

Instal·lacions elèctriques

Oriol Boix Aragonès
Joan Rull Duran



Instal·lacions elèctriques

Oriol Boix Aragonès
Joan Rull Duran

Índex

Presentació	11
Normativa i sistemes de distribució	13
1- Normativa	13
1-1- Normes bàsiques	13
1-2- Altres normes	13
2- Generació i transport de l'energia elèctrica	13
3- Classificació de les tensions	14
3-1- Tensions emprades segons l'ús	14
4- Tipus d'instal·lacions	15
Defectes en un sistema trifàsic	17
1- Valors nominals	17
2- Sobrecàrrega	18
3- Curt circuit	18
4- Fuita a terra	18
Selecció de cables	19
1- Càlcul del corrent per fase	19
2- Coeficients a aplicar segons la forma d'instal·lació	20
3- Determinació de la secció pel criteri de màxim corrent	21
3-1- Secció del neutre	21
4- Determinació de la secció pel criteri de la màxima caiguda de tensió	21
5- Càlcul de la secció pel corrent de curt circuit	23
5-1- Càlcul del corrent de curt circuit	24

Compensació de l'energia reactiva	27
1- Justificació	27
2- Criteris de compensació	28
3- Tipus de bateries	29
4- Altres consideracions	29
Elements de maniobra	31
1- Interruptors i seccionadors	31
2- Característiques de qualsevol aparell de maniobra	32
3- Interruptor automàtic	32
4- Contactor electromagnètic	33
4-1- Circuit marxa-aturada	34
5- Consideracions per al cas de circuits trifàsics amb neutre	35
Protecció de persones i instal·lacions	37
1- Postes a terra	37
1-1- Postes a terra de referència	37
1-2- Postes a terra de protecció	37
1-3- Resistència del terreny	37
1-4- Mesura de la resistència d'un electrode	38
1-5- Instal·lació de postes a terra de protecció	39
2- Fusibles	39
2-1- Corba de fusió	40
2-2- Limitació	40
3- Relés tèrmics	40
3-1- Relés tèrmics compensats en temperatura	42
3-2- Relés tèrmics diferencials	42
4- Interruptor automàtic magnetotèrmic	42
5- Selectivitat	44
6- Interruptor de protecció diferencial	46
6-1- Màxima tensió de contacte	46
6-2- Principi de funcionament de l'interruptor diferencial	47
6-3- Relés diferencials	49
6-4- Selectivitat d'interruptors diferencials	49

Enllumenat viari	51
1- Classificació de les instal·lacions d'enllumenat	51
2- Normativa a aplicar	51
3- Fonaments físics de la llum	52
4- Característiques dels òrgans de visió humans	54
5- Caracterització de les fonts lluminoses	55
6- Components d'una instal·lació d'enllumenat viari	56
7- Fotometria	56
8- Efectes psico-fisiològics conseqüència de l'enllumenat	57
8-1- Efecte Talbot	57
8-2- Efecte estroboscòpic	57
8-3- Flicker	57
8-4- Fatiga	57
8-5- Contrast	57
8-6- Enlluernament	58
9- Paràmetres de qualitat i disseny d'una instal·lació	59
10- Càlcul del valor mig d'il·luminació de la calçada	62
10-1- Obtenció dels coeficients d'utilització	64
11- Fonts lluminoses artificials	67
11-1- Descàrrega elèctrica en un gas	67
11-2- Làmpades fluorescents	69
11-3- Làmpades de vapor de sodi a baixa pressió	71
11-4- Làmpades de vapor de sodi a alta pressió	72
11-5- Làmpades de vapor de mercuri a alta pressió	72
11-6- Làmpades d'halogenurs metàl·lics	73
11-7- Fluxs aproximats i tipus més habituals de làmpades	73
12- L·luminàries	74
13- Instal·lacions singulars	74
Càrregues no lineals	75
1- Definicions	75
1-1- Descomposició d'una ona distorsionada	75
1-1-1- Seqüència dels harmònics	77
1-2- Mesura de la distorsió	78
1-3- Potències	78
2- Elements generadors d'harmònics	79
2-1- Elements que contenen inductàncies saturables	79
2-2- Elements que treballen amb arcs de descàrrega	80
2-3- Equips electrònics	80
2-3-1- Rectificadors amb filtre inductiu	81

2-3-2- Rectificadors amb filtre capacitiu	82
2-3-3- Reguladors de tensió alterna	82
2-4- Aparició de tensions distorsionades	83
3- Efectes dels harmònics	83
3-1- Efectes sobre els motors	83
3-2- Efectes sobre les mesures de magnituds elèctriques	84
3-2-1- Errors en els comptadors d'energia	85
3-3- Efectes sobre els cables i altres sistemes de distribució	85
3-3-1- Corrent en el conductor neutre	86
3-4- Efectes sobre els transformadors de potència	87
3-4-1- Reducció de la intensitat segons ANSI/IEEE C57.110	88
3-4-2- Debanats en triangle	89
3-5- Efectes sobre els condensadors	89
3-5-1- Ressonància sèrie	89
3-5-2- Ressonància paral·lel	90
3-6- Efectes sobre els grups electrògens	90
3-7- Efectes sobre els equips electrònics	91
4- Filtres per a reduir el contingut d'harmònics	91
Problemes de selecció de cables	95
Problemes de compensació de l'energia reactiva	109
Problemes de protecció de persones i instal·lacions	113
Problemes d'enllumenat viari	123
Problemes de càrregues no lineals	125
Apèndix: Catàlegs	129

