = I_f$$

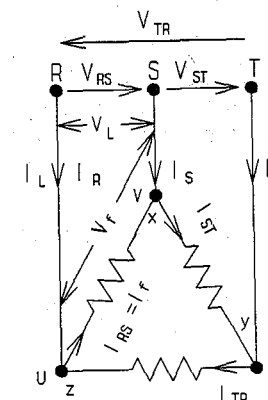


Fig. A.22

DEMOSTRACIÓN

Del triángulo ONM de la figura A. 23, se deduce:

$$\frac{I_L}{2} = I_f \sin 60^\circ = I_f \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad I_L = \sqrt{3} I_f$$

A.15. POTENCIA EN CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

La potencia de un sistema trifásico es la suma de potencias de las tres fases. Si el sistema es equilibrado:

- Potencia activa: $P = 3 V_f I_f \cos \varphi = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi$
- Potencia reactiva: $Q = 3 V_f I_f \sin \varphi = \sqrt{3} V_L I_L \sin \varphi$
- Potencia aparente: $S = 3 V_f I_f = \sqrt{3} V_L I_L$

Siendo φ el ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad de fase.

La relación entre las tres potencias $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

En el cálculo de las potencias se suelen utilizar valores compuestos o de línea.

La potencia activa del sistema trifásico equilibrado es tres veces la potencia de una fase.

DEMOSTRACIÓN

En estrella $V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}}; I_f = I_L$. La potencia activa $P = 3 \frac{V_L}{\sqrt{3}} I_L \cos \varphi = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi$

En triángulo $V_f = V_L; I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$. La potencia activa $P = 3 V_L \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi$

De forma análoga se pueden deducir las fórmulas de la potencia reactiva y de la potencia aparente.

A.16. CÁLCULO DE UN CIRCUITO TRIFÁSICO EQUILIBRADO

El circuito trifásico equilibrado en tensiones e intensidades se calcula a partir de una sola fase, como un circuito monofásico:

$$I_f \text{ (intensidad de fase)} = \frac{V_f \text{ (tensión de fase)}}{Z_f \text{ (impedancia de fase)}}$$

De los valores de tensiones e intensidades de fase se obtienen los valores de línea, según el tipo de conexión del circuito.

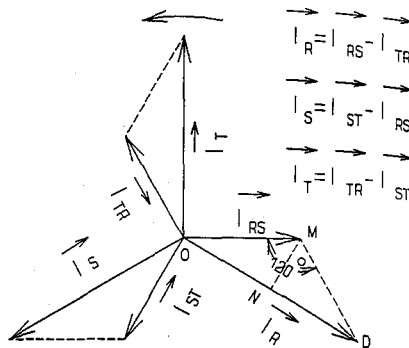


Fig. A.23

A.17. APLICACIÓN DE LOS NÚMEROS COMPLEJOS AL CÁLCULO DE CIRCUITOS EN CORRIENTE ALTERNA SENOIDAL

En el triángulo de resistencias de un circuito de corriente alterna senoidal podemos representar la impedancia Z por el complejo² $Z = R + Xj$ (fig. A.24).

En cualquier caso, representando la tensión V y la intensidad I por números complejos, la impedancia del circuito está dada, según la ley de Ohm, por el cociente:

$$Z = \frac{V}{I}$$

Se pueden aplicar en los circuitos de corriente alterna senoidal las mismas leyes que en los circuitos de corriente continua, con la particularidad de emplear números complejos para representar magnitudes en lugar de números reales.

La impedancia total o equivalente Z de la conexión de impedancias de un circuito, en forma de números complejos (fig. A.25), se calcula de la siguiente manera:

a) Impedancias en serie:

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3$$

b) Impedancias en paralelo:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3}}$$

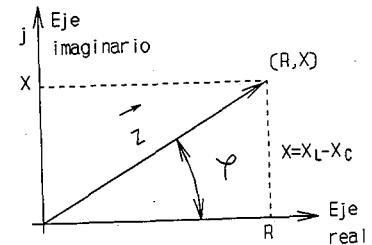


Fig. A.24

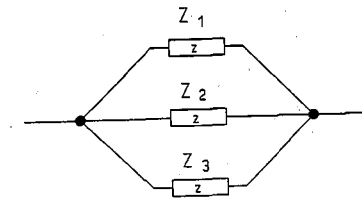
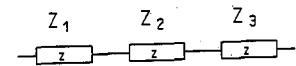


Fig. A.25

²La norma UNE 20-004, en concordancia con la CEI, indica como notación para la parte imaginaria jX . En el libro se mantiene la notación, utilizada habitualmente en matemáticas para representar números complejos, indicando el número y , a continuación, la unidad imaginaria.

PROBLEMAS RESUELTOS

A.1. A una red de corriente alterna senoidal de 220 V de tensión y frecuencia 50 Hz se conecta una estufa eléctrica de resistencia de 25 Ω . Calcular:

- La intensidad eficaz que circula por la estufa.
- Valor máximo de la intensidad.
- Potencia que consume.

Nota: Cuando no se especifica expresamente, los valores de las magnitudes alternas son los eficaces.

$$a) \text{ La intensidad } I = \frac{V_R}{R} = \frac{220}{25} = 8,8 \text{ A}$$

$$b) \text{ El valor máximo de la intensidad } I_{\max} = \sqrt{2} I = \sqrt{2} \cdot 8,8 = 12,4 \text{ A}$$

$$c) \text{ La potencia } P = RI^2 = V_R I = 25 \cdot 8,8^2 = 220 \cdot 8,8 = 1936 \text{ W}$$

A.2. Una bobina de resistencia despreciable y coeficiente de autoinducción $L=0,02$ H y se conecta a una tensión alterna senoidal de 150 V, 50 Hz. Calcular:

- Reactancia de la bobina e intensidad de corriente que circula por ella.
- Potencia reactiva que consume.
- Potencia reactiva si la frecuencia de la línea disminuye a 40 Hz.

$$a) \text{ La reactancia de la bobina } X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,02 = 6,28 \Omega$$

$$\text{La intensidad que circula por la bobina } I = \frac{V_L}{X_L} = \frac{150}{6,28} = 23,89 \text{ A}$$

La potencia reactiva consumida:

$$Q_L = X_L I^2 = V_L I = 6,28 \cdot 23,89^2 = 150 \cdot 23,89 = 3584 \text{ VAR}$$

$$b) \text{ La reactancia de la bobina } X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 0,02 = 5 \Omega$$

$$\text{La intensidad que circula por la bobina } I = \frac{V_L}{X_L} = \frac{150}{5} = 30 \text{ A}$$

La potencia reactiva consumida:

$$Q_L = X_L I^2 = V_L I = 150 \cdot 30 = 4500 \text{ VAR}$$

A.3. A una línea de corriente alterna senoidal de tensión 220 V, se conecta un condensador de 20 μF de capacidad. Calcular:

- La reactancia del condensador, la intensidad y la potencia reactiva, si la frecuencia de la red es de 50 Hz.
- Intensidad si la frecuencia de la red aumenta a 60 Hz.

$$a) \text{ La reactancia del condensador } X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 159,24 \Omega$$

$$\text{La intensidad eficaz } I = \frac{V_C}{X_C} = \frac{220}{159,24} = 1,38 \text{ A}$$

$$\text{La potencia reactiva } Q_C = X_C I^2 = V_C I = 159,24 \cdot 1,38^2 = 220 \cdot 1,38 = 303 \text{ VAR}$$

$$b) \text{ La reactancia del condensador } X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 60 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 132,7 \Omega$$

$$\text{La intensidad eficaz } I = \frac{V_C}{X_C} = \frac{220}{132,7} = 1,66 \text{ A}$$

A.4. Una bobina de resistencia $R=10 \Omega$ y coeficiente de autoinducción $L=0,01$ H se conecta a una tensión alterna senoidal de 220 V, 50 Hz. Calcular:

- Reactancia.
- Impedancia del circuito.
- Intensidad de corriente.
- Ángulo de desfase entre la tensión aplicada al circuito y la intensidad.
- Potencia activa, reactiva y aparente consumida.

$$a) \text{ La reactancia total } X = X_L - X_C$$

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,01 = 3,14 \Omega$$

$$X_C = 0 \Omega$$

$$X = 3,14 - 0 = 3,14 \Omega$$

$$b) \text{ La impedancia del circuito } Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{10^2 + 3,14^2} = 10,48 \Omega$$

$$c) \text{ La intensidad de corriente } I = \frac{V}{Z} = \frac{220}{10,48} = 21 \text{ A}$$

$$d) \text{ La tangente del ángulo de desfase } \tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{3,14}{10} = 0,314$$

El ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad $\varphi = 17,43^\circ = 17^\circ 26'$; con retraso de la intensidad respecto a la tensión.

$$e) \text{ La potencia activa:}$$

$$P = RI^2 = VI \cos \varphi = 10 \cdot 21^2 = 220 \cdot 21 \cdot \cos 17,43^\circ = 4410 \text{ W}$$

La potencia reactiva:

$$Q = XI^2 = VI \sin \varphi = 3,14 \cdot 21^2 = 220 \cdot 21 \cdot \sin 17,43^\circ = 1384 \text{ VAR}$$

$$\text{La potencia aparente } S = ZI^2 = VI = 10,48 \cdot 21^2 = 220 \cdot 21 = 4620 \text{ VA}$$

A.5. Una resistencia de 100 Ω se conecta en serie con un condensador de 60 μF y con dos bobinas, una bobina de resistencia despreciable y coeficiente de autoinducción $L=0,2$ H y la otra de resistencia 200 Ω y coeficiente de autoinducción 0,04 H. La tensión aplicada es alterna senoidal de 400 V, 50 Hz. Calcular:

- Impedancia total.
- Intensidad de corriente.
- Ángulo de desfase entre tensión e intensidad.
- Potencias activa, reactiva y aparente totales.

$$a) \text{ La resistencia total } R_t = R_1 + R_2 = 100 + 200 = 300 \Omega$$

La reactancia de autoinducción:

$$X_{L_t} = X_{L_1} + X_{L_2} = 2\pi fL_1 + 2\pi fL_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,2 + 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,04 = 75,36 \Omega$$

$$\text{La reactancia total de capacidad } X_{C_t} = X_{C_1}$$

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi f C_1} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 60} = 53,1 \Omega$$

$$X_{C1} = 53,1 \Omega$$

La impedancia del circuito:

$$Z_t = \sqrt{R_t^2 + (X_{L_t} - X_{C_t})^2} = \sqrt{300^2 + (75,36 - 53,1)^2}$$

$$Z_t = \sqrt{300^2 + 22,26^2} = \sqrt{90495,51} = 300,82 \Omega$$

b) La intensidad de corriente $I = \frac{V}{Z_t} = \frac{400}{300,82} = 1,33 \text{ A}$

c) La tangente del ángulo de desfase $\tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{22,26}{300} = 0,0742$

El ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad $\varphi = 4,24^\circ = 4^\circ 14'$; con retraso de la intensidad respecto a la tensión. El efecto de la autoinducción predomina sobre el de capacidad.

d) La potencia activa:

$$P = RI^2 = VI \cos \varphi = 300 \cdot 1,33^2 = 400 \cdot 1,33 \cdot \cos 4,24^\circ = 531 \text{ W}$$

La potencia reactiva:

$$Q = XI^2 = VI \sin \varphi = 22,26^2 = 400 \cdot 1,33 \cdot \sin 4,24^\circ = 39 \text{ VAr}$$

La potencia aparente:

$$S = ZI^2 = VI = 300,82 \cdot 1,33^2 = 400 \cdot 1,33 = 532 \text{ VA}$$

A.6. Una bobina de resistencia $0,5 \Omega$ y coeficiente de autoinducción $0,1 \text{ H}$ se conecta en serie con un condensador de $50 \mu\text{F}$. Calcular:

a) Frecuencia de resonancia.

b) Si el circuito está en resonancia a la tensión 100 V , la intensidad de corriente.

a) La resonancia se produce cuando se verifica que $X_L = X_C$

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}; f^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}; f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{0,1 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}} = 71,2 \text{ Hz}$$

b) La intensidad en resonancia $I = \frac{V}{R} = \frac{200}{0,5} = 400 \text{ A}$

A.7. A una línea eléctrica de corriente alterna senoidal de 220 V , 50 Hz , se conectan los siguientes receptores:

- Una estufa de 2 kW , 220 V .
- Un motor que consume $0,8 \text{ kW}$ con factor de potencia (coseno del ángulo de desfase entre la intensidad de corriente y la tensión) de $0,8$ inductivo.
- Una instalación de alumbrado que consume 600 W , con factor de potencia $0,86$, inductivo.

Calcular:

- Potencia activa, reactiva y aparente total.
- Intensidad total.
- Factor de potencia total.

a) La potencia activa total $P = P_1 + P_2 + P_3 = 2 + 0,8 + 0,6 = 3,4 \text{ kW}$

La potencia reactiva total $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

Por ser la estufa una resistencia óhmica $Q_1 = 0$

Del triángulo de potencias del motor (fig. A.26):

$$Q_2 = P_2 \tan \varphi_2$$

$$\cos \varphi_2 = 0,8; \varphi_2 = 36,87^\circ$$

$$Q_2 = 0,8 \cdot \tan 36,87^\circ = 0,8 \cdot 0,75 = 0,6 \text{ kVAr}$$

De forma análoga que para el motor, la potencia reactiva de la instalación de alumbrado:

$$\cos \varphi_3 = 0,86; \varphi_3 = 30,68^\circ$$

$$Q_3 = 0,6 \cdot \tan 30,68^\circ = 0,6 \cdot 0,593 = 0,356 \text{ kVAr}$$

$$Q = 0 + 0,6 + 0,356 = 0,956 \text{ kVAr}$$

La potencia aparente total $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3,4^2 + 0,956^2} = 3,532 \text{ kVA}$

b) La intensidad total se calcula a partir de la potencia aparente total:

$$S = VI; I = \frac{S}{V} = \frac{3532}{220} = 16 \text{ A}$$

c) El factor de potencia total se calcula a partir de triángulo de potencias totales (fig. A.27).

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{3400}{3532} = 0,96$$

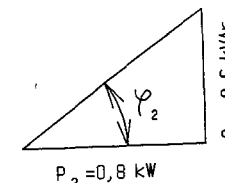


Fig. A.26

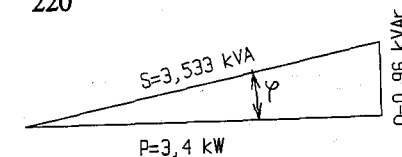


Fig. A.27

A.8. Una bobina de resistencia 100Ω y coeficiente de autoinducción $0,05 \text{ H}$ se conecta en paralelo con otra bobina de resistencia despreciable y coeficiente de autoinducción $0,2 \text{ H}$ a una tensión alterna senoidal de 220 V , 50 Hz (fig. A.28). Calcular:

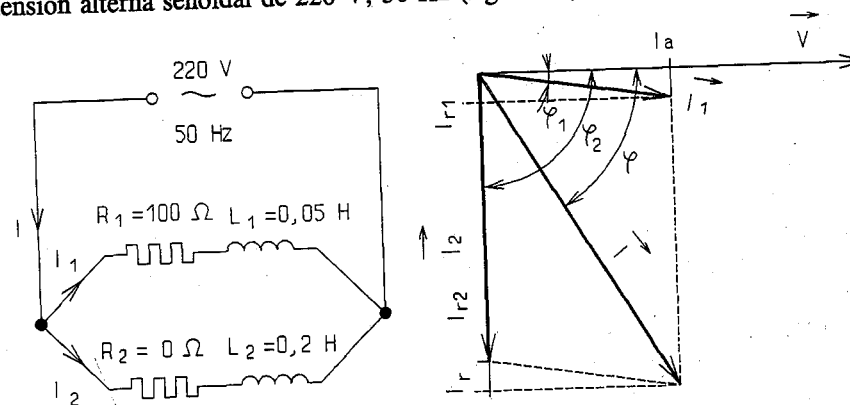


Fig. A.28

- Intensidad que circula por cada bobina.
- Intensidad total que consumen las dos bobinas.
- Ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad total.