Presentació

Amb aquest text dedicat a les instal·lacions elèctriques completem la col·lecció iniciada amb les anteriors obres "Circuits elèctrics" i "Màquines elèctriques".

Tot i sabent que el contingut no és suficient per al disseny d'instal·lacions elèctriques complexes, volem facilitar els conceptes bàsics per tal que el lector esdevingui un bon usuari de les instal·lacions que, sens dubte, es trobarà a la vida professional.

S'inicia el desenvolupament amb temes referents al càlcul i protecció de les instal·lacions; tot seguit s'introdueixen conceptes bàsics de luminotècnia aplicats a l'enllumenat elèctric viari i finalitzant amb una visió general dels problemes, cada cop més freqüents, causats per la presència de càrregues no lineals en les instal·lacions.

Malgrat els esforços per evitar i corregir errors o imprecisions, som conscients que alguns no han estat detectats, per la qual cosa demanem avançadament disculpes i agraïm l'advertiment dels mateixos.

No volem acabar aquesta presentació sense agrair tant el suport dels companys de la Secció de Barcelona del Departament d'Enginyeria Elèctrica com la inestimable col·laboració d'en Francesc Suelves, na Maria Boix i n'Antoni Sudrià.

Els autors

Barcelona, abril 1992

Normativa i sistemes de distribució

1- Normativa

1-1- Normes bàsiques

- "Reglamento electrotécnico para Baja Tensión (MIE-RBT)" (BOE 9-10-1985 i 12-12-1985) "e Instrucciones complementarias (MIE-BT)" (Gener 1988)
- "Reglamento sobre Condiciones Técnicas y Garantías de Seguridad en Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación" (BOE 1-12-1982) "e Instrucciones Técnicas Complementarias (MIE-RAT)"
- NORMA UNE 20-460 (actualment en fase d'elaboració)

1-2- Altres normes

- "Reglamento de líneas aéreas de alta tensión"
- "Normas técnicas de edificación (NTE)"

2- Generació i transport de l'energia elèctrica

L'energia elèctrica és una energia secundària que s'obté a partir d'altres energies en les centrals generadores. Les centrals no tenen perquè estar properes a les àrees de consum (ciutats, indústries, etc.) i per això és necessari un sistema de transport eficient.

A Europa l'energia elèctrica es transporta en forma de sistema trifàsic simètric de corrent altern sinusoidal d'una freqüència de 50 Hz.

3- Classificació de les tensions

Segons reglaments: Baixa tensió (BT) \leq 1000 V
 Alta tensió (AT) $>$ 1000 V

Classificació en ús:

MBT \leq 50 V	molt baixa tensió
50 < BT \leq 1000 V	baixa tensió
1 kV < MT \leq 60 kV	mitja tensió
60 kV < AT \leq 275 kV	alta tensió
275 kV < MAT	molt alta tensió

3-1- Tensions emprades segons l'ús

Les centrals generadores acostumen a treballar a MT. A la sortida de les mateixes hi ha el parc de transformació que eleva la tensió fins a AT (o MAT en les grans centrals) a la qual treballen les línies de transport d'elevada potència.

S'intenta transportar l'energia en AT tant tros com sigui possible ja que així les pèrdues són menors. No oblidem que els usuaris demanen, en cada instant, una potència concreta. Aquesta potència implica un corrent que serà menor com més gran sigui la tensió. Com les pèrdues de la línia són proporcionals al quadrat del corrent; podem afirmar que les pèrdues, si la secció del conductor no varia, disminueixen quadràticament a l'augmentar la tensió.

En apropar-se a les zones de consum cal tornar a baixar la tensió fins a MT per adaptar-se a les tensions usuals dels consums.

A mitja tensió es connecten les empreses que tenen equips a aquestes tensions (grans motors, forns,...) o aquelles que tenen grans consums, les quals disposen de transformadors MT/BT propis.

Als petits consumidors cal arribar-hi en baixa tensió que s'obté mitjançant una estació transformadora (ET) de zona o de barri.

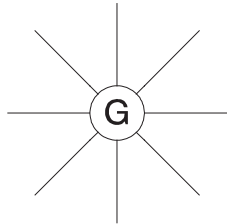
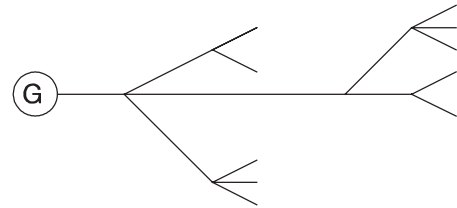
El neutre dels generadors i de la majoria dels transformadors s'acostuma a posar a terra per tal que el sistema de tensions no estigui surant sinó connectat a una referència comú a tothom. Si no es fes així les tensions respecte al terra i a altres elements circumdants podrien ser qualsevols, de manera que es faria difícil triar la tensió d'aïllament dels diferents elements de la instal·lació.

En els trams en què el transport és a MT o AT no es transporta el neutre. En passar a BT es fa aparèixer el neutre emprant transformadors que tenen el secundari en estrella, el centre de la qual es connecta al neutre i a terra.

En cada tram només es posa el centre de l'estrella a terra en un costat per tal d'evitar circulacions de corrent pel terra.

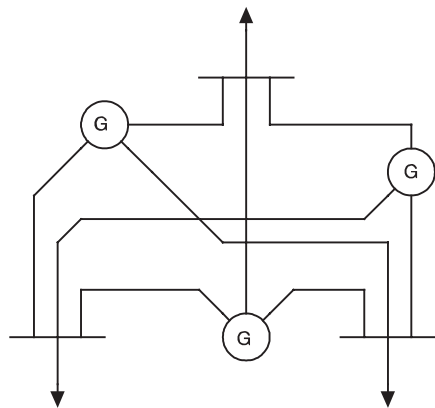
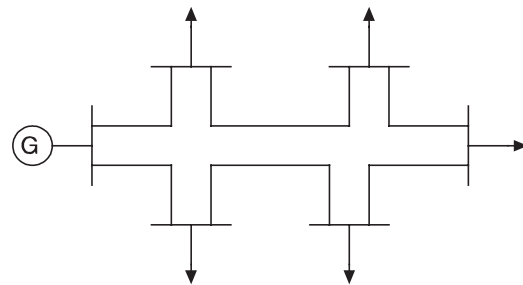
4- Tipus d'instal.lacions

- En arbre : d'un punt de sortida d'energia (generador, transformador,...) es fa sortir una línia que es va bifurcant per tal d'arribar als consums.



- Radials: d'un punt de sortida d'energia surten diverses línies cap als consums.

- En anell: d'un punt de sortida d'energia surten dues línies que van passant pels punts de consum un darrera l'altre fins a trobar-se tancant l'anell.



- Mallades: tots els punts de generació i consum estan units entre ells. A la pràctica el mallat total és inviable i es fa un mallat parcial.

Com més interconnexions hi ha, les garanties de subministre són més elevades i, en canvi, les proteccions són més complexes.

Dins cada regió el transport es fa habitualment en forma mallada. Les regions s'uneixen entre elles per unes poques línies.

Les grans distribucions es fan radials, fent que cada radi sigui un arbre.

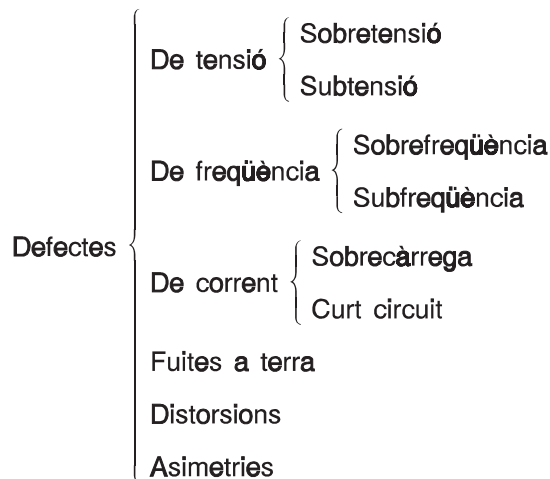
Les petites distribucions (per exemple urbanes en MT) es fan normalment en anell.

Les instal·lacions interiors d'edificis es fan en arbre.

Defectes en un sistema trifàsic

Entenem com a defecte la situació en que una instal.lació funciona en condicions diferents d'aquelles per a les que ha estat dissenyada.

Els defectes en un sistema trifàsic es poden classificar segons



Els defectes de tensió i de freqüència són habitualment competència de la companyia subministradora i, per tant, no els tractarem aquí.

1- Valors nominals

El valor nominal de qualsevol magnitud elèctrica (també anomenat valor assignat) per a un aparell és aquell per al qual s'ha dissenyat l'aparell; és a dir que treballant a aquest valor, la vida de l'aparell és infinita o suficientment llarga.

2- Sobrecàrrega

Circulació d'un corrent superior al nominal; entre el 110% i el 200% del nominal. Les sobrecàrregues vénen provocades pels següents motius:

- Connexió de més aparells del compte.
- Arrencada de motors i altres elements.
- Sobrecàrrega mecànica de motors.
- Avaries en motors connectats.