- a) La intensidad por la primera bobina $I_1 = \frac{V}{Z_1}$

$$X_{L1} = 2\pi fL_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,05 = 15,7 \Omega$$

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2} = \sqrt{100^2 + 15,7^2} = 101,23 \Omega$$

$$I_1 = \frac{220}{101,23} = 2,17 \text{ A}$$

- La intensidad que circula por la segunda bobina $I_2 = \frac{V}{Z_2}$

$$X_{L2} = 2\pi fL_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,2 = 62,8 \Omega$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2} = \sqrt{0^2 + 62,8^2} = 62,8 \Omega$$

$$I_2 = \frac{220}{62,8} = 3,5 \text{ A}$$

Las componentes de la intensidad en la primera bobina:

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1; \quad I_{r1} = I_1 \sin \varphi$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{100}{101,23} = 0,988; \quad \sin \varphi_1 = \frac{X_{L1}}{Z_1} = \frac{15,7}{101,23} = 0,155$$

$$I_{a1} = 2,17 \cdot 0,988 = 2,14 \text{ A}; \quad I_{r1} = 2,17 \cdot 0,155 = 0,34 \text{ A}$$

En la segunda bobina, con solo reactancia, la intensidad está desfasada con ángulo de 90° en retraso respecto a la tensión. Las componentes de la intensidad en la segunda bobina:

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2 = 0 \text{ A}; \quad I_{r2} = I_2 \sin \varphi_2 = 3,5 \text{ A}$$

- b) La intensidad total $I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 2,14 + 0 = 2,14 \text{ A}$$

$$I_r = I_{r1} + I_{r2} = 0,34 + 3,5 = 3,84 \text{ A}$$

$$I = \sqrt{2,14^2 + 3,84^2} = 4,4 \text{ A}$$

- c) El ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad total:

$$\tan \varphi = \frac{I_r}{I_a} = \frac{3,84}{2,14} = 1,794; \quad \varphi = 60^\circ 52'$$

A.9. Un receptor trifásico está formado por tres bobinas iguales, de resistencia 10Ω y coeficiente de autoinducción $0,02 \text{ H}$ cada una, conectadas en estrella a una línea trifásica de 380 V , 50 Hz (fig. A.29). Calcular:

- a) Intensidad de línea.
b) Ángulo de desfase entre tensión e intensidad de fase.
c) Potencia activa, reactiva y aparente consumida.

a) La tensión de fase $V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$

La impedancia de fase $Z_f = \sqrt{R_f^2 + (X_{Lf} - X_{Cf})^2}$

$$X_{Lf} = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,02 = 6,28 \Omega$$

$$Z_f = \sqrt{10^2 + 6,28^2} = 11,81 \Omega$$

La intensidad de fase:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_f} = \frac{220}{11,81} = 18,63 \text{ A}$$

La intensidad de línea en la conexión estrella es igual a la de fase. $I_L = I_f = 18,63 \text{ A}$

- c) La tangente del ángulo de desfase:

$$\tan \varphi = \frac{X_f}{R_f} = \frac{6,28}{10} = 0,628$$

El ángulo de desfase $\varphi = 32^\circ 8'$

- d) La potencia activa:

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 18,63 \cdot 0,847 = 10\,386 \text{ W}$$

La potencia reactiva:

$$Q = \sqrt{3} V_L I_L \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 18,63 \cdot 0,532 = 6\,523 \text{ VAR}$$

La potencia aparente $S = \sqrt{3} V_L I_L = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 18,63 = 12\,262 \text{ VA}$

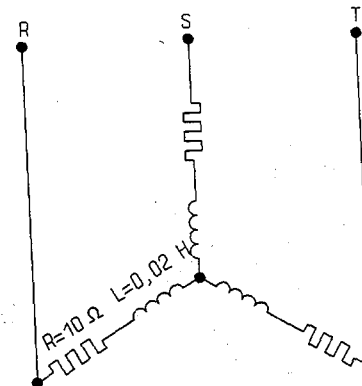


Fig. A.29

A.10. Un receptor trifásico conectado en triángulo está formado por tres bobinas iguales de resistencia 20Ω y coeficiente de autoinducción $0,08 \text{ H}$ (fig. A.30). La línea de alimentación es trifásica de 380 V , 50 Hz . Calcular:

- a) Intensidad de fase.
b) Intensidad de línea.
c) Ángulo de desfase entre tensión e intensidad de fase.
d) Potencia activa, reactiva y aparente.
a) En la conexión triángulo la tensión de fase es igual a la de línea.

$$V_L = V_f = 380 \text{ V}$$

La impedancia de fase:

$$Z_f = \sqrt{R_f^2 + (X_{Lf} - X_{Cf})^2}$$

$$X_{Lf} = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,08 = 25,12 \Omega$$

$$Z_f = \sqrt{20^2 + 25,12^2} = 32,11 \Omega$$

b) La intensidad de fase $I_f = \frac{V_f}{Z_f} = \frac{380}{32,11} = 11,83 \text{ A}$

c) La intensidad de línea $I_L = \sqrt{3} I_f = \sqrt{3} \cdot 11,83 = 20,5 \text{ A}$

d) El factor de potencia $\cos \varphi = \frac{R_f}{Z_f} = \frac{20}{32,11} = 0,62286$

El ángulo de desfase $\varphi = 51,48^\circ$

e) La potencia activa $P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 20,5 \cdot 0,62286 = 8\,404 \text{ W}$

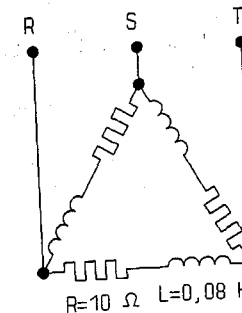


Fig. A.30

La potencia reactiva $Q = \sqrt{3} V_L I_L \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 20,5 \cdot 0,7824 = 10\,557 \text{ VAR}$

La potencia aparente $S = \sqrt{3} V_L I_L = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 20,5 = 13\,493 \text{ VA}$

A.11. En el circuito de la figura 31, calcular:

- Impedancia total.
- Intensidad total.
- Intensidad que circula por cada una de las dos ramas en paralelo.

$$a) \begin{aligned} Z_1 &= 10 + 20j = 22,36 \angle 63,43^\circ; \\ Z_2 &= 20 + 0j = 20 \angle 0^\circ \end{aligned}$$

La impedancia resultante entre B y C:

$$Z_{BC} = \frac{1}{\frac{1}{10 + 20j} + \frac{1}{20 + 0j}} = \frac{(20 + 0j)(10 + 20j)}{(20 + 0j) + (10 + 20j)} = \frac{200 + 400j}{30 + 20j} = \frac{(200 + 400j)(30 - 20j)}{900 + 400} = \frac{14\,000 + 8\,000j}{1\,300} = 10,77 + 6,15j = 12,4 \angle 29,73^\circ \Omega$$

Impedancia total $Z = 20 + 10,77 + 6,15j = 30,77 + 6,15j = 31,38 \angle 11,3^\circ \Omega$

$$b) \text{ Intensidad total } I = \frac{V}{Z} = \frac{100 \angle 0^\circ}{31,38 \angle 11,3^\circ} = 3,19 \angle -11,3^\circ = (3,13 - 0,62j) \text{ A}$$

c) El factor de potencia $\cos \varphi = \cos 11,3^\circ = 0,981$

Tensión entre B y C $V_{BC} = Z_{BC} \cdot I = 12,4 \angle 29,73^\circ \cdot 3,19 \angle -11,3^\circ = 39,56 \angle 18,43^\circ \text{ V}$

$$I_1 = \frac{V_{BC}}{Z_1} = \frac{39,56 \angle 18,43^\circ}{22,36 \angle 63,43^\circ} = 1,77 \angle -45^\circ = (1,25 - 1,25j) \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{V_{BC}}{Z_2} = \frac{39,56 \angle 18,43^\circ}{20 \angle 0^\circ} = 1,98 \angle 18,43^\circ = (1,88 + 0,63j) \text{ A}$$

Se cumple la primera ley de Kirchhoff:

$$I = I_1 + I_2 = (1,25 - 1,25j) + (1,88 + 0,63j) = (3,13 - 0,62j) \text{ A}$$

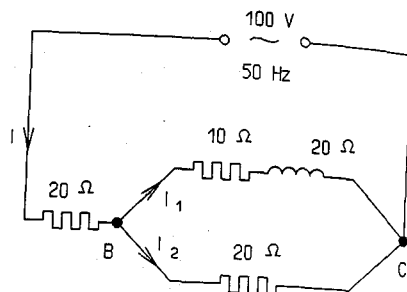


Fig. A.31

PROBLEMAS PROPUESTOS

A.12. Un condensador de $30 \mu\text{F}$ de capacidad se conecta en serie con una resistencia de 20Ω a una tensión alterna senoidal de 220 V , 50 Hz . Calcular:

- Impedancia del circuito.
- Intensidad de corriente que circula por él.
- Potencia reactiva del condensador.
- Potencia aparente del circuito.

Solución: a) 108Ω ; b) $2,04 \text{ A}$; c) 442 VAR ; d) 449 VA

A.13. Una resistencia de 30Ω se conecta en serie con un condensador de $60 \mu\text{F}$ y con una bobina de resistencia 10Ω y coeficiente de autoinducción $0,2 \text{ H}$, a una tensión alterna senoidal de 220 V , 50 Hz . Calcular:

- Impedancia total.
- Intensidad de corriente.
- Coseno del ángulo de desfase entre tensión e intensidad (factor de potencia).
- Potencias activa, reactiva y aparente.

Solución: a) $41,2 \Omega$; b) $5,34 \text{ A}$; c) $0,971$ (circuito inductivo); d) $P=11441 \text{ W}$, $Q=280 \text{ VAR}$, $S=1175 \text{ VA}$.

A.14. En un circuito de corriente alterna de 60 Hz de frecuencia están conectados una bobina con un amperímetro que indica 4 A , un vatímetro que indica 450 W , y un voltímetro que indica 150 V . Calcular:

- La potencia aparente total.
- El factor de potencia.
- La impedancia.
- Reactancia.
- Coeficiente de autoinducción de la bobina.

Solución: a) 600 VA ; b) $0,75$; c) $37,5 \Omega$; d) $24,8 \Omega$; e) $0,066 \text{ H}$.

A.15. Dos receptores están conectados a una línea de tensión alterna senoidal de 220 V , 50 Hz . Uno de los receptores consume 2 kW con factor de potencia unidad y el otro consume 1 kW con factor de potencia $0,8$ inductivo. Calcular:

- Intensidad que consume el primer receptor.
- Intensidad que consume el segundo receptor.
- Potencia activa total.
- Potencia reactiva total.
- Potencia aparente total.
- Intensidad de corriente total.
- Factor de potencia total.

Solución: a) $9,1 \text{ A}$; b) $5,68 \text{ A}$; c) 3 kW ; d) $0,75 \text{ kVAR}$; e) $3,092 \text{ kVA}$; f) $14,05 \text{ A}$; g) $0,97$ inductivo.

A.16. Una bobina de resistencia despreciable y coeficiente de autoinducción $L=0,2 \text{ H}$ está conectada en paralelo con un condensador de capacidad $C=20 \mu\text{F}$ a una tensión alterna senoidal de 150 V , 50 Hz . Calcular:

- La frecuencia de resonancia de este circuito.
- Intensidad de corriente que circula por la bobina.
- Intensidad de corriente que circula por el condensador.
- Intensidad total.
- Factor de potencia del circuito.

Solución: a) $79,58 \text{ Hz}$; b) $2,39 \text{ A}$; c) $0,94 \text{ A}$; d) $1,45 \text{ A}$; e) 1

A.17. La línea de alimentación a un bajo comercial es trifásica de 380 V, 50 Hz. Por cada conductor de la línea el comercio consume una corriente de intensidad 25 A con factor de potencia 0,88 inductivo. Calcular la potencia activa, reactiva y aparente que consume la instalación.

Solución: $P=14\,480\text{ W}$; $Q=7\,815\text{ VAR}$; $S=16\,454\text{ VA}$.

A.18. Un receptor trifásico tiene tres fases idénticas de impedancia $100\ \Omega$. Se conecta a una línea trifásica de tensión alterna senoidal 400 V, 50 Hz. Calcular:

- Intensidad de fase y de línea si la conexión del receptor es en triángulo.
- Tensión de fase e intensidad de línea si el receptor está conectado en estrella.

Solución: a) $I_f=4\text{ A}$, $I_L=6,93\text{ A}$; b) $V_f=231\text{ V}$, $I_L=2,31\text{ A}$.

A.19. En el circuito de la figura 32, calcular:

- Impedancia de cada rama.
- Impedancia total.
- Intensidad total.
- Factor de potencia total.
- Potencias activa, reactiva y aparente.

Solución: a) $Z_1=(20-20j)\ \Omega$; $Z_2=(10+20j)\ \Omega$;

b) $(20+6,67j)\ \Omega$; c) $(9-3j)\text{ A}$; b) 0,949;

e) $P=1\,800\text{ W}$, $Q=600\text{ VAR}$, $S=1\,897\text{ VA}$.

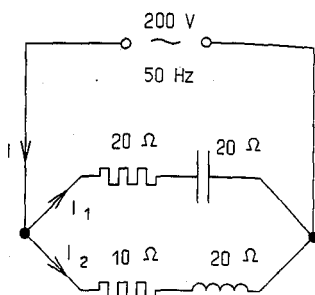


Fig. A.32

A.20. En el circuito de la figura 33, calcular:

- Impedancia total.
- Intensidad total.
- Tensión entre B y C.
- Intensidad en la resistencia de $20\ \Omega$.
- Potencia activa total.

Solución: a) $10,47 \angle 56,37^\circ\ \Omega$;

b) $38,2 \angle 56,37^\circ\text{ A}$; c) $229,2 \angle 16,16^\circ\text{ V}$;

d) $11,46 \angle 16,16^\circ\text{ A}$; e) $8\,464\text{ W}$.

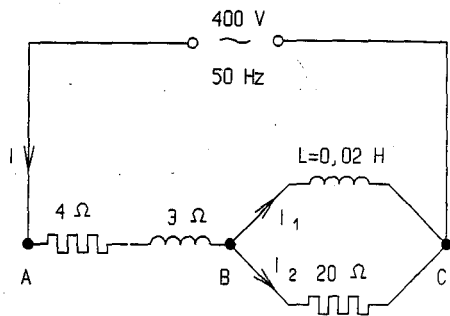


Fig. A.33

A.17. La línea de alimentación a un bajo comercial es trifásica de 380 V, 50 Hz. Por cada conductor de la línea el comercio consume una corriente de intensidad 25 A con factor de potencia 0,88 inductivo. Calcular la potencia activa, reactiva y aparente que consume la instalación.

Solución: $P=14\,480\text{ W}$; $Q=7\,815\text{ VAR}$; $S=16\,454\text{ VA}$.

A.18. Un receptor trifásico tiene tres fases idénticas de impedancia $100\ \Omega$. Se conecta a una línea trifásica de tensión alterna senoidal 400 V, 50 Hz. Calcular:

a) Intensidad de fase y de línea si la conexión del receptor es en triángulo.

b) Tensión de fase e intensidad de línea si el receptor está conectado en estrella.