Les sobrecàrregues provoquen increments de temperatura en els conductors. El temps en què es pot admetre una sobrecàrrega depèn, segons la llei de Joule, de l'invers del quadrat del corrent.

$$Q = R I^2 t$$

on R és la resistència del conductor i Q el calor generat. Ja que per a un determinat increment màxim de temperatura ΔT del material que no el deteriora, calor acumulat és

$$Q = m C_e \Delta T$$

on m és la massa del material i C_e el seu calor específic; es pot deduir que

$$t = K I^{-2}$$

3- Curt circuit

Un curt circuit és un sobrecorrent molt elevat respecte al nominal de la instal·lació. Segons els casos es considera que hi ha un curt circuit a partir de $2.5 I_n$ a $15 I_n$. Ve provocat per la connexió a través d'una impedància molt petita de dues o més fases o d'una fase i el neutre.

En cas d'un curt circuit cal desconectar ràpidament ja que no solament hi ha l'efecte de l'escalfament sinó també els efectes electrodinàmics (força que s'exerceixen dos conductors pels quals està circulant un corrent molt fort).

4- Fuita a terra

Els sistemes elèctrics solen tenir el centre de gravetat del sistema de tensions referit a terra. Si pel motiu que sigui algun dels conductors actius (fases) entra en contacte amb el terra (a través d'elements de construcció, de persones, de carcasses o directament) es produeix una circulació de corrent de retorn per un lloc no previst (terra).

Les fuites a terra provoquen corrosió en els objectes metàl·lics enterrats o encastats en elements de la construcció. Si una fuga a terra circula a través d'una persona pot ésser perillosa o mortal, sobretot a partir d'uns 25 ÷ 30 mA. S'anomena **contacte directe** quan una persona toca un conductor actiu (fase). S'anomena **contacte indirecte** quan una persona toca un element que està en tensió per culpa d'un defecte (p.e. una carcassa).

Selecció de cables

L'elecció d'un cable per a una instal.lació suposa triar:

- Tipus d'aïllament: Bàsicament segons la resistència mecànica en funció de la forma d'instal.lació.
- Tensió nominal: En funció de les màximes tensions fase-fase i fase-terra de treball.
- Secció: En funció del corrent que ha de passar-hi i la màxima caiguda de tensió que admetem.

Per a tots els càlculs cal tenir en compte:

- Les normes vigents
- Les recomanacions del fabricant
- Altres consideracions que depenen de l'empresa que contracta la instal.lació, la companyia subministradora de l'energia i l'entitat que haurà de fer la inspecció.

Per al càlcul de les seccions es tenen en compte tres conceptes:

- Màxim corrent pel cable (característica tèrmica en règim permanent).
- Màxima caiguda de tensió admissible.
- Resistència tèrmica al curt circuit (característica tèrmica en règim transitori).

L'experiència recomana un procés de càlcul per fer-ho.

1- Càlcul del corrent per fase

Si S_{Ni} és la potència aparent nominal de cada consum que funciona alhora i U_N la tensió nominal, el corrent per fase nominal val

Consums monofàsics:

$$I = \frac{\sum_i S_{Ni}}{U_N}$$

Consums trifàsics:

$$I = \frac{\sum_i S_{Ni}}{\sqrt{3} U_N}$$

Consums en corrent continu:

$$I = \frac{\sum_i P_{Ni}}{U_N}$$

Com es pot veure no es consideren caigudes de tensió sinó que es fa suposant tensió nominal ja que només cal tenir una idea aproximada del corrent que ha de passar; a més, en prendre la tensió nominal ens decanem del costat de la seguretat ja que les tensions seran probablement menors.

Per a cada fase es sumen els corrents que l'afecten. Si no es preveu que totes les càrregues funcionin simultàniament, es considerarà el màxim corrent previsible. Es dimensionaran totes les fases iguals a aquella que hi passa més corrent, encara que s'intentarà que els consums siguin tan equilibrats com sigui possible.

Si s'han de sumar corrents alterns, es farà fasorialment tenint en compte que, si φ és l'angle del consum, serà

$$\underline{I} = I (\cos \varphi - j \sin \varphi)$$

2- Coeficients a aplicar segons la forma d'instal.lació

Aquests coeficients depenen de:

- Instal.lació a l'aire o enterrada
- Temperatura ambient
- Agrupació de cables i proximitat
- Temperatura màxima de l'aïllant (paper impregnat 65°, PVC 70°, EPR i PRC 90°)
- Forma de col.locació
- Natura del terreny (en cables enterrats)

Els coeficients vindran donats pel fabricant, i indiquen la reducció del corrent màxim admissible. Segons el nombre i forma de les taules facilitades pel fabricant, pot haver-hi més o menys coeficients.

3- Determinació de la secció pel criteri de màxim corrent

El fabricant facilita les taules de màxim corrent per a cada cable. Aquestes taules són per al cas en que tots els coeficients són 1. En un cas general la taula a emprar serà la del fabricant multiplicant cada un dels corrents pel producte dels coeficients.