Solución: a) $I_f=4\text{ A}$, $I_L=6,93\text{ A}$; b) $V_f=231\text{ V}$, $I_L=2,31\text{ A}$.

A.19. En el circuito de la figura 32, calcular:

a) Impedancia de cada rama.

b) Impedancia total.

c) Intensidad total.

d) Factor de potencia total.

e) Potencias activa, reactiva y aparente.

Solución: a) $Z_1=(20-20j)\ \Omega$; $Z_2=(10+20j)\ \Omega$;

b) $(20+6,67j)\ \Omega$; c) $(9-3j)\text{ A}$; b) 0,949;

e) $P=1\,800\text{ W}$, $Q=600\text{ VAR}$, $S=1\,897\text{ VA}$.

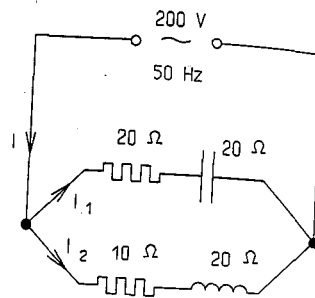


Fig. A.32

A.20. En el circuito de la figura 33, calcular:

a) Impedancia total.

b) Intensidad total.

c) Tensión entre B y C.

d) Intensidad en la resistencia de $20\ \Omega$.

e) Potencia activa total.

Solución: a) $10,47 \angle 56,37^\circ\ \Omega$;

b) $38,2 \angle 56,37^\circ\text{ A}$; c) $229,2 \angle 16,16^\circ\text{ V}$;

d) $11,46 \angle 16,16^\circ\text{ A}$; e) $8\,464\text{ W}$.

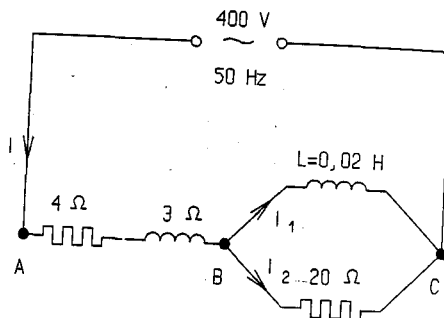


Fig. A.33

B

TRANSFORMADOR

B.1. TRANSFORMADOR

Es la máquina eléctrica estática capaz de transformar un sistema de corriente alterna en otro de corriente alterna, pero de distinta tensión e intensidad.

B.2. CONSTITUCIÓN Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

■ Constitución

Un transformador monofásico está básicamente constituido por:

- Un circuito magnético de chapas de hierro aisladas entre sí (para limitar las corrientes parásitas). La forma más utilizada en el circuito magnético es la acorazada (fig. B.1).
- Dos devanados aislados entre sí y de las chapas, dispuestos en forma concéntrica o alternada. El devanado conectado a la línea de alimentación se llama primario y el conectado al circuito de utilización recibe el nombre de secundario.
- Accesorios que completan el transformador (bornes, cuba, aceite de refrigeración, depósito de expansión, termostato, etc.).

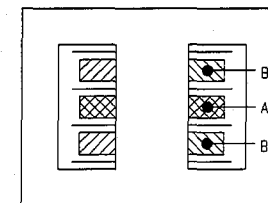
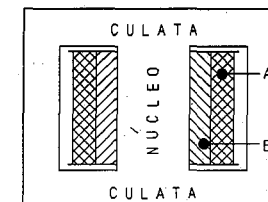


Fig. B.1

■ Principio de funcionamiento

El bobinado primario, alimentado por una corriente alterna, se comporta como un receptor y crea un flujo magnético alternativo de acuerdo con la frecuencia de la corriente, induciendo una fuerza electromotriz alterna en el devanado secundario.

El secundario se comporta como un generador, alimentando mediante una corriente alterna al circuito de utilización. Esta corriente secundaria se opone (fig. B.2), según la ley de Lenz, a la variación del flujo inductor, obligando a aumentar la corriente primaria para mantener el flujo magnético, que permanece prácticamente constante.

El transformador es reversible, pudiendo funcionar como primario cualquiera de los devanados.

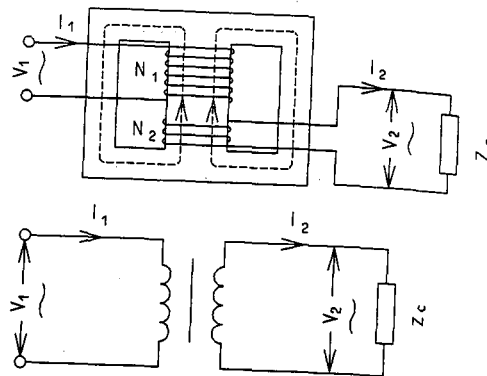


Fig. B.2: Transformador monofásico

B.3. TRANSFORMADOR IDEAL

Un transformador ideal es aquel que no tiene pérdidas de potencia y el flujo magnético es el mismo para los dos devanados.

■ Fuerzas electromotrices primaria y secundaria

- La fuerza electromotriz (f.e.m.) engendrada en el primario por el flujo variable alterno es una fuerza contraelectromotriz, proporcional al flujo máximo $\Phi_{\text{máx}}$, a la frecuencia f de la corriente de alimentación y al número de espiras N_1 del devanado.

$$E_1 = 4,44 \Phi_{\text{máx}} f N_1$$

E_1 : Fuerza electromotriz eficaz del primario (V).

$\Phi_{\text{máx}}$: Flujo máximo (Wb).

f : Frecuencia de la corriente alterna (Hz)

N_1 : Número de espiras del primario.

La fuerza electromotriz engendrada en el secundario por el flujo magnético variable es también proporcional al flujo máximo, a la frecuencia de la corriente de alimentación y al número de espiras del devanado N_2 .

$$E_2 = 4,44 \Phi_{\text{máx}} f N_2$$

E_2 : Fuerza electromotriz eficaz del secundario (V)

N_2 : Número de espiras del secundario.

DEMOSTRACIÓN

Considerando el flujo magnético alterno senoidal, su variación en un cuarto de período es de cero a flujo máximo (fig. B.3).

$$\text{La f.e.m. media en el primario } E_{m1} = N_1 \frac{\Phi_{\text{máx}}}{T} = \frac{4 \Phi_{\text{máx}} N_1}{T} = 4 \Phi_{\text{máx}} f N_1$$

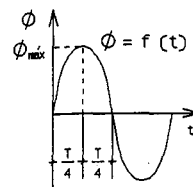


Fig. B.3

Siendo la f.e.m. eficaz $E_1 = 1,11 E_{m1}$ $E_1 = 4,44 \Phi_{\text{máx}} f N_1$

■ Relaciones fundamentales en un transformador ideal

- Relación de transformación:** es la relación entre los números de espiras de primario y secundario, que coincide con la relación de fuerzas electromotrices y con la relación de tensiones.

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Si N_1 es mayor que N_2 , el transformador es reductor.

Si N_1 es menor que N_2 , el transformador es elevador.

- Relación entre las potencias primaria y secundaria:** las potencias activas, reactivas y aparentes suministradas por el secundario y las absorbidas por el primario son iguales.

$$V_1 I_1 \cos \varphi_1 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$V_1 I_1 \sin \varphi_1 = V_2 I_2 \sin \varphi_2$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

- Relación entre intensidades primaria y secundaria:** las intensidades primaria I_1 y secundaria I_2 están en relación inversa a la relación de transformación.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{m} = \frac{N_2}{N_1}$$

B.4. TRANSFORMADOR REAL

En un transformador real hay que tener en cuenta la resistencia y reactancia de los devanados, además de las pérdidas de potencia en el hierro del circuito magnético.

El transformador, como toda máquina eléctrica, lleva una placa de características normalizada. Los datos incluidos en ella son de dos tipos: identificativos y técnicos (potencia, conexión, tensiones, intensidades, etc.). Cuando el transformador funciona según los valores de su placa de características se dice que funciona a régimen nominal o a plena carga. El funcionamiento real de una máquina es distinto, habitualmente, del régimen nominal. La potencia nominal del transformador es la potencia aparente que suministra por el secundario a plena carga.

■ Ensayo en vacío del transformador

Se efectúa conectando uno de los devanados a su tensión nominal y dejando abierto el otro devanado (fig. B.4).

Por el devanado conectado circulará una corriente de intensidad I_v de pequeño valor. (En los transformadores de gran potencia del orden del 5% de la intensidad nominal, mientras que en los de pequeña potencia puede llegar al 25 %).

La potencia perdida en el devanado conectado es, en los transformadores grandes, despreciable; por lo que la potencia consumida en el ensayo P_v es la necesaria para cubrir las pérdidas de potencia del circuito magnético P_{Fe} .

$$P_v = P_{Fe}$$

En el ensayo se obtiene también la relación de transformación $m = \frac{V_1}{V_2}$

Como el devanado tiene una gran reactancia, el transformador funciona en vacío como una bobina con núcleo de hierro, y la corriente absorbida está retrasada cerca de un cuarto de período (90°) respecto a la tensión aplicada.

■ Ensayo en cortocircuito del transformador

Se efectúa conectando uno de los devanados en cortocircuito (generalmente el de baja tensión) y aplicando al otro una tensión de pequeño valor V_{cc} (fig. B.5), de forma que por los devanados circule corriente con su intensidad nominal I_n .

La tensión de cortocircuito V_{cc} se suele expresar en tanto por ciento del valor nominal V_n

$$u_{cc} = \frac{V_{cc} \cdot 100}{V_n}$$

La potencia consumida en el ensayo P_{cc} es la necesaria para cubrir las pérdidas de potencia en los devanados P_{Cu} a la carga nominal.

$$P_{cc} = P_{Cu}$$

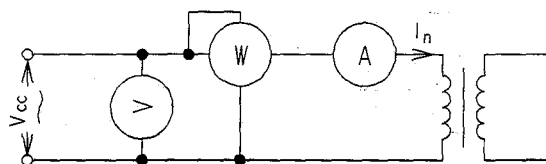


Fig. B.5: Ensayo en cortocircuito

La resistencia R_{cc} , impedancia Z_{cc} y reactancia X_{cc} de cortocircuito que presenta el transformador, desde el devanado conectado a la tensión de ensayo, se determinan de la forma siguiente:

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_n^2}; \quad Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_n}; \quad X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$$

TRANSFORMADOR

La tensión porcentual de cortocircuito u_{cc} y sus componentes activa u_R y reactiva u_X se calculan de la forma siguiente:

$$u_{cc} = \frac{Z_{cc} I_n}{V_n} 100; \quad u_R = \frac{R_{cc} I_n}{V_n} 100; \quad u_X = \frac{X_{cc} I_n}{V_n} 100$$

Siendo φ_{cc} el ángulo de desfase entre V_{cc} e I_n en el ensayo.

También pueden calcularse, partiendo del triángulo de cortocircuito (fig. B.6)

$$u_R = u_{cc} \cos \varphi_{cc}; \quad u_X = u_{cc} \sin \varphi_{cc}; \quad \cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_n}$$

La impedancia de cortocircuito también puede calcularse en función de la potencia nominal S_n

$$Z_{cc} = \frac{V_n^2}{S_n} \cdot \frac{u_{cc}}{100}$$

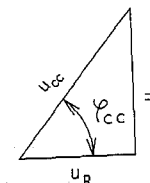
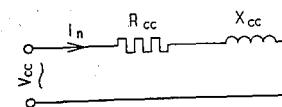


Fig. B.6: Triángulo de cc

DEMOSTRACIÓN

La impedancia de cortocircuito $Z_{cc} = \frac{V_n \cdot u_{cc}}{I_n \cdot 100}$, puede obtenerse en función de la potencia multiplicando y dividiendo por V_n

$$Z_{cc} = \frac{V_n \cdot V_n}{I_n \cdot V_n} \cdot \frac{u_{cc}}{100} = \frac{V_n^2}{S_n} \cdot \frac{u_{cc}}{100}$$

■ Rendimiento de un transformador

El transformador real tiene pérdidas de potencia en el hierro del circuito magnético P_{Fe} (por histéresis y corrientes parásitas) y en los devanados de cobre o aluminio (por efecto Joule) P_{Cu} . Todas estas pérdidas se transforman en calor.

El rendimiento del transformador es la relación entre la potencia activa suministrada por el secundario P_2 y la potencia activa absorbida por el primario P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}}$$

Las pérdidas en el hierro son constantes y se obtienen en el ensayo de vacío. Las pérdidas en el cobre se obtienen en el ensayo en cortocircuito y son proporcionales al cuadrado de la intensidad de corriente de carga (o de la potencia aparente).

$$P_{Cu} = kS^2$$

El rendimiento máximo se obtiene cuando las pérdidas en el cobre son iguales a las pérdidas en el hierro:

$$P_{Cu} = P_{Fe}$$

B.5. CAÍDA DE TENSIÓN EN EL TRANSFORMADOR

■ Regulación de tensión

La regulación de tensión es la variación porcentual de la misma. La regulación de tensión secundaria del transformador para cualquier carga:

$$u = \frac{V_{2v} - V_2}{V_{2v}} 100$$

siendo V_{2v} la tensión secundaria en vacío y V_2 la tensión secundaria en carga. Se puede calcular, para los transformadores de elevada potencia, en los que la intensidad que consumen en vacío puede despreciarse, de la forma siguiente:

$$u = \beta (u_R \cos \varphi_2 + u_X \sin \varphi_2)$$

Siendo β el índice de carga $\beta = \frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{S}{S_n}$,

φ_2 : Ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad de corriente del secundario.

La tensión en bornes del secundario depende del valor de la carga y de su carácter. Si la carga es inductiva, la tensión disminuye más que si la carga es solamente activa. Si la carga es capacitiva, la tensión aumenta a medida que crece la carga.

DEMOSTRACIÓN

La tensión secundaria en vacío es igual a la tensión en carga más la caída de tensión en resistencia R_{cc} y en la reactancia X_{cc} , según la ecuación vectorial representada en la figura B.7.

$$V_{2v} = V_2 + R_{cc} I_2 + X_{cc} I_2$$

La caída de tensión $u = V_{2v} - V_2 = DF = DE + EF = R_{cc} I_2 \cos \varphi_2 + X_{cc} I_2 \sin \varphi_2$

La regulación de tensión, para la intensidad nominal secundaria I_{2n} (índice de carga unidad), considerando la tensión secundaria en vacío como la tensión nominal V_{2n} :

$$u = \frac{V_{2n} - V_2}{V_{2n}} 100 \approx 100 \frac{R_{cc} I_{2n}}{V_{2n}} \cos \varphi_2 + 100 \frac{X_{cc} I_{2n}}{V_{2n}} \sin \varphi_2 = u_R \cos \varphi_2 + u_X \sin \varphi_2$$

■ Dispositivos de regulación de tensión en los transformadores de potencia

Para regular la tensión secundaria del transformador, se dispone en uno de los devanados (habitualmente en el de alta tensión) de un conmutador que permite cambiar el número de espiras mediante varias tomas. En los transformadores de distribución la conmutación de espiras se efectúa con el transformador desconectado y permite variar la tensión en $\pm 5\%$, con escalones de $\pm 2,5\%$.

En transformadores de gran potencia se utiliza un regulador en carga.

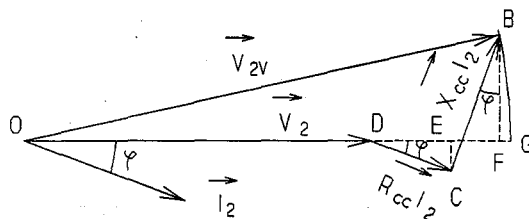


Fig. B.7

B.6. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

Cuando en funcionamiento normal se produce un cortocircuito en el secundario del transformador, la intensidad de cortocircuito:

$$I_{cc} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}} 100$$

Siendo I_{2n} la intensidad nominal del secundario.