Per simplificar la forma de treballar es calcula el corrent I' (anomenat corrent de selecció) a partir del corrent real (I) dividint aquest darrer pel producte dels coeficients.

$$I' = \frac{I}{\prod_i K_i}$$

En les taules cercarem quina és la mínima secció que pot aguantar el corrent I' . Aquesta serà la secció calculada pel criteri de màxim corrent.

3-1- Secció del neutre

El neutre pot ésser de secció meitat a les fases quan les seccions de fase són superiors o iguals a 25 mm² en coure o 35 mm² en alumini, la càrrega és bàsicament equilibrada i hi ha protecció de sobrecorrents al neutre (segons RBT¹).

Es recomana la mateixa secció en el cas de càrrega desequilibrada. Es recomana més secció en cas que gran part de la càrrega siguin circuits electrònics.

4- Determinació de la secció pel criteri de la màxima caiguda de tensió

En baixa tensió el RBT admet que, des de l'origen de la instal.lació:

$\Delta U < 1.5\%$	vivendes
$\Delta U < 3\%$	enllumenat general
$\Delta U < 5\%$	altres usos en general
$\Delta U < 0.5\%$	instal.lacions d'enllaç amb comptadors en la planta d'ús
$\Delta U < 1\%$	instal.lacions d'enllaç amb comptadors concentrats
$\Delta U < 1\%$	instal.lacions repartidores amb comptadors en la planta d'ús
$\Delta U < 0.5\%$	instal.lacions repartidores amb comptadors concentrats

En mitja tensió es recomana no superar el 7%.

¹ Amb excepcions. Per exemple, en instal.lacions d'enllumenat públic el neutre ha de ser de la mateixa secció que les fases (segons MIE BT 032).

La caiguda de tensió en un cable es calcula segons:

En trifàsic

$$\Delta U = \sqrt{3} |I(R + jX)| = \sqrt{3} I \sqrt{(R \cos \varphi + X \sin \varphi)^2 + (X \cos \varphi - R \sin \varphi)^2}$$

En monofàsic

$$\Delta U = 2 |I(R + jX)| = 2 I \sqrt{(R \cos \varphi + X \sin \varphi)^2 + (X \cos \varphi - R \sin \varphi)^2}$$

En corrent continu

$$\Delta U = 2 I R$$

on I és el corrent nominal, R i X són la resistència i la reactància totals del cable (en baixa tensió és habitual suposar $X = 0$) i $\cos \varphi$, $\sin \varphi$ corresponen a la càrrega. Sovint la caiguda de tensió és petita i es poden aproximar les anteriors expressions, sense un error significatiu, per

En trifàsic

$$\Delta U \approx \sqrt{3} I (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

En monofàsic

$$\Delta U \approx 2 I (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

La caiguda de tensió en tant per cent la calcularem segons

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_N} 100$$

Si la caiguda de tensió supera el límit cal agafar la secció immediata superior i comprovar si la caiguda compleix. En baixa tensió, atès que considerem el cable sense reactància, podem determinar quin és el màxim valor de resistència que fa admissible la caiguda de tensió. La secció mínima pel criteri de la caiguda de tensió serà la primera que tingui una resistència inferior a la calculada.

En moltes ocasions ens interessarà conèixer no tant sols la caiguda de tensió en cables, sinó en el conjunt d'una instal·lació que inclou transformadors. En aquest cas la caiguda de tensió en un transformador depèn dels paràmetres R_{cc} i X_{cc} del seu esquema equivalent,

$$R_{cc} = \epsilon_{cc}(\text{pu}) \frac{U_N^2}{S_N} \cos \varphi_{cc} \quad X_{cc} = \epsilon_{cc}(\text{pu}) \frac{U_N^2}{S_N} \sin \varphi_{cc}$$

per tant, amb les mateixes aproximacions que s'han comentat per als cables,

En trifàsic

$$\Delta U = \sqrt{3} \epsilon_{cc} (\text{pu}) \frac{U_N^2}{S_N} I (\cos \varphi_{cc} \cos \varphi + \sin \varphi_{cc} \sin \varphi)$$

En monofàsic

$$\Delta U = \epsilon_{cc} (\text{pu}) \frac{U_N^2}{S_N} I (\cos \varphi_{cc} \cos \varphi + \sin \varphi_{cc} \sin \varphi)$$

on U_N és la tensió nominal del costat on reduïm.