La potencia aparente de cortocircuito $S_{cc} = \frac{S_n}{u_{cc}} 100$

S_n : Potencia nominal del transformador.

DEMOSTRACIÓN

Por el secundario en cortocircuito circula la intensidad nominal I_{2n} cuando la tensión aplicada es la del ensayo en cortocircuito a la corriente nominal. Cuando se produce un cortocircuito con la tensión de la red (100% de la tensión), la intensidad es directamente proporcional a la tensión, y considerando la red de alimentación del transformador de potencia infinita (de manera que mantiene siempre la misma tensión en cualquier condición de carga), se puede establecer la proporción:

$$\frac{100}{u_{cc}} = \frac{I_{cc}}{I_{2n}}$$

Entonces, la intensidad de cortocircuito en el secundario $I_{cc} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}} 100$

B.7. TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

■ Constitución

Está formado por tres transformadores monofásicos dispuestos sobre una misma armazón magnética.

El circuito magnético tiene dos culatas y tres columnas (fig. B.8). Sobre cada una de estas columnas va arrollado un devanado primario y otro secundario.

Los tres devanados primarios y también los tres secundarios, pueden conectarse (fig. B.9) en estrella (conexión y), triángulo (conexión d) o zigzag (conexión z).

En grandes potencias y muy altas tensiones se utilizan tres transformadores monofásicos iguales conectados entre sí, de forma que sea posible la transformación de un sistema trifásico de tensiones.

En algunos transformadores trifásicos se usan devanados terciarios para alimentación de circuitos auxiliares de mando y maniobra, y también dos o más circuitos primarios o secundarios independientes para alimentación de dos o más líneas.

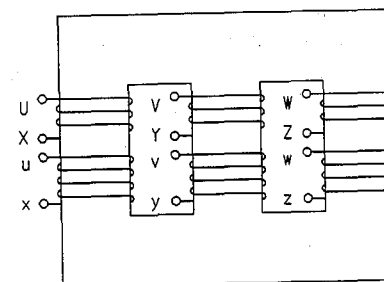


Fig. B.8: Transformador trifásico

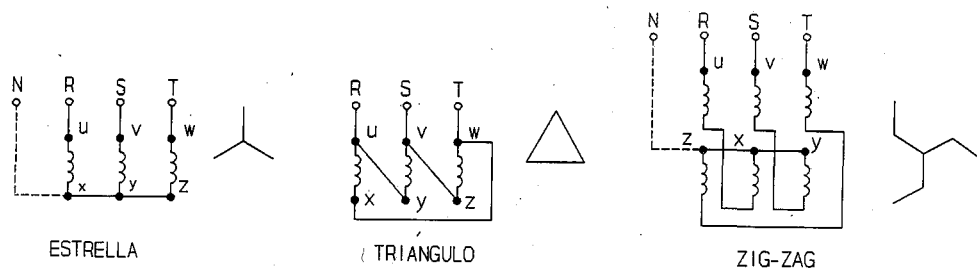


Fig. B.9: Conexiones trifásicas

Según la Comisión Electrotécnica Internacional (C.E.I.) los transformadores se clasifican en grupos de conexión. Las empresas distribuidoras de energía eléctrica utilizan para centros de transformación los tipos de transformadores siguientes:

Yz11 Para potencias de 25 a 100 kVA.

Dy11 Para potencias de 160 a 1000 kVA.

El número que acompaña a la indicación de la conexión es el índice horario que, multiplicado por 30, indica el desfase entre las tensiones compuestas o de línea de primario y secundario en el sentido de giro de las agujas del reloj.

En la tabla B.1 se indican los grupos de conexión de transformadores.

■ Relaciones fundamentales en un transformador trifásico ideal

• Relación de transformación

- Relación de transformación simple o de fase. Es la relación entre el número de espiras de fase del primario N_1 y del secundario N_2 , que coincide, en el transformador ideal, con la relación de tensiones de fase de primario V_{f1} y secundario V_{f2} :

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_{f1}}{V_{f2}}$$

- Relación de transformación compuesta. Es la relación entre las tensiones de línea de primario V_{L1} y secundario V_{L2} :

$$m_c = \frac{V_{L1}}{V_{L2}}$$

- Relación entre potencias de primario y secundario. Las potencias activa, reactiva y aparente suministradas por el secundario son iguales a las absorbidas por el primario:

$$\sqrt{3} V_{L1} I_{L1} \cos \varphi_1 = \sqrt{3} V_{L2} I_{L2} \cos \varphi_2$$

$$\sqrt{3} V_{L1} I_{L1} \sin \varphi_1 = \sqrt{3} V_{L2} I_{L2} \sin \varphi_2$$

$$\sqrt{3} V_{L1} I_{L1} = \sqrt{3} V_{L2} I_{L2}$$

• Relación de intensidades.

- La relación entre las intensidades de línea de primario I_{L1} y de secundario I_{L2} es la inversa de la relación de transformación compuesta:

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{1}{m_c}$$

- La relación entre las intensidades de fase de primario I_{f1} y de secundario I_{f2} es la inversa de la relación de transformación simple o de fase:

$$\frac{I_{f1}}{I_{f2}} = \frac{1}{m}$$

■ Ensayo de los transformadores trifásicos

Se ensayan en vacío y en cortocircuito igual que los transformadores monofásicos. En los cálculos se utilizan las mismas expresiones que para los monofásicos, con valores de fase de tensión, intensidad y potencia.

B.8. CONEXIÓN EN PARALELO DE TRANSFORMADORES

Dos o más transformadores se acoplan en paralelo conectando los devanados primarios a la línea de alimentación y los secundarios a la línea de utilización.

Las condiciones que deben cumplir dos o más transformadores para poder acoplarse en paralelo son:

- 1) Iguaes relaciones de transformación, con la mismas tensiones nominales. Los transformadores trifásicos deben tener igual relación de transformación compuesta.
- 2) Tensiones de cortocircuito lo más iguales posible. Como la tensión de cortocircuito varía según la potencia, la CEI recomienda que las potencias nominales de los transformadores conectados no difieran más del doble.
- 3) Terminales homólogos conectados a un mismo conductor (son terminales homólogos aquellos que tienen la misma tensión en cualquier instante). Los transformadores trifásicos deben tener igual grupo de conexiones (los desfases de las tensiones secundarias respecto a la línea de alimentación han de ser iguales, y el sentido de rotación de los vectores de las tensiones secundarias ha de ser el mismo para todos los transformadores).

En transformadores conectados en paralelo y con la misma tensión de cortocircuito, la carga total de la red se distribuye proporcionalmente a sus potencias nominales.

En transformadores conectados en paralelo y con la misma potencia nominal, la carga total de la red se distribuye en razón inversa de sus tensiones de cortocircuito.

Antes de la puesta en servicio de un transformador en paralelo con otro, es conveniente efectuar una comprobación experimental por medio de voltímetros

conectados en serie con el secundario, que deben indicar tensión nula (fig. B.10). Si se utilizan pilotos de señalización, la ausencia de tensión la indican cuando están apagados.

B.9. AUTOTRANSFORMADOR

Es un transformador que tiene unidos el primario y el secundario (fig. B.11), formando un solo devanado. Es de construcción más barata que los transformadores ordinarios, pero tiene la desventaja de la unión de los devanados de alta y baja tensión.

Las relaciones fundamentales del transformador ideal se mantienen también para el autotransformador ideal.

- 1) Relación de transformación $m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$
- 2) Relación entre potencias $V_1 I_1 = V_2 I_2$
- 3) Relación entre intensidades $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{m}$

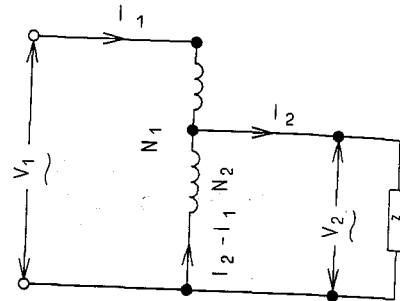


Fig. B.11: Autotransformador

Considerando el autotransformador ideal, la intensidad de corriente eléctrica en el devanado común a primario y secundario es la diferencia de intensidades.

Se llama potencia de paso del autotransformador a la potencia aparente suministrada por el secundario:

$$S_2 = V_2 I_2$$

La potencia propia o electromagnética del autotransformador S_p , es la potencia aparente transmitida por el flujo magnético del primario al secundario. Es la que determina las dimensiones del núcleo del circuito magnético y se calcula en el devanado común o en el devanado serie:

$$S_p = V_2 (I_2 - I_1) = I_1 (V_1 - V_2)$$

El Reglamento sobre Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación especifica que en caso de utilizar autotransformadores trifásicos de potencia, serán de conexión estrella (fig. B.12), recomendándose la puesta a tierra del neutro (MIE RAT 07).

El autotransformador tiene menos pérdidas que el transformador y menos impedancia, por lo que las intensidades de cortocircuito son muy elevadas.

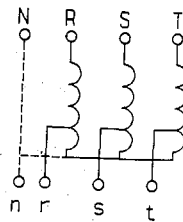


Fig. B.12

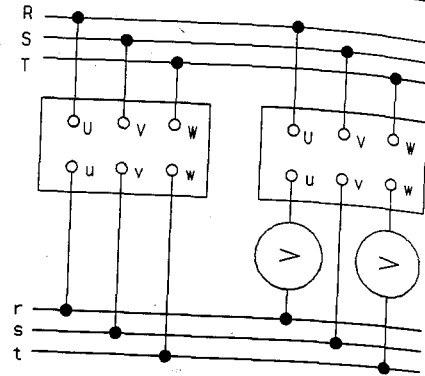


Fig. B.10

B.10. TRANSFORMADORES DE MEDIDA

Los transformadores de medida se utilizan para transformar la magnitud que se quiere medir (tensión o intensidad) a un valor proporcional a ésta y utilizable (del orden de 5 A o 110 V), separando los circuitos de medida de los que están a la tensión de la instalación. Los devanados primario y secundario están eléctricamente separados, solamente con el circuito magnético común. Se utilizan también para conexión de relés de protección que no pueden soportar intensidades de corriente ni tensiones elevadas.

Igual que en los aparatos de medida, en estos transformadores se indica una clase según la precisión de la medida. Los errores pueden ser de relación de transformación o de fase entre las magnitudes primarias y secundarias. Se utilizan aparatos de clases 0,2 o 0,5 para mediciones precisas y de clase 1 para medidas de funcionamiento.

La conexión al secundario de muchos aparatos de medida disminuye la precisión, por lo que el consumo de los mismos no debe sobrepasar la potencia de precisión del transformador. (Potencia aparente o carga nominal en VA, indicada en su placa de características).

■ Transformador de medida de tensión

Es un transformador reductor en el que el primario se conecta a la tensión a medir y el secundario a un voltímetro (fig. B.13) o a circuitos voltimétricos de los aparatos de medida.

$$\text{La tensión del primario } V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2$$

Se utiliza para medir en alta tensión, siendo la máxima tensión secundaria 110 V.

Para proteger el transformador contra el peligro de cortocircuito se utilizan fusibles en primario y secundario.

Para proteger el secundario contra posibles descargas de alta tensión (por averías de aislamiento) se conecta este devanado a tierra.

En corriente alterna trifásica es muy usado el transformador de tensión en V o triángulo abierto (fig. B.14).

En tensiones iguales o mayores de 220 kV se utilizan transformadores de tensión capacitivos. Consisten en un divisor de tensión formado por condensadores en serie. A los terminales de uno de los condensadores se conecta el primario del transformador de

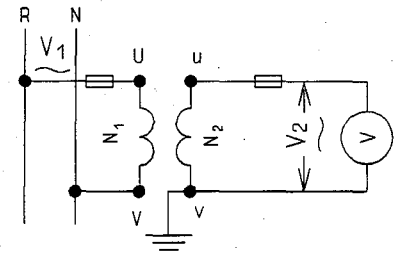


Fig. B.13: Transformador de tensión

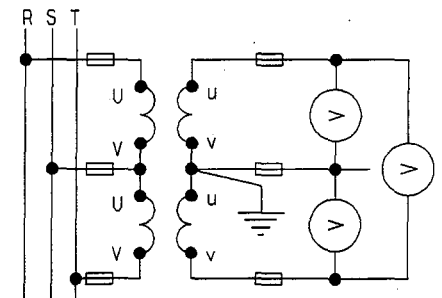


Fig. B.14: Transformador en V

tensión inductivo, que alimenta por el secundario a los aparatos de medida o protección. Este sistema permite utilizar la línea de A.T. para comunicación y telemando.

■ Transformador de medida de intensidad

Es un transformador con muchas más espiras en el secundario que en el primario, el cual está, en muchos casos, formado por el propio conductor de la red. El secundario se conecta a un amperímetro (fig. B.15) o a los circuitos amperimétricos de los aparatos de medida.

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2$$

Se utiliza siempre en alta tensión. En baja tensión se utiliza para medir grandes intensidades, siendo la intensidad secundaria como máximo 5 A.

No debe abrirse el secundario del transformador de intensidad en funcionamiento. El gran flujo magnético del primario, al no estar contrarrestado por el flujo secundario, calentaría excesivamente el núcleo e induciría en el devanado secundario tensiones demasiado elevadas que podrían llegar a dañar el aislamiento.

En los transformadores de medida de intensidad en alta tensión, se conecta a tierra el secundario para proteger este devanado en caso de descarga de tensión de primario a secundario. Es obligatorio en la conexión de aparatos de medida de energía para facturación, la instalación de dispositivos que permitan su separación para verificación o sustitución sin desconectar la instalación y sin interrumpir, en los transformadores de intensidad, la continuidad del secundario (MIE RAT 08).