Per tal de fer-la sumable amb les altres caigudes amb les mateixes aproximacions que en el cable, atès que la reactància del transformador és molt més gran que la seva resistència, serà

$$R_{eq} = R_{cable} \qquad X_{eq} = X_{cc} + X_{cable}$$

En trifàsic

$$\Delta U \approx \sqrt{3} I (R_{eq} \cos \varphi + X_{eq} \sin \varphi)$$

En monofàsic

$$\Delta U \approx 2 I (R_{eq} \cos \varphi + X_{eq} \sin \varphi)$$

5- Càlcul de la secció pel corrent de curt circuit

En cas de curt circuit es considerarà que el calor no surt a l'exterior del cable (procés adiabàtic) ja que en un temps tant curt com el d'actuació de les proteccions de curt circuit no s'assoleix el règim permanent. Considerant el procés adiabàtic, en funció de l'aïllant (que ens fixa la temperatura màxima que podem assolir) i del conductor (calor específic o capacitat tèrmica) s'obté l'expressió

$$s (\text{mm}^2) \geq I_{cc} (\text{A}) \frac{\sqrt{t(\text{s})}}{K}$$

$$K = \begin{cases} 135 & \text{Cu / PRC i EPR} \\ 115 & \text{Cu / PVC i Goma} \\ 87 & \text{Al / PRC i EPR} \\ 74 & \text{Al / PVC i Goma} \end{cases}$$

Cal agafar la més gran de les seccions mínimes calculades pels tres mètodes (màxim corrent, màxima caiguda de tensió i curt circuit). En baixa tensió no es considera el curt circuit ja que la massa del cable és prou gran respecte de l'energia que s'involucra que fa que la temperatura no arribi a valors perillosos durant el temps que triguen les proteccions a actuar.

5-1- Càlcul del corrent de curt circuit

El corrent de curt circuit el calcularem segons

En trifàsic

$$I_{cc} = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(\sum_i R_i\right)^2 + \left(\sum_i X_i\right)^2}}$$

En monofàsic

$$I_{cc} = \frac{U_N}{2 \sqrt{\left(\sum_i R_i\right)^2 + \left(\sum_i X_i\right)^2}}$$

on R_i i X_i són les resistències i reactàncies dels cables transformadors entre el punt de tensió U_N i el punt de defecte.

En cas d'un transformador

$$R = \epsilon_{cc} \frac{U_N^2}{S_N} \cos \varphi_{cc} \qquad X = \epsilon_{cc} \frac{U_N^2}{S_N} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{cc}}$$

Si no es coneix φ_{cc} es pot suposar que $\cos \varphi_{cc} \approx 0$. Les R i X dels trams anteriors al punt de connexió (escomesa) es coneixen de forma indirecta a través de la potència de curt circuit. Es defineix S_{cc} com el producte de la tensió nominal pel corrent que circula en cas de curt circuit (en règim permanent) en el punt (i per $\sqrt{3}$ si és trifàsic). A partir de la potència de curtcircuit podem trobar el corrent de curt circuit i la impedància equivalent d'aquests trams, amb les expressions

En trifàsic

$$I_{ccA} = \frac{S_{ccA}}{\sqrt{3} U_N} \qquad Z_{ccA} = \frac{U_N}{I_{ccA}}$$

En monofàsic

$$I_{ccA} = \frac{S_{ccA}}{U_N} \qquad Z_{ccA} = \frac{1}{2} \frac{U_N}{I_{ccA}}$$

En corrent continu

$$I_{ccA} = \frac{P_{ccA}}{U_N} \quad R_{ccA} = R_{OA} = \frac{1}{2} \frac{U_N}{I_{ccA}}$$

Si interessa conèixer els valors de la resistència i la reactància equivalents als trams anteriors a l'escomesa i es coneix el factor de potència de curt circuit en el punt ($\text{Cos } \varphi_{cc}$) es pot aplicar

En trifàsic

$$R_{OA} = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}}}{I_{ccA}} \text{Cos } \varphi_{cc} \quad X_{OA} = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}}}{I_{ccA}} \sqrt{1 - \text{Cos}^2 \varphi_{cc}}$$

En monofàsic

$$R_{OA} = \frac{1}{2} \frac{U_N}{I_{ccA}} \text{Cos } \varphi_{cc} \quad X_{OA} = \frac{1}{2} \frac{U_N}{I_{ccA}} \sqrt{1 - \text{Cos}^2 \varphi_{cc}}$$

En cas que no es doni $\text{Cos } \varphi_{cc}$ es suposarà que aquest és 0 (reactància pura).

Compensació de l'energia reactiva

1- Justificació

La majoria dels consums absorbeixen corrents que no estan en fase amb la tensió. Imaginem una càrrega en la qual el desfàs entre corrent (I) i tensió (U) és φ . Aquesta càrrega converteix en potència útil el producte

Càrrega monofàsica

$$P = U I \cos \varphi$$

Càrrega trifàsica simètrica

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi$$

Per tant, el corrent I té una part útil $I \cos \varphi$ i una no útil $I \sin \varphi$. Ambdues components, però, circulen per les línies, transformadors, etc.

Si només circulés el corrent útil, les línies podrien ser de menor secció i els transformadors de menor potència aparent nominal i també disminuirien les caigudes de tensió; per tant interessa als usuaris i a la companyia subministradora que l'angle φ sigui proper a zero.