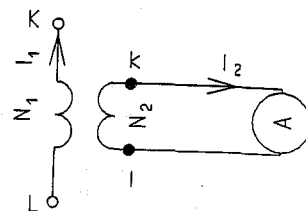


Fig. B. 15

Tabla B.1. Grupos de conexión de los transformadores trifásicos

ÍNDICE DE CONEXIÓN	GRUPO DE CONEXIÓN C.E.I.	DIAGRAMA VECTORIAL		ESQUEMA DE CONEXIONES	
		ALTA TENSIÓN	BAJA TENSIÓN	ALTA TENSIÓN	BAJA TENSIÓN
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				

Tabla B.1. Grupos de conexión de los transformadores trifásicos

ÍNDICE DE CONEXIÓN	GRUPO DE CONEXIÓN C.E.I.	DIAGRAMA VECTORIAL		ESQUEMA DE CONEXIONES	
		ALTA TENSIÓN	BAJA TENSIÓN	ALTA TENSIÓN	BAJA TENSIÓN
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

(Continuación)

PROBLEMAS RESUELTOS

B.1. Un transformador monofásico con circuito magnético tipo acorazado tiene un núcleo de 5×6 cm de lado y se considera que la sección neta es el 90 % de la sección geométrica. El número de espiras en el primario es 306 y en el secundario 167. La inducción máxima admitida es 1,2 T a la frecuencia de 50 Hz. Calcular las fuerzas electromotrices de primario y secundario.

$$\text{La f.e.m. primaria } E_1 = 4,44 \Phi_{\text{máx}} f N_1$$

$$\text{La sección neta del núcleo } s_n = 0,9 \cdot 30 = 27 \text{ cm}^2 = 27 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{El flujo máximo } \Phi_{\text{máx}} = B_{\text{máx}} s_n = 1,2 \cdot 27 \cdot 10^{-4} = 0,00324 \text{ Wb}$$

$$\text{Entonces } E_1 = 4,44 \cdot 0,00324 \cdot 50 \cdot 306 = 220 \text{ V}$$

$$\text{La f.e.m. secundaria } E_2 = 4,44 \Phi_{\text{máx}} f N_2 = 4,44 \cdot 0,00324 \cdot 50 \cdot 167 = 120 \text{ V}$$

B.2. Un transformador monofásico de relación de transformación 380/220 V suministra a una carga 600 W de potencia a 220 V. Considerando el transformador ideal y el factor de potencia de la carga 0,9 inductivo, calcular las intensidades de primario y secundario.

$$\text{La relación de transformación } m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{380}{220} = 1,73$$

$$\text{La intensidad que suministra el transformador } I_2 = \frac{P_2}{V_2 \cos \varphi} = \frac{600}{220 \cdot 0,9} = 3,03 \text{ A}$$

La intensidad que circula por el primario se calcula partiendo de la relación de transformación:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{m}; \quad I_1 = \frac{I_2}{m} = \frac{3,03}{1,73} = 1,75 \text{ A}$$

B.3. Un transformador monofásico de 50 kVA, 10 000/230 V, 50 Hz, se ensaya en cortocircuito conectándolo a una tensión alterna senoidal regulable, de frecuencia 50 Hz por el devanado de alta tensión. Si las indicaciones de los aparatos son 410 V, 820 W y 5 A, calcular:

- Tensión porcentual de cortocircuito.
- Variación porcentual de la tensión secundaria y tensión en bornes del secundario trabajando a plena carga y con factor de potencia 0,8 inductivo.
- Tensión en bornes del secundario trabajando el transformador a media carga con factor de potencia 0,2 en adelanto.

$$\text{a) La tensión porcentual de cortocircuito } u_{\text{cc}} = \frac{V_{\text{cc}}}{V_n} 100 = \frac{410}{10\,000} \cdot 100 = 4,1 \%$$

$$\text{b) La variación porcentual de tensión secundaria } u = \beta (u_R \cos \varphi_2 + u_X \sin \varphi_2)$$

El factor de potencia en el ensayo de cortocircuito:

$$\cos \varphi_{\text{cc}} = \frac{P_{\text{cc}}}{V_{\text{cc}} I_n} = \frac{820}{410 \cdot 5} = 0,4$$

$$u_R = u_{cc} \cos \varphi_{cc} = 4,1 \cdot 0,4 = 1,64 \% ; \quad u_X = \sqrt{u_{cc}^2 - u_R^2} = \sqrt{4,1^2 - 1,64^2} = 3,76 \%$$

El factor de potencia de la carga $\cos \varphi_2 = 0,8$; $\varphi_2 = 36,87^\circ$; $\sin \varphi_2 = 0,6$

El índice de carga cuando se trabaja a plena carga $\beta = 1$

Entonces la variación de tensión $u = 1 (1,64 \cdot 0,8 + 3,76 \cdot 0,6) = 3,57 \%$

$$u = \frac{V_{2V} - V_2}{V_{2V}} 100; \quad V_2 = \frac{100 - u}{100} V_{2V} = \frac{100 - 3,57}{100} \cdot 230 = 221,79 \text{ V}$$

c) El factor de potencia de la carga capacitiva:

$$\cos \varphi_2 = 0,2; \quad \varphi_2 = -78,46^\circ; \quad \sin \varphi_2 = -0,9798$$

El índice de carga cuando trabaja a media carga $\beta = \frac{1}{2}$

La variación porcentual de tensión en bornes del secundario:

$$u = \frac{1}{2} (1,64 \cdot 0,2 - 3,76 \cdot 0,9798) = -1,68 \%$$

$$\text{La tensión en bornes del secundario } V_2 = \frac{100 + 1,68}{100} \cdot 230 = 233,86 \text{ V}$$

B.4. La placa de características de un transformador monofásico indica los siguientes datos: 100 kVA, 6 000/400 V, 50 Hz, $u_{cc} = 4\%$. Calcular:

a) Intensidad de corriente de cortocircuito en el secundario, considerando la red de alimentación del transformador de potencia infinita.

b) Potencia aparente de cortocircuito.

$$\text{a) La intensidad de cortocircuito en el secundario } I_{cc} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}} 100$$

$$\text{La intensidad nominal del secundario } I_{2n} = \frac{S_n}{V_{2n}} = \frac{100\,000}{400} = 250 \text{ A}$$

$$\text{Entonces } I_{cc} = \frac{250}{4} \cdot 100 = 6\,250 \text{ A} = 6,25 \text{ kA}$$

b) La potencia de cortocircuito en el secundario.

$$S_{cc} = \frac{S_n}{u_{cc}} 100 = \frac{100\,000}{4} \cdot 100 = 2\,500\,000 \text{ VA} = 2,5 \text{ MVA}$$

B.5. Se ensaya un transformador monofásico de 100 kVA, 6 000/230 V, 50 Hz. El ensayo en cortocircuito se realiza conectando el devanado de alta tensión a una fuente de tensión regulable, alterna senoidal de frecuencia 50 Hz. Los datos obtenidos en el ensayo son: 300 V, 16,67 A, 1,8 kW.

El ensayo en vacío se realiza conectando el devanado de baja tensión a una tensión alterna senoidal, 230 V, 50 Hz siendo el consumo de potencia de 400 W.

Calcular:

a) Rendimiento a plena carga, con factor de potencia 0,8 inductivo.

b) Rendimiento a tres cuartos de plena carga con igual factor de potencia.

c) Potencia aparente de rendimiento máximo.

TRANSFORMADOR

d) Rendimiento máximo con factor de potencia unidad.

$$\text{a) La intensidad nominal en alta tensión } I_{1n} = \frac{S_n}{V_{1n}} = \frac{100\,000}{6\,000} = 16,67 \text{ A}$$

El ensayo en cortocircuito fue realizado a la intensidad nominal.

La potencia suministrada $P_2 = S_n \cos \varphi_2 = 100\,000 \cdot 0,8 = 80\,000 \text{ W} = 80 \text{ kW}$

$$\text{Rendimiento a plena carga } \eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} = \frac{80}{80 + 1,8 + 0,4} = 0,973 = 97,3 \%$$

b) Las pérdidas en el cobre varían en proporción directa al cuadrado de la potencia aparente suministrada, que a 3/4 de plena carga es de 75 kVA:

$$\frac{P_{Cu}}{1,8} = \frac{75^2}{100^2}$$

$$\text{Las pérdidas en el cobre a 3/4 de plena carga } P_{Cu} = \frac{75^2}{100^2} \cdot 1,8 = 1,0125 \text{ kW}$$

$$\text{La potencia suministrada a 3/4 de plena carga } P_2 = 75 \cdot 0,8 = 60 \text{ kW}$$

$$\text{El rendimiento a 3/4 de plena carga } \eta = \frac{60}{60 + 1,0125 + 0,4} = 0,977 = 97,7 \%$$

c) El rendimiento máximo se verifica para una potencia suministrada a la cual las pérdidas en el cobre son igual a las del hierro 0,4 kW.

$$\text{Entonces } \frac{1,8}{0,4} = \frac{100^2}{S_2^2}$$

$$\text{La potencia aparente de rendimiento máximo } S_2 = 100 \sqrt{\frac{0,4}{1,8}} = 47,14 \text{ kVA}$$

d) Con rendimiento máximo y factor de potencia 1, $P_2 = S_2 \cos \varphi_2 = 47,14 \cdot 1 = 47,14 \text{ kW}$

$$\text{El rendimiento máximo } \eta_{\max} = \frac{47,14}{47,14 + 0,4 + 0,4} = 0,983 = 98,3 \%$$

B.6. Un transformador trifásico de 400 kVA, 20 000/400 V, 50 Hz se ensaya en cortocircuito conectándolo por el lado de alta tensión. Siendo las medidas del ensayo: 4,6 kW, 800 V, 11,55 A. Calcular:

a) Tensión porcentual de cortocircuito.

b) Regulación de tensión y tensión de línea en bornes del secundario trabajando a plena carga con factor de potencia 0,8 inductivo.

c) Intensidad de cortocircuito en el secundario.

d) Potencia de cortocircuito.

$$\text{a) Intensidad nominal del devanado primario: } I_{L1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} V_{L1}} = \frac{400\,000}{\sqrt{3} \cdot 20\,000} = 11,55 \text{ A}$$

El ensayo está realizado a la intensidad nominal.

La tensión de línea porcentual de cortocircuito:

$$u_{cc} = \frac{V_{Lcc}}{V_{L1}} 100 = \frac{800}{20\,000} \cdot 100 = 4 \%$$

Los valores porcentuales se mantienen iguales para valores de fase o de línea.

- b) El factor de potencia en el ensayo en cortocircuito:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_{cc} I_{L1}} = \frac{4600}{\sqrt{3} \cdot 800 \cdot 11,55} = 0,287$$

$$u_R = u_{cc} \cos \varphi_{cc} = 4 \cdot 0,287 = 1,15\%; \quad u_X = \sqrt{u_{cc}^2 - u_R^2} = \sqrt{4^2 - 1,15^2} = 3,83\%$$

El factor de potencia de la carga $\cos \varphi_2 = 0,8$; $\varphi_2 = 36,87^\circ$; $\sin \varphi_2 = 0,6$

El índice de carga cuando trabaja a plena carga, $\beta = 1$

La variación porcentual de tensión de línea o regulación de tensión:

$$u = \beta(u_R \cos \varphi_2 + u_X \sin \varphi_2) = 1 \cdot (1,15 \cdot 0,8 + 3,83 \cdot 0,6) = 3,22\%$$

La tensión de línea en bornes del secundario:

$$V_{L2} = \frac{100 - u}{100} V_{L2V} = \frac{100 - 3,22}{100} \cdot 400 = 387 \text{ V}$$

- c) La intensidad de línea nominal del secundario $I_{L2} = \frac{S_n}{\sqrt{3} V_{L2}} = \frac{400000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 577,4 \text{ A}$

La intensidad de cortocircuito en el secundario:

$$I_{cc} = \frac{I_{L2}}{u_{cc}} 100 = \frac{577,4}{4} \cdot 100 = 14435 \text{ A}$$

- d) La potencia aparente de cortocircuito:

$$S_{cc} = \frac{S_n}{u_{cc}} 100 = \frac{400000}{4} \cdot 100 = 10000000 \text{ VA} = 10 \text{ MVA}$$

B.7. Un transformador Yz11 de 100 kVA, 20 000/400 V, 50 Hz y $u_{cc}=4\%$ se conecta en paralelo con otro transformador Yz11, de 50 kVA, 20 000/400 V, 50 Hz. y $u_{cc}=4\%$. La carga total que suministran los dos transformadores es de 120 kVA. Calcular qué carga suministra cada uno.

La carga se reparte directamente proporcional a sus potencias nominales.

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{100}{50} = 2; \quad S_1 + S_2 = 120; \quad \frac{120 - S_2}{S_2} = 2; \quad S_2 = \frac{120}{3} = 40 \text{ kVA}$$

La carga que suministra el primer transformador: $S_1 = 120 - 40 = 80 \text{ kVA}$

B.8. Un autotransformador monofásico elevador (fig. B.16) de 127/220 V, 50 Hz funciona suministrando 2400 VA. Considerando el aparato ideal, calcular:

- a) Intensidades que circulan en el devanado serie y común.
b) Potencia propia.

- a) La intensidad de corriente absorbida por el primario:

$$I_1 = \frac{S_n}{V_1} = \frac{2400}{127} = 18,9 \text{ A}$$

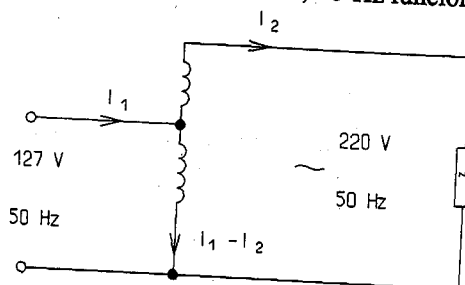


Fig. B.16

La intensidad de corriente suministrada por el secundario:

$$I_2 = \frac{S_n}{V_2} = \frac{2400}{220} = 10,9 \text{ A}$$

La intensidad que circula por devanado serie $I_s = I_2 = 10,9 \text{ A}$

La intensidad en el devanado común $I_{co} = I_1 - I_2 = 18,9 - 10,9 = 8 \text{ A}$

- b) La potencia propia o electromagnética $S_p = V_1 I_{co} = 127 \cdot 8 = 1016 \text{ VA}$

B.9. Para construir un autotransformador monofásico 220/48 V, 50 Hz con un núcleo acorazado de sección geométrica $4 \times 4 \text{ cm}$, considerando la sección neta el 90% de la sección geométrica, se admite una inducción máxima de 1,2 T y una densidad de corriente de 3 A/mm². Si el autotransformador es ideal, calcular:

- a) Número de espiras en el devanado serie y común.

- b) Diámetro de los conductores de cobre de ambos devanados.

- a) La sección neta del núcleo $s_n = 0,9 \cdot 16 = 14,4 \text{ cm}^2$

El flujo magnético en el núcleo $\Phi_{\max} = B_{\max} s_n = 1,2 \cdot 14,4 \cdot 10^{-4} = 1,73 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$.

La tensión en el devanado común $V_{co} = V_2 = 48 \text{ V}$

La tensión en el devanado serie $V_s = V_1 - V_2 = 220 - 48 = 172 \text{ V}$

El número de espiras del devanado serie:

$$N_s = \frac{V_s}{4,44 \Phi_{\max} f} = \frac{172}{4,44 \cdot 1,73 \cdot 10^{-3} \cdot 50} = 448 \text{ espiras}$$

El número de espiras del devanado común:

$$N_{co} = \frac{48}{4,44 \cdot 1,73 \cdot 10^{-3} \cdot 50} = 125 \text{ espiras}$$

- b) La potencia propia o electromagnética se puede calcular de forma aproximada en función de la sección neta del núcleo:

$$S_p = s_n^2 = 14,4^2 = 207,36 \text{ VA}$$

La intensidad en el devanado serie:

$$I_s = I_1 = \frac{S_p}{V_1 - V_2} = \frac{207,36}{220 - 48} = 1,2 \text{ A}$$

La potencia nominal $S_n = S_1 = V_1 I_1 = 220 \cdot 1,2 = 264 \text{ VA}$

La intensidad nominal secundaria $I_2 = \frac{S_n}{V_2} = \frac{264}{48} = 5,5 \text{ A}$

La intensidad en el devanado común $I_{co} = I_2 - I_1 = 5,5 - 1,2 = 4,3 \text{ A}$

La sección del conductor del devanado serie $s_s = \frac{I_s}{\delta} = \frac{1,2}{3} = 0,4 \text{ mm}^2$

El diámetro del conductor del devanado serie se calcula a partir de su sección:

$$s_s = \pi \frac{d_s^2}{4}; \quad d_s = \sqrt{4 \frac{s_s}{\pi}} = \sqrt{4 \cdot \frac{0,4}{3,14}} = 0,71 \text{ mm}$$

La sección del conductor del devanado común $s_{\infty} = \frac{I_{\infty}}{\delta} = \frac{4,3}{3} = 1,43 \text{ mm}^2$

El diámetro del conductor del devanado común:

$$d_{\infty} = \sqrt{4 \frac{s_{\infty}}{\pi}} = \sqrt{4 \cdot \frac{1,43}{3,14}} = 1,35 \text{ mm}$$

B.10. Un transformador de tensión de 50 VA, 20 000/100 V está conectado por el primario a una red de alta tensión. Calcular, considerando el aparato ideal:

- Tensión de la línea a la que está conectado, si la tensión secundaria es de 99 V.
- Potencia aparente que suministra el transformador de medida, si los aparatos conectados al secundario consumen 0,5 A.

$$\text{a) La relación de transformación } m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{20\,000}{100} = 200$$

La tensión de la línea primaria $V_1 = m V_2 = 99 \cdot 200 = 19\,800 \text{ V}$

$$\text{c) La potencia aparente que suministra el secundario } S_2 = V_2 I_2 = 99 \cdot 0,5 = 49,5 \text{ VA}$$

B.11. Un transformador de intensidad de 30 VA y relación de intensidades 250. Alimenta a los aparatos de medida con una intensidad de 5 A, y la impedancia total es de 0,4 Ω. Calcular:

- Intensidad del primario.
- Potencia aparente que suministra por el secundario.
 - La intensidad del primario $I_1 = 250 \cdot 5 = 1\,250 \text{ A}$
 - La potencia aparente que suministra:

$$S_2 = V_2 I_2; \quad V_2 = Z_2 I_2; \quad S_2 = Z_2 I_2^2 = 0,4 \cdot 5^2 = 10 \text{ VA}$$

PROBLEMAS PROPUESTOS

B.12. Un transformador monofásico, que tiene 620 espiras en el primario y 422 en el secundario, se conecta a una red alterna senoidal de 220 V, 50 Hz. Considerando el transformador ideal calcular:

- El flujo máximo en el circuito magnético.
- La f.e.m. del secundario.
- El flujo máximo y la f.e.m. del secundario si la frecuencia pasa a ser 60 Hz.