En els usuaris industrials la reactiva es penalitza en forma de recàrrec en el cost de l'energia activa, segons l'expressió:

$$r (\%) = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21$$

que dóna recàrrecs en el cost si $\cos \varphi < 0.9$ i bonificacions si $\cos \varphi > 0.9$. Si la càrrega té $\cos \varphi = 1$ la bonificació és del 4%. Això vol dir que es paga el preu de l'energia activa multiplicat per

$$1 + \frac{r(\%)}{100}$$

En els consums domèstics el recàrrec és fix (independent del factor de potència) i va inclòs en el preu de l'energia activa.

La solució per optimitzar la instal·lació i baixar el cost és generar energia reactiva, és a dir, instal·lar condensadors. Cal anar amb compte amb els següents punts:

- No hi ha condensadors de qualsevol valor que se'ns ocorri. A més, els condensadors tenen una tolerància de valor gran (5%, 10%,...).
- Està prohibit sobrecompensar, és a dir, una instal·lació no pot ser capacitiva.

2- Criteris de compensació

Els condensadors es poden col·locar

■ En cada aparell

Avantatges:

- Bona millora del $\cos \varphi$ ja que es pot fer un càlcul ajustat.
- Optimització de la instal·lació ja que es redueix el corrent a tota ella.
- Fàcil càlcul.

Inconvenients:

- Subutilització dels condensadors ja que mai estan tots els aparells connectats alhora.
- Car d'instal·lació i manteniment ja que cal anar aparell per aparell.

■ Per zones

Avantatges:

- Interessant en llocs on hi ha diverses màquines però habitualment només se n'empra una.
- Millor utilització dels condensadors.

Inconvenients:

- Només optimitza una part de la instal·lació ja que el tram de cada màquina no està compensat.

■ Global

Avantatges:

- Descarrega l'escomesa o el transformador.
- Òptima utilització dels condensadors.

Inconvenients:

- Complex mètode de decisió sobre el nombre de condensadors en cada instant.
 - No descarrega la instal·lació.
-

■ En alta tensió

Avantatges:

- Imprescindible en cas de motors o aparells de MT.
- Condensadors proporcionalment més econòmics.

Inconvenients:

- Aparamenta cara.
- No descarrega la instal·lació ni el transformador.

3- Tipus de bateries

- Fixes: tenen una capacitat constant (en kVAr). Es connecten en borns de la càrrega o conjunt de càrregues a compensar.
- A salts: tenen diversos condensadors que es poden anar connectant sota les ordres d'un controlador de $\cos \varphi$.

Habitualment s'empren els tipus:

- | | | |
|-----------|---|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 : 1 : 1 | → | Tots els graons iguals. |
| 1 : 2 : 2 | → | Un graó de meitat de potència i tots els altres iguals. Permet més precisió en l'ajust. |

4- Altres consideracions

En compensar grans motors amb arrencada estrella-triangle cal fer-ho amb un contactor addicional per als condensadors, que es connectarà quan el motor ja està en triangle.

- Les proteccions han de comptar amb el pic de corrent de connexió dels condensadors; per evitar que disparin intempestivament.
 - El condensador ha de portar (dins o fora) una resistència de descàrrega que, quan està sense tensió, el descarregui per sota dels 50 V en 1 min (cas de baixa tensió) o en 5 min (cas de mitja tensió).
-

Elements de maniobra

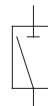
1- Interruptors i seccionadors

Anomenem **interruptor** a un aparell destinat a connectar circuits elèctrics pels quals, en connectar-los, circula corrent i desconnectar-los quan per ells està circulant corrent; per tant, és un aparell que connecta i desconnecta circuits en càrrega.



Si el circuit que s'interromp és de més d'un fil, cal que tots els conductors del circuit es tallin alhora.

Anomenem **seccionador** a un aparell destinat a connectar i desconnectar circuits elèctrics quan aquesta maniobra no suposa el pas o la interrupció del corrent. La característica més important del seccionador és que els contactes oberts o tancats han d'ésser perfectament visibles per qüestions de seguretat.



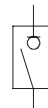
El seccionador, per la seva característica de tall visible, s'empra com a element de seguretat. Té l'inconvenient que en cas de fer una maniobra en càrrega pot ésser destruït. L'interruptor és l'element de connexió i desconnexió per excel·lència. Té els inconvenients que els contactes no són visibles i que el preu és més elevat que un seccionador. A vegades s'empren també els portafusibles com a seccionadors.

Es posen seccionadors en elements de potència que poden requerir manteniment (per exemple interruptors) de manera que puguin quedar aïllats. En instal·lacions mòbils de baixa tensió els seccionadors són els endolls.

En mitja i alta tensió és habitual que cada element tingui un seccionador a cada costat (línies, transformadors, interruptors,...).

Per evitar el risc que es pogués maniobrar un seccionador en càrrega, sovint un seccionador està enclavat amb un interruptor de manera que no es pot maniobrar el primer si el segon és tancat.

Els **interruptors-seccionadors** són interruptors amb visualització directa dels contactes oberts.