Solución: a) $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$; b) 150 V; c) $1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$, 150 V.

B.13. Un transformador monofásico de 10 kVA, 6000/240 V, se conecta a una tensión alterna senoidal de 240 V, 50 Hz para el ensayo en vacío. Consume en el ensayo una corriente de intensidad 1,8 A y una potencia de 80 W. Calcular el factor de potencia en vacío.

Solución: 0,185.

B.14. Un transformador monofásico de 10 kVA, 6000/240 V, 50 Hz se ensaya en vacío y en cortocircuito.

El ensayo en cortocircuito se realiza por el devanado de alta tensión, conectando el devanado de baja tensión en cortocircuito. Los datos obtenidos en el ensayo son: 250 V, 190 W, 1,67 A.

El ensayo en vacío se realiza conectando el devanado de baja tensión a una tensión alterna senoidal de 240 V, 50 Hz, siendo la intensidad 1,6 A y la potencia consumida 70 W.

Calcular:

- Regulación de tensión a plena carga para un factor de potencia 0,8 inductivo.
- Tensión en bornes del secundario a plena carga con factor de potencia unidad.
- Rendimiento del transformador a plena carga con factor de potencia unidad.
- Potencia aparente de rendimiento máximo.
- Rendimiento máximo con factor de potencia 0,9 inductivo.
- Intensidad de cortocircuito en el secundario, considerando la red de alimentación de potencia infinita.

Solución: a) 3,75%; b) 235,44 V; c) 97,47%; d) 6,07 kVA; e) 97,5%; f) 1 kA.

B.15. Un transformador trifásico de conexión Dy11, 1 000 kVA, 50 Hz, 20 000/400 V; se conecta a una línea trifásica de 20 kV, 50 Hz. Calcular considerando el transformador ideal:

- Intensidad de línea en primario y secundario a plena carga.
- Potencia que suministra a plena carga con factor de potencia 0,86 inductivo.
- Tensión de fase del secundario.
- Número de espiras por fase del primario si el secundario tiene 72 espiras por fase.

Solución: a) $I_{L1} = 28,87 \text{ A}$, $I_{L2} = 1\,443 \text{ A}$; b) 860 kW; c) 230 V; d) 6 261 espiras.

B.16. En un transformador trifásico Yz11 de 250 kVA, 20 000/400 V, 50 Hz, tensión de cortocircuito 4%. Calcular:

- Intensidad de cortocircuito en el secundario considerando la línea de alimentación de potencia infinita.
- Potencia de cortocircuito.

Solución: a) 9,02 kA; b) 6 250 kVA.

B.17. Un transformador trifásico de 630 kVA, 20 000/400 V, 50 Hz se ensaya en cortocircuito y para una intensidad igual a la nominal consume 6 500 W. En el ensayo en vacío a la tensión nominal consume 1 300 W. Calcular:

- Rendimiento a plena carga con factor de potencia unidad.
- Potencia de rendimiento máximo con factor de potencia unidad y valor de dicho rendimiento.

Solución: a) 98,77%; b) 281,74 kVA, 99,1%

B.18. Un transformador trifásico Yy de 630 kVA, 50 Hz, alimentado en vacío con 20000V, absorbe 1300 W con una tensión secundaria de 400 V. En cortocircuito, con una tensión primaria de 800 V, consume una potencia de 6500 W con una intensidad de corriente en el secundario de 909 A. Calcular:

- a) Regulación de tensión a plena carga con factor de potencia 0,8 inductivo.
- b) Rendimiento del transformador a esta carga.

Solución: a) 3,14 %; b) 98,4 %

B.19. Una carga de 1 875 kVA está alimentada por dos transformadores en paralelo, de 20 000/400 V y tensión porcentual de cortocircuito 6%. Uno de ellos tiene de potencia nominal 800 kVA y el otro de 1 250 kVA. Calcular la carga que suministra cada transformador.

Solución: $S_1 = 731,71 \text{ kVA}$, $S_2 = 1\,143,29 \text{ kVA}$

B.20. Se tiene un circuito de chapa magnética tipo acorazado, con sección geométrica del núcleo 30 cm^2 . Se quiere construir, aprovechando este circuito, un autotransformador monofásico de relación de transformación 220/110 V, 50 Hz. Se considera la sección neta del núcleo el 90% de la sección geométrica. Admitiendo una inducción máxima en el núcleo de 1,2 T y una densidad de corriente en los conductores de 3 A/mm^2 . Calcular considerando el autotransformador ideal:

- a) Potencia propia aproximada.
- b) Intensidades en los devanados serie y común a plena carga.
- c) Diámetro de los conductores en los devanados serie y común.
- d) Número de espiras en los devanados serie y común.

Solución: a) 729 VA; b) $I_s = I_{\infty} = 6,63 \text{ A}$; c) $d_s = d_{\infty} = 1,68 \text{ mm}$; d) $N_s = N_{\infty} = 153$.

B.21. Se utiliza un transformador de tensión de 50 VA, 22 000/110 V, conectado por el primario a una línea de alta tensión. Si la tensión secundaria es de 100 V y la impedancia total de los circuitos de medida conectados al secundario es de 315Ω . Calcular:

- a) Tensión en el primario.
- b) Potencia aparente suministrada.

Solución: a) 20 000 V; b) 31,7 VA.

B.22. En un cuadro de medida de un centro de transformación se utiliza un transformador de intensidad de 30 VA, 1 250/5 A, que se conecta por el primario a una línea de corriente alterna. Si por el secundario circulan 4,9 A, calcular:

- a) Intensidad que circula por el primario.
- b) Impedancia máxima de los circuitos de medida conectados al secundario para no sobrepasar la potencia de precisión del transformador.

Solución: a) 1 225 A; b) $1,25 \Omega$

B.18. Un transformador trifásico Yy de 630 kVA, 50 Hz, alimentado en vacío con 20000V, absorbe 1300 W con una tensión secundaria de 400 V. En cortocircuito, con una tensión primaria de 800 V, consume una potencia de 6500 W con una intensidad de corriente en el secundario de 909 A. Calcular:

- Regulación de tensión a plena carga con factor de potencia 0,8 inductivo.
- Rendimiento del transformador a esta carga.

Solución: a) 3,14%; b) 98,4%

B.19. Una carga de 1 875 kVA está alimentada por dos transformadores en paralelo, de 20 000/400 V y tensión porcentual de cortocircuito 6%. Uno de ellos tiene de potencia nominal 800 kVA y el otro de 1 250 kVA. Calcular la carga que suministra cada transformador.

Solución: $S_1 = 731,71$ kVA, $S_2 = 1 143,29$ kVA

B.20. Se tiene un circuito de chapa magnética tipo acorazado, con sección geométrica del núcleo 30 cm^2 . Se quiere construir, aprovechando este circuito, un autotransformador monofásico de relación de transformación 220/110 V, 50 Hz. Se considera la sección neta del núcleo el 90% de la sección geométrica. Admitiendo una inducción máxima en el núcleo de 1,2 T y una densidad de corriente en los conductores de 3 A/mm^2 . Calcular considerando el autotransformador ideal:

- Potencia propia aproximada.
- Intensidades en los devanados serie y común a plena carga.
- Diámetro de los conductores en los devanados serie y común.
- Número de espiras en los devanados serie y común.

Solución: a) 729 VA; b) $I_s = I_{\infty} = 6,63$ A; c) $d_s = d_{\infty} = 1,68$ mm; d) $N_s = N_{\infty} = 153$.

B.21. Se utiliza un transformador de tensión de 50 VA, 22 000/110 V, conectado por el primario a una línea de alta tensión. Si la tensión secundaria es de 100 V y la impedancia total de los circuitos de medida conectados al secundario es de 315Ω . Calcular:

- Tensión en el primario.
- Potencia aparente suministrada.

Solución: a) 20 000 V; b) 31,7 VA.

B.22. En un cuadro de medida de un centro de transformación se utiliza un transformador de intensidad de 30 VA, 1 250/5 A, que se conecta por el primario a una línea de corriente alterna. Si por el secundario circulan 4,9 A, calcular:

- Intensidad que circula por el primario.
- Impedancia máxima de los circuitos de medida conectados al secundario para no sobrepasar la potencia de precisión del transformador.

Solución: a) 1 225 A; b) 1,25 Ω



PROYECTO TÉCNICO

C.1. PROYECTO TÉCNICO

El proyecto técnico consiste en un conjunto de documentos que definen una obra a realizar, de forma que un técnico competente pueda dirigir, siguiendo estos documentos, las obras o trabajos proyectados.

Un proyecto técnico completo es un proceso que comprende varias fases, como estudio previo con anteproyecto, el proyecto en sí, ejecución de lo proyectado y comprobación del resultado.

Los proyectos técnicos se realizan de acuerdo con la legislación vigente, según la actividad que se proyecta. Se tramitan ante la Administración Pública competente y ante entidades no oficiales.

C.2. FASES DE UN PROYECTO TÉCNICO

El proyecto técnico puede ser un proceso complicado, que en algunos casos, como la realización de un aparato o construcción compleja, es necesario realizar en su totalidad. En la mayoría de los casos, como en una instalación eléctrica el proyecto se simplifica al poder prescindir de alguna de sus fases.

Las fases de un proyecto técnico completo son:

- 1) *Estudio previo*. Consiste en el análisis de los condicionantes de todo tipo (económicos, técnicos, etc.) que afectan al proyecto.
- 2) *Anteproyecto*. Consiste en realizar el diseño previo de soluciones posibles, realizando los cálculos pertinentes.

En algunos caso, como en la construcción de nuevos aparatos, se realizan prototipos, que se ensayan antes de realizar el proyecto definitivo.

Para tramitar ante la administración la solicitud de una obra se utiliza en ocasiones el *anteproyecto*, que consiste en un conjunto de documentos para definir en líneas generales una obra o trabajos a realizar, dando una idea de conjunto y el presupuesto aproximado. En el anteproyecto se utilizan los siguientes documentos:

- Memoria descriptiva.
- Planos a gran escala.
- Valoraciones aproximadas.

- 3) **Proyecto.** Consiste en la descripción del trabajo a realizar, con el cálculo técnico y económico.

El proyecto consta de los siguientes documentos:

- Memoria.
- Planos.
- Presupuesto.
- Pliego de condiciones.
- Estudio de seguridad y salud o estudio básico de seguridad y salud (según indique la legislación).

Las instalaciones eléctricas de A.T. para su ejecución y puesta en servicio necesitan presentación previa de proyecto.

En instalaciones eléctricas de B.T. la administración hace una clasificación de las instalaciones, según su complejidad y el riesgo de accidente, para su ejecución y puesta en servicio. Así, existen instalaciones que necesitan para su ejecución aprobación previa de proyecto, e instalaciones más simples que no necesitan proyecto y quedan definidas por el boletín de instalación redactado por el instalador autorizado (MIE BT 41).

- 4) **Tramitación.** El proyecto técnico se presenta al visado en el Colegio Profesional al que pertenece el técnico competente que lo confecciona. El visado consiste en un reconocimiento de la firma del técnico, observancia de los acuerdos sobre el ejercicio profesional y corrección formal de los documentos que integran el proyecto según la legislación vigente.

Una vez visado, el proyecto se presenta ante los órganos correspondientes de la Administración Pública y ante otras entidades no oficiales, a fin de obtener los permisos y licencias necesarios para la ejecución de la obra proyectada.

- 5) **Ejecución.** Consiste en la realización de la obra proyectada.

En algunos casos la adjudicación de la obra es por demanda de oferta, que se publica por medios diversos. Los organismos públicos suelen publicarla en los Boletines Oficiales. El que ofrece la ejecución de la obra debe cumplir los requisitos establecidos en el pliego de condiciones, lo que se compruebe en tras la apertura de plicas (pliego cerrado y sellado). Se firma un contrato (en el que figuran programa de realización, plazos, etc.) con el adjudicatario, que puede a su vez contratar la obra a terceros.

- 6) **Recepción.** Consiste en la comprobación de la obra o producto realizado, verificando que cumple las especificaciones de funcionamiento y demás características. Si las pruebas dan resultado satisfactorio se firma el acta de recepción.

C.3. DOCUMENTOS DEL PROYECTO TÉCNICO

■ Documentos del proyecto en general

Los documentos que definen técnicamente la obra a realizar y sus condiciones, según el proyecto, se presentan en forma de informes o de planos.

- 1) **Memoria.** Documento que contiene los datos básicos que han servido para la definición de la obra y la justificación de la solución técnica adoptada. Lleva al principio un índice, todas las páginas numeradas, y como mínimo consta de:

- Objeto del proyecto.
- Peticionario.
- Emplazamiento.
- Descripción de las instalaciones, según las reglamentaciones que deben cumplir.

Como anejos a la memoria se añaden otros documentos, como cálculos justificativos y otra documentación necesaria, que puede ser diversa según el tipo de proyecto (estudio medioambiental, estudio económico, etc.).

Al final de la memoria y de los anejos a la misma, figura la fecha, firma, nombre, apellidos del técnico proyectista y número de colegiado.

- 2) **Planos.** Los planos del proyecto tienen carácter vinculante, son documentos que ordenan ejecutar la obra tal como se define en ellos. Al principio se incluye un índice donde figuran los planos de que consta el proyecto numerados. Según el tipo de proyecto los planos son distintos:

- Planos de situación geográfica.
- Planos de emplazamiento.
- Planos de arquitectura (edificios).
- Planos de obra civil (movimientos de terreno, zanjas, etc.).
- Planos de estructuras y cimentaciones.
- Planos de instalaciones

Los planos deben estar perfectamente delineados, en papel normalmente de tamaño A-3 o A-4, con cajetín en todos ellos con la información siguiente: título del proyecto, situación de la obra, título del plano o esquema, petionario, número de plano, escala, fecha y autor del proyecto con su firma, nombre, apellidos y número de colegiado.

Los planos de formato superior al tamaño A-4 se pliegan de forma que quede a la vista un formato A-4 con el cajetín, según norma UNE 1027. Cada plano debe estar rotulado y acotado de forma que contenga toda la información necesaria de acuerdo con su destino, con referencias a otros planos, en caso necesario, para que todo el proyecto forme un conjunto coordinado.

3) *Presupuesto.* El presupuesto está desarrollado por capítulos independientes de la obra o unidades constructivas. En él se especifican todos los elementos a instalar y que figuran en el proyecto, necesarios para la puesta en servicio de la instalación, con los precios actuales en el mercado.
El presupuesto viene presentado en hojas numeradas, con columnas de la forma siguiente:

Nº de orden	Nº de unidades de obra o piezas	DESIGNACIÓN	IMPORTE	
			Precio de la unidad Pesetas	Total Pesetas

En el precio de las unidades constructivas se indica el total de material y mano de obra. A ello habrá que añadir gastos generales, beneficio industrial, impuesto (IVA), etc.
El importe total del presupuesto se suele indicar en números y en letra.
Al final del presupuesto figura la fecha y firma del técnico proyectista, nombre, apellidos y número de colegiado.

- 4) *Pliego de condiciones.* Es el documento que indica las condiciones de realización de la obra en los aspectos de materiales, planificación, ejecución y calidad. Vinculan a través del contrato y pliego de condiciones particular para cada contratista, al inversor y contratista o contratistas que intervienen en la obra.
El aspecto técnico de este documento debe acompañar todo proyecto; se llama *pliego de condiciones técnicas* y determina las condiciones mínimas aceptables para su ejecución:
- Características de los materiales a emplear con las condiciones que deben reunir y ensayos a los que deben ser sometidos, en caso necesario.
 - Programación de los trabajos a realizar para la ejecución de la obra, con las normas y precauciones a adoptar.
 - Normas para la elaboración de materiales de fábrica.
 - Normas técnicas para la recepción de la obra.
 - Forma de medir las distintas unidades de obra.

En ocasiones se incluyen en el pliego de condiciones otros aspectos, como plazos de garantía de las instalaciones, aplicación de fianzas, bases del concurso subasta (cuando sea necesario), recepción provisional, recepción definitiva, etc.
Al final del pliego de condiciones va la fecha, firma, nombre y apellidos del proyectista con su número de colegiado.

5) *Estudio de seguridad y salud.* En el proyecto debe incluirse un estudio de seguridad y salud (Real Decreto 1627/1997), que según el tipo de proyecto, duración estimada de las obras, etc. puede ser un estudio completo o un estudio básico.

El *estudio de seguridad y salud* consta, como mínimo, de los siguientes documentos:

- Memoria descriptiva. Contiene las descripción de equipos y medios auxiliares a utilizar. Identificación de riesgos laborales que pueden ser evitados con las medidas técnicas necesarias. Identificación de los riesgos laborales que pueden reducirse con las medidas y protecciones necesarias. Descripción de los servicios sanitarios y comunes necesarios en la obra. Se tendrá en cuenta las condiciones del entorno en el que se realice la obra.
- Pliego de condiciones particulares. Con las normas y prescripciones aplicables a la utilización de máquinas y equipos preventivos.
- Planos. Con gráficos y esquemas de las medidas preventivas de riesgo.
- Mediciones. Con medidas de los elementos de seguridad y salud.
- Presupuesto. Cuantificación de gastos previstos para aplicación del estudio de seguridad y salud.

El *estudio básico de seguridad y salud* describe las normas de seguridad y salud aplicables a la obra, teniendo en cuenta las condiciones del entorno en el que se realice. Identificación de riesgos laborales que pueden ser evitados con las medidas técnicas necesarias. Identificación de los riesgos laborales que pueden reducirse con las medidas y protecciones necesarias.

Al final del estudio completo o del estudio básico de seguridad y salud va la fecha, firma, nombre y apellidos del proyectista con su número de colegiado.

■ **Documentos del proyecto de una línea aérea de M.T.**

El proyectista de una línea eléctrica conoce el punto al que hay que suministrar energía eléctrica. Para conocer el punto de entronque con otra línea de distribución o centro de transformación, debe consultar con la empresa suministradora.

Después de conocer los extremos de la línea, se elige la traza más conveniente por donde va a efectuarse el tendido. Es necesario el permiso por escrito de los propietarios del terreno donde se van a colocar los apoyos. En caso necesario se puede proceder a la expropiación forzosa de los terrenos que ocupan los apoyos.

El Reglamento de Líneas Eléctricas Aéreas de A.T. indica los documentos de que debe constar el proyecto. Basándose en ello se utilizan los documentos siguientes:

- 1) *Memoria.* con los siguientes apartados:
- Antecedentes y objeto de la línea.
 - Titular de la instalación.

- Situación.
 - Trazado, indicando las provincias y términos municipales afectados.
 - Relación de cruzamientos y paralelismos.
 - Descripción de la instalación, indicando características y materiales.
- 2) *Cálculos*. Contiene los cálculos eléctricos y mecánicos, con:
- Cálculo eléctrico del conductor y aislamiento.
 - Cálculo mecánico del conductor, aisladores, apoyos y crucetas
 - Cálculo de la cimentación.
- 3) *Planos*. Deberán especificar los aspectos siguientes:
- Situación, de forma que el emplazamiento de la línea quede perfectamente definido..
 - Perfil longitudinal y planta de la línea, con escala mínima horizontal 1:2 000 y escala vertical 1:500.
 - Detalles de cruzamientos y paralelismos.
 - Tipos de apoyo y cimentación.
 - Detalles de aisladores, herrajes y tomas de tierra.
- 4) *Presupuesto*.
- Presupuesto general de la instalación. Con presupuesto de ejecución de las distintas unidades constructivas, incrementado con otros gastos administrativos, gastos generales, beneficio industrial y cualquier otro que proceda.
 - Presupuesto parcial de las partes afectadas por la intervención de diversos organismos.
- 5) *Pliego de condiciones*. A las condiciones técnicas se le añaden otras de tipo administrativo, cuando sea necesario según la legislación o lo requiera el propietario de la instalación.
- 6) *Estudio de seguridad o estudio básico de seguridad y salud*. Según la legislación sobre seguridad.

■ Documentos del proyecto de C.T. en edificio prefabricado

Antes de la confección del proyecto es necesario solicitar datos de la empresa suministradora de energía, que deberá facilitarlos (MIE RAT 19): tensión nominal de la red, nivel de aislamiento, intensidad máxima de cortocircuito trifásico a tierra y tiempos máximos de desconexión en caso de defectos. La documentación del proyecto debe cumplir la instrucción MIE RAT 20. Basándose en ella se utilizan los siguientes documentos:

1) *Memoria*

- Antecedentes y objeto del proyecto, con reglamentación y normativa considerada.
- Titular de la instalación.

- Emplazamiento.
- Características generales del C.T.: dimensiones, accesos, etc.
- Características de la instalación eléctrica: Celdas, transformador, cuadro de baja, alumbrado, red de tierras, protecciones, etc.
- Características de la línea subterránea de alimentación.

2) *Cálculos*

- Intensidades de corriente de cortocircuito en M.T. y en B.T.
- Cálculo de la línea de alimentación al C.T.
- Cálculo del embarrado.
- Cálculo de la ventilación necesaria.
- Cálculos del sistema de puesta a tierra.

3) *Planos*

- Plano de situación.
- Entronque y línea subterránea de M.T.
- Planos del C.T.: excavación, vistas de alzado, planta, frontal y lateral.
- Esquemas unifilares de la línea y del C.T.
- Sistemas de puesta a tierra.

4) *Presupuesto*

- Cuantificación de la cantidad de cada una de las unidades constructivas para el precio final de ejecución de la obra.
- Presupuesto general. Al de la ejecución del proyecto se le añaden otros gastos, como gastos generales, beneficio industrial y cualquier otro que proceda.

5) *Pliego de condiciones*. Además del pliego de condiciones técnicas puede llevar otras condiciones de tipo general cuando sea necesario según la legislación o lo requiera el propietario de la instalación.

6) *Estudio de seguridad o estudio básico de seguridad y salud*. Según la legislación sobre seguridad.

■ Documentos del proyecto de instalaciones eléctricas de B.T.

Las instalaciones eléctricas de B.T. son muy variadas según sean en viviendas, en edificios singulares o instalaciones industriales. En el proyecto de instalaciones industriales se utilizan los documentos siguientes:

1) *Memoria*

- Antecedentes y objeto del proyecto, con normativa considerada.
- Titular de la instalación.
- Situación.
- Clasificación y características de las instalaciones.
 - Clasificación según el riesgo de las dependencias

- Características: canalizaciones, identificación de los conductores, receptores, protecciones, etc.
- Necesidades de potencia.
 - Potencia instalada en fuerza y alumbrado.
 - Contadores de energía y potencia a contratar.
- Descripción de la instalación.
 - Instalaciones de enlace.
 - Instalaciones receptoras de fuerza y alumbrado.
 - Instalación de puesta a tierra.
 - Otras instalaciones: señalización, alumbrados especiales, compensadores de reactiva, etc.
- Programa de ejecución de la instalación.

2) Cálculos

- Cálculos de las canalizaciones y protecciones de fuerza y alumbrado.
- Cálculos luminotécnicos.
- Cálculo de puesta a tierra.

3) Planos

- Plano de situación
- Plano general de la industria con ubicación de los receptores.
- Esquema unifilar completo, indicando potencias de los receptores y características de canalizaciones y protecciones.
- Esquema de puesta a tierra.

4) Presupuesto

- Presupuesto de los elementos que constituyen la instalación, con cantidad y precio de los mismos, totalizando el importe general de ejecución de obra. Se le suele añadir un 1,5% de gastos imprevistos justificables.
- Presupuesto general. Al presupuesto de ejecución se le añaden los gastos generales y el beneficio industrial, realizándose a continuación el IVA del total.

5) *Pliego de condiciones.* Cuando sea necesario según la legislación o lo requiera el propietario de la instalación, además del pliego de condiciones técnicas se confecciona el pliego de condiciones generales.

6) *Estudio de seguridad o estudio básico de seguridad y salud.* Según la legislación de seguridad.

C.4. TRAMITACIÓN DE LOS PROYECTOS TÉCNICOS

Terminado y visado el proyecto técnico, se necesita la tramitación ante los organismos oficiales para la obtención de licencias y permisos de obra, de acuerdo con la legislación vigente.

La licencia para la ejecución de la obra, que debe estar de acuerdo con el Plan de Urbanización y con las Ordenanzas Municipales, se solicita del Ayuntamiento.

La autorización para una nueva instalación o modificación de una instalación eléctrica corresponde al Ministerio de Industria y Energía o al organismo competente de la Comunidad Autónoma, ante el que se tramita la autorización.

Según el tipo de proyecto es necesario solicitar permisos de otros organismos Administrativos o de entidades privadas. Las instalaciones eléctricas deben tramitarse ante la empresa suministradora de energía, que tiene sus normas particulares aprobadas por el Ministerio de Industria y Energía o por los organismos competentes de la Comunidad Autónoma.

C.5. ESTUDIO PREVIO DEL PROYECTO DE UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN

Antes de iniciar el proyecto de ejecución de una instalación eléctrica, es necesario un estudio previo, que consiste en una observación de las características técnicas con una serie de referencias, necesarias para iniciar el diseño de la instalación.

Antes de realizar un diseño previo es necesario conocer los receptores a instalar, para establecer la demanda de potencia y necesidades de suministro de energía.

■ Receptores a instalar

En los receptores hay que tener en cuenta:

- 1) *Alimentación.* Los receptores pueden ser monofásicos o trifásicos y estos alimentados por las tres fases o por las tres fases y el neutro. Es necesario tener en cuenta si la instalación va a necesitar *suministro de reserva y sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI)*.
- 2) *Tensión, intensidad y factor de potencia.* Datos que se obtienen de su placa de características nominales.
- 3) *Motores.* Es necesario tomar nota de los dispositivos de arranque y tener en cuenta que para su alimentación se prevé un incremento de corriente del 25% del consumo del mayor motor alimentado por la línea, según el R.B.T. instrucción MIE BT 034.
- 4) *Lámparas de descarga.* Tienen elementos auxiliares de arranque y funcionamiento. En el dimensionamiento de la línea de alimentación, para tener en cuenta el consumo de los elementos auxiliares (MIE BT 032), se incrementa su potencia de consumo en un 80%.

■ Demanda de potencia

En la demanda de potencia de una instalación se presentan dos casos:

- 1) *Receptores conocidos.* Cuando las características de los equipos a instalar son conocidas, la demanda de potencia se obtiene de la potencia nominal.

En general, según el uso a que se destine la instalación, la suma de la potencia de los receptores viene afectada por un coeficiente de simultaneidad, que suele variar entre 0,4 y 0,9.

En muchos casos no se considera factor de simultaneidad sobredimensionando la instalación, para posibles ampliaciones.

Para líneas de tomas de corriente se suele tomar un factor de simultaneidad entre 0,1 y 0,3.

- 2) *Receptores desconocidos*. Si los receptores a instalar son de características desconocidas por el proyectista, se parte para la demanda de potencia, del uso del local y de su superficie.

■ Suministro de energía

Según la potencia prevista de consumo, es necesario solicitar de la empresa suministradora de energía datos sobre punto de conexión de la acometida en baja o media tensión. Si la acometida es en M.T. hay que solicitar datos para el proyecto del centro de transformación.

■ Diseño previo

En el inicio del diseño de la instalación se realizan las siguientes fases:

- 1) *Situación de los receptores*. Es necesario situar sobre un plano los emplazamientos de los elementos a instalar, receptores, cuadros de protección y centro de transformación si fuera necesario.
- 2) *Trazado de canalizaciones*. Sobre un plano se trazan los recorridos de las canalizaciones que enlazan los distintos elementos de la instalación. El tipo de distribución influye en el número de conductores en las canalizaciones en B.T. (el esquema más utilizado suele ser TT).
- 3) *Elección de materiales*. Se eligen los materiales que configurarán la instalación, cables, apartamentas, tubos, etc. según el tipo de local y el uso a que se destina (locales de pública concurrencia, locales con peligro de incendio, con presencia de polvo, etc.).



SÍMBOLOS GRÁFICOS

SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN	SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN
NATURALEZA DE LA CORRIENTE			
	Corriente continua.		Corriente continua o corriente alterna indistintamente.
	Corriente alterna.		
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN			
	Corriente alterna de m fases y frecuencia f.		Neutro.
	Polaridad positiva.		Polaridad negativa.
LÍNEAS CONDUCTORES			
	Línea en general, un conductor o un grupo de varios conductores.		Línea de tres conductores en representación unifilar y multifilar.
	Circuito de corriente trifásica, 50 Hz, con tres conductores de 50 mm ² y el neutro de 25 mm ²		
TERMINALES Y CONEXIONES			
	Unión o conexión de conductores, especialmente unión fija.		Unión desmontable, borne.
	Derivación.		Conductores o canalizaciones cruzadas y conectadas.
	Terminal para cable.		
RESISTENCIAS, BOBINAS, CONDENSADORES Y OTROS ELEMENTOS			
	Variabilidad, símbolo general.		Resistencia en general.
	Resistencia no reactiva.		Resistencia en el caso de que no sea necesario especificar si es reactiva.
	Impedancia.		Inductancia.
	Reóstato.		Condensador.
			Tierra, toma de tierra.

SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN	SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN
	Masa, toma de masa.		Línea de separación o de marco.
	Elemento de pila o acumulador.		Batería de acumuladores.
SÍMBOLOS PARA ESQUEMAS EN EDIFICACIONES			
	Caja de llegada para alimentación general.		Cuadro de distribución con una canalización de entrada y tres de salida.
LÁMPARAS			
	Lámpara de señalización.		Lámpara de descarga.
			Lámpara en general.
TOMAS DE CORRIENTE			
	Base de toma de corriente de poco consumo.		Base de toma de corriente con contacto de protección (por ejemplo: conexión a tierra).
MANDOS MECÁNICOS			
	Sentido del esfuerzo o del movimiento de rotación hacia la izquierda.		Sentido del esfuerzo o del movimiento de traslación hacia la derecha.
	Acoplamiento mecánico.		Enclavamiento mecánico.
APARATOS DE CONEXIÓN Y PROTECCIÓN			
	Interruptor unipolar.		Conmutador bidireccional.
	Conmutador de cruce.		Interruptor seccionador.
	Seccionador fusible.		Órgano de mando con devanado único.
	Órgano de mando de relé térmico.		Órgano de mando con desconexión por máxima corriente.

SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN	SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN
	Órgano de mando con pasada retardada a la posición de trabajo.		Contactor con relé térmico.
	Órgano de mando con pasada retardada a la posición de reposo.		Interruptor automático con disparadores magnetotérmicos.
	Pararrayos autoválvula.		Interruptor tripolar en representación unifilar y multifilar.
	Pulsador que desconecta al pulsar.		Fusible, cortacircuito.
	Pulsador que establece contacto al pulsar.		Interruptor de protección de corriente máxima.
	Interruptor automático.		Interruptor de protección contra defecto de aislamiento. Diferencial.
	Seccionador tripolar.		
MODO DE CONEXIÓN DE LOS DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA			
	Devanado trifásico, conexión V.		Devanado trifásico, conexión en triángulo.
	Devanado trifásico, conexión en estrella.		Devanado trifásico en zig-zag.
MAQUINAS ELÉCTRICAS			
	Devanado en general, devanado de excitación en paralelo o independiente.		Devanado serie.
	Devanado de conmutación o compensación.		Generador de corriente continua. Símbolo general.
	Motor de corriente continua. Símbolo general.		Generador de corriente alterna. Símbolo general.
	Motor de corriente alterna de colector, monofásico serie.		Escobillas sobre colector.

SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN	SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN
	Motor de corriente alterna. Símbolo general.		Alternador trifásico.
	Motor sincrónico.		Motor de inducción trifásico con rotor en cortocircuito.
	Motor de inducción trifásico con rotor bobinado.		Motor monofásico con rotor en cortocircuito.
	Motor de inducción trifásico con rotor en cortocircuito y con seis bornes de salida del estátor.		Motor de polos conmutables. Dos velocidades.
	Transformador.		Autotransformador.
	Transformador cuando es preciso indicar la presencia de núcleo ferromagnético.		Transformador monofásico. (6 000/240 V, 100 kVA, 50 Hz, tensión de cortocircuito 4%).
	Transformador trifásico. (60 000/20 000 V, 4 000 kVA, 50 Hz, tensión de cortocircuito 6,4%; conexión: estrella-triángulo).		Autotransformador trifásico; conexión: estrella.

SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN	SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN
	Transformador de tensión.		Transformador de intensidad.
APARATOS DE MEDIDA			
	Aparato indicador. Símbolo general.		Aparato registrador. Símbolo general.
	Contador. Símbolo general.		Tensión de ensayo 500 V.
	Tensión de ensayo 2 kV.		Posición de empleo vertical.
	Posición de empleo horizontal.		Posición de empleo inclinada el ángulo indicado respecto a la horizontal.
	Clase del aparato.		Aparato de bobina móvil e imán fijo.
	Aparato de bobina móvil e imán fijo con rectificador.		Aparato de hierro móvil.
	Aparato electrodinámico.		Aparato ferrodinámico.
	Aparato de inducción.		Aparato de lengüetas vibrantes.
	Corrector de cero.		Voltímetro.
	Amperímetro.		Watímetro.
	Frecuencímetro.		Óhmetro.
	Galvanómetro.		Contador de energía activa.
	Reloj.		Contador de energía reactiva.

BIBLIOGRAFÍA

- ADAE, *Curso sobre el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión*, Paraninfo, Madrid, 1989.
- AENOR, *Manual de cables para baja tensión*, AENOR, Madrid 1993.
- ARIZMENDI, L. J., *Cálculo y normativa básica de las instalaciones en los edificios*, Revista Electra, N° 41, pp. 63-81, N° 42, pp. 123-134, N° 43, pp. 45-51, Madrid, 1990.
- BENSON, F. A., *Problemas de circuitos eléctricos con soluciones*, Paraninfo, Madrid, 1972.
- BLANCA, V., *Instalaciones eléctricas en baja tensión*, Servicio de Publicaciones UPV, Valencia, 1996.
- BOIX O., RULL, J., *Instal·lacions Elèctriques*, Ediciones UPC, Barcelona, 1996.
- CHECA, L. M., *Líneas de Transporte de Energía*, Marcombo, Barcelona, 1973.
- CONTE, G., *Impianti elettrici*, Hoepli, Milán, 1992.
- CORTÉS, M., *Proyecto de Centros de Transformación en Edificios y Fábricas*, Groupe Schneider, Barcelona, 1996.
- EVDOQUIMOV, F. E., *Electricidad básica*, Gustavo Gili, Barcelona, 1975.
- FOUILLÉ, A., *Problemas resueltos de Electrotecnia*, Montesó, Barcelona, 1972.
- FRAILE M., J., *Introducción a las instalaciones eléctricas*, Servicio de Publicaciones de Colegio de Ingenieros de Caminos, Madrid, 1993.
- GRUPO DE FORMACIÓN DE EMPRESAS ELÉCTRICAS, *Equipos de Medida para Baja Tensión*, Paraninfo, Madrid, 1995.
- GUERRERO, A., *Instalaciones eléctricas en las edificaciones*, McGraw Hill, Madrid, 1995.
- GUTHMAN, O. Y OTROS, *Manual de las instalaciones de distribución de energía eléctrica*, Urmo-Brown Boveri, Bilbao, 1983.
- HERING, P., *Canalizaciones, Material de Alta y Baja Tensión y Centrales*, Editorial Labor, Barcelona, 1968.
- IDAE, *Cuadernos de Eficiencia Energética en Iluminación*, IDAE-CEI, Madrid, 1996.
- LLORENTE, M., *Cables Eléctricos Aislados*, Paraninfo, Madrid, 1994.
- MARTÍN, F., *Instalaciones eléctricas*, UNED-Escuela de la Edificación, Madrid, 1996.
- MIE, *Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e instrucciones técnicas complementarias*, Centro de publicaciones del MIE, Madrid, 1997.
- MIE, *Reglamento de Verificaciones Eléctricas y Regularidad en el Suministro de Energía*, Paraninfo, Madrid, 1996.

MIE, *Reglamento sobre Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación*, Centro de publicaciones del MIE, Madrid, 1990.

MIE, *Reglamento de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión*, Centro de publicaciones del MIE, Madrid, 1989.

MINISTERIO DE LA VIVIENDA, *Instalaciones de Electricidad. NTE-IE*, Paraninfo, Madrid, 1996.

MORENO, J., *Cálculo de Líneas Aéreas de Alta Tensión*, Moreno Clemente, Málaga, 1997.

RAS, E., *Transformadores de potencia, de medida y de protección*, Marcombo, Barcelona, 1975.

RE, V., *Iluminación externa*, Marcombo, Barcelona, 1979.

RE, V., *Iluminación interna*, Marcombo, Barcelona, 1979.

RIERA, M. Y OTROS, *Tecnología eléctrica*, Servicio de Publicaciones UPV, Valencia, 1996.

TABOADA, J. A., *Manual OSRAM*, OSRAM, Madrid, 1975.

TOLEDANO, J.C., ORTIZ, J.M., *Tarifas eléctricas*, MacGraw Hill, Madrid, 1993.

TOLEDANO, J.C., MARTÍNEZ, J.J., *Puesta a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas*, Paraninfo, Madrid, 1977.

UNESA, *Método de Cálculo y Proyecto de Instalaciones de Puesta a Tierra para Centros de Transformación Conectados a Redes de Tercera Categoría*, UNESA, Madrid, 1989.

ZOPPETTI, G., *Redes eléctricas*, Gustavo Gili, Barcelona, 1972.

Otra obra del autor

publicada por

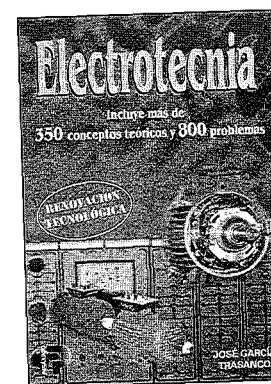
THOMSON
*
PARANINFO

ELECTROTECNIA.

José García Trasancos.

Esta obra recoge la amplia experiencia del autor en el campo de la enseñanza y permite al alumno comprender y saber aplicar con mayor facilidad la teoría y fundamentos de la electricidad. De gran utilidad para los profesionales que necesiten en su trabajo utilizar los conceptos y cálculos de la electrotecnia.

Índice extractado: Corriente continua. Electromagnetismo. Condensadores. Corriente alterna. Electrometría. Transformadores. Generadores de C.C. Motores de C.C. Máquinas síncronas. Máquinas asíncronas. Luminotecnia. Instalaciones de baja tensión. Fundamentos de electrónica. Números complejos en C.A. Reglamentación.



UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
BIBLIOTECA DE CAMPUS DEL AGRO

Otras obras de electricidad

publicadas por



Acometidas eléctricas. Legislación y ejemplos. *Toledano Gasca y Luna Alonso.*

Automatismos eléctricos, neumáticos e hidráulicos. *Cembranos Nistal.*

Automatismos y cuadros eléctricos. *Roldán Viloria.*

Baterías recargables. Manual de aplicaciones. *Equipo Técnico de Marketing de Gates Energy Products Inc.*

Bombas centrífugas. *Carnicer Royo y Mainar Hasta.*

Cables eléctricos aislados. *Llorente Antón.*

Cálculo y construcción de circuitos con contactores. *Roldán Viloria.*

Calefacción eléctrica. *Iberdrola.*

Centrales hidroeléctricas Conceptos y componentes hidráulicos. *Iberdrola.*

Diseño básico de automatismos eléctricos. *Ubieto Artur e Ibáñez Carabantes.*

Diseño de instalaciones eléctricas de alumbrado. *Trashorras Montecelos.*

El bus USB. Guía del desarrollador. *Xavier Fenand.*

El instalador electricista. Guía de negocios. *Llorente Antón.*

Electricidad frigorífica. *Godoy Arrébola.*

Electricidad industrial. Esquemas básicos. *Roldán Viloria.*

Electromagnetismo. Problemas de exámenes resueltos. *De Juana y Herrero.*

Electrotecnia. *Alcalde San Miguel.*

Electrotecnia. Equipos e instalaciones electrotécnicas. *Alcalde San Miguel.*

Electrotecnia. 350 conceptos teóricos. 800 problemas. *García Trasancos.*

Energías renovables. *Ortega Rodríguez.*

Equipos eléctricos autónomos. *Álvarez Pulido.*

Equipos microinformáticos y terminales de telecomunicación. *Berral Montero.*

Fórmulas y datos prácticos para electricistas. *Roldán Viloría.*

Gestión del desarrollo de instalaciones electrotécnicas. *Blanco Barragán.*

Instalaciones automatizadas en viviendas y edificios. *Moreno, Rodríguez y Lasso.*

Instalaciones básicas. *Fabregat, Fenollosa y Guaita.*

Instalaciones de baja tensión en edificios de viviendas. *Lagunas Marqués.*

Instalaciones eléctricas. Bricolaje. *Gallauriaux y Fedullo.*

Instalaciones eléctricas de alta tensión. *Navarro, Montañés y Santillán.*

Instalaciones eléctricas de alumbrado e industriales. *Martínez Domínguez.*

Instalaciones eléctricas de baja tensión. comerciales e industriales. *Lagunas Marqués.*

Instalaciones eléctricas de enlace y centros de transformación. *Toledano y Sanz.*

Instalaciones eléctricas para la vivienda. *Roldán Viloría.*

Instalaciones eléctricas para proyectos y obras. *López y Guerrero.*

Instalaciones singulares en viviendas y edificios. *Matilla Solís.*

Interferencias eléctricas handbook. *Ellis.*

La amenaza de los armónicos y sus soluciones. *Pérez, Bravo y Llorente.*

Líneas aéreas de media y baja tensión. *Bacigalupe.*

Lógica digital y microprogramable. *Serna y García.*

LOSEN. Ley de Ordenación del Sistema Eléctrico Nacional. *Ministerio Industria.*

Mantenimiento de máquinas eléctricas. *Manzano Orrego.*

Manual de los electrodomésticos. *Roldán Viloría.*

Manual de mantenimiento de instalaciones. *Roldán Viloría.*

Manual del electricista de taller. *Roldán Viloría.*

Más de 600 preguntas resueltas sobre el RITE. *Company Gironés*

Motores eléctricos. Accionamiento de máquinas. 30 tipos de motores. *Roldán Viloría.*

Motores eléctricos. Automatismos de control. *Roldán Viloría.*

Motores eléctricos. Variación de velocidad. *Roldán Viloría.*

Neumática, hidráulica y electricidad aplicada. *Roldán Viloría.*

Operario de instalaciones eléctricas de baja tensión. *Sanz y De la Sota.*

Perturbaciones armónicas. *Félice.*

Prevención de accidentes eléctricos. *Marco Sancho.*

Problemas de diseño de automatismos. *Ojeda Cherta.*

Problemas de electrotecnia 3. Circuitos con transformadores. *Orille, Alabern, Humet, Nadal y Serrano.*

Prontuario básico de electricidad. *Roldán Viloría.*

Proyectos eléctricos. Planos y esquemas. *Trashorras Montecelos.*

Proyectos para el desarrollo de instalaciones eléctricas de distribución. *Sanz y Toledano.*

Puestas a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas. *Toledano y Martínez.*

RBT. Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión. *Ministerio Industria.*

Reglamento electrotécnico de baja tensión. *Lagunas Marqués.*

Reparación y bobinado de motores eléctricos. *Martínez Domínguez.*

RVE. Reglamento de Verificaciones Eléctricas y Regularidad en el Suministro de Energía. *Ministerio Industria.*

Sistemas de seguridad. *Muñoz Guerrero.*

Sistemas electrotécnicos de potencia. *Velasco, Oriol y Otero.*

Sistemas polifásicos. *González y Toledano.*

Sistemas polifásicos. Ejercicios de aplicación. *González y López.*

Técnicas y procesos en las instalaciones automatizadas en los edificios. *Millán Esteller.*

Técnicas y procesos en las instalaciones eléctricas de media y baja tensión. *Sanz y Toledano.*

Tecnología eléctrica. *Martínez Domínguez.*

BOLETÍN DE PEDIDO

NOMBRE: _____

PRIMER APELLIDO: _____

SEGUNDO APELLIDO: _____

CALLE, AVDA., PLZA.: _____ N° _____ Pta. _____

CIUDAD: _____

CÓDIGO POSTAL: _____ PROVINCIA: _____

FECHA: _____

Le ruego me envíen los títulos que a continuación señalo:

Para su pago:

☐ Remito giro postal de _____ ptas.

☐ Adjunto cheque de _____ ptas.

☐ Envíen a reembolso con gastos a mi cargo.

☐ Efectúen cargo en tarjeta de crédito:

☐ VISA

☐ AMERICAN EXPRESS

Número _____

Titular _____

Fecha de caducidad _____

Firma del titular
de la tarjeta

THOMSON
★
PARANINFO

C/ Magallanes, 25 - 28015 MADRID
Tfno.: 91 446 33 50
e-mail: clientes@paraninfo.es
Telefax: 91 445 62 18