Els **seccionadors de posta a terra** són elements que s'empren, habitualment en mitja i alta tensió, per garantir la posta a terra dels elements de la instal·lació abans de la seva manipulació (per exemple per manteniment o reparació). Tenen la particularitat que el seu poder de tancament no és nul ja que en el moment de tancar ha de circular el corrent de descàrrega capacitiva de la instal·lació.

2- Característiques de qualsevol aparell de maniobra

- Tensió nominal: és aquella tensió en valor eficaç per la qual s'ha pensat que treballarà en règim permanent.
- Corrent nominal: és el màxim corrent en valor eficaç que pot deixar passar en règim permanent.
- Màxima tensió a freqüència industrial: és la màxima tensió a 50 Hz en valor eficaç que hi pot haver sense que s'envelleixi prematurament el dielèctric de l'aparell.
- Màxima tensió a ona de xoc: és la màxima tensió amb una ona de tipus llamp de curta durada i unidireccional en valor de pic que hi pot haver sense que s'envelleixi prematurament el dielèctric de l'aparell.
- Màxim corrent: és el màxim corrent que pot admetre en valor instantani, pel que fa a esforços electrodinàmics.
- Màxim corrent de curta durada: és el màxim corrent en valor eficaç un temps curt (p.e. en cas de curt circuit). S'ha d'acompanyar del temps que s'ha considerat (habitualment 1s o 3s).
- Poder de tall: és el màxim corrent que pot obrir correctament. En el seccionadors és teòricament nul, ni que sempre tenen un petit poder de tall residual. Els anomenats seccionadors en càrrega tenen un poder de tall residual reforçat.
- Poder de tancament: és el màxim corrent que admet que aparegui en l'instant de connectar. En els seccionadors és nul.

3- Interruptor automàtic

Interruptor amb poders de tall i tancament molt elevats. Dissenyat especialment per desconectar curts circuits; en cas de defecte ha d'ésser capaç de connectar sobre un curt circuit i desconectar immediatament sense fer-se malbé.



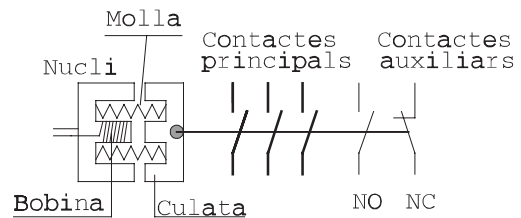
No s'ha de confondre un interruptor automàtic amb un interruptor amb maniobra elèctrica.

4- Contactor electromagnètic

Un contactor és un interruptor governat elèctricament amb una única posició estable. Això implica que quan s'alimenta el circuit de maniobra del contactor els seus contactes de potència (**contactes principals**) es tanquen i quan deixa d'alimentar-se els contactes s'obren. El fet que només tingui una posició estable és interessant ja que ens permet de fer automatismes, tal com comentarem més endavant.

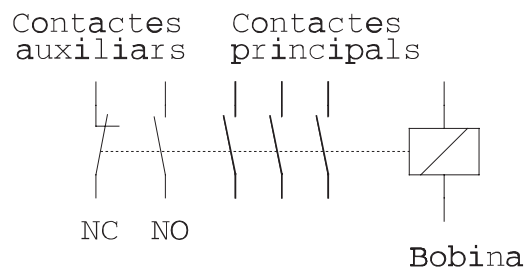
Atès que el principal motiu per emprar contactors és la possibilitat de realitzar automatismes, és habitual que els contactors portin, a més dels contactes principals (de potència) uns contactes auxiliars per a potències molt petites que serviran per a la realització dels automatismes.

Aquests **contactes auxiliars** són de dos tipus, els que es tanquen quan ho fan els principals, anomenats normalment oberts (**NO**, *normally opened*), i els que s'obren quan els principals es tanquen, normalment tancats (**NC**, *normally closed*). El nombre de contactes auxiliars és variable segons la marca i el model; en alguns casos es poden afegir contactes auxiliars segons les necessitats.



En les figures adjuntes es mostra el principi de funcionament d'un contactor i el seu esquema (els esquemes es dibuixen sempre en posició de repòs).

Quan per la bobina no circula corrent (posició de repòs o estable) la culata es manté separada del nucli per acció d'una o més molles; al mateix temps els contactes principals i els auxiliars normalment oberts són oberts i els auxiliars normalment tancats són tancats.

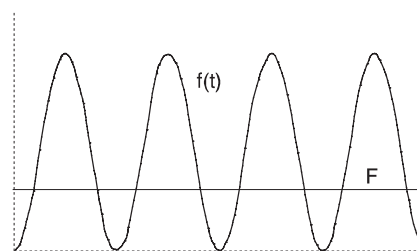


Quan per la bobina fem circular un corrent continu (posició de treball) el nucli es converteix en un electroimant que atreu la culata vencent la força de la molla (o molles); al mateix temps els contactes principals i els auxiliars normalment oberts es tanquen i els auxiliars normalment tancats s'obren. Si desconnectem la bobina el contactor torna a la posició inicial per acció de les molles.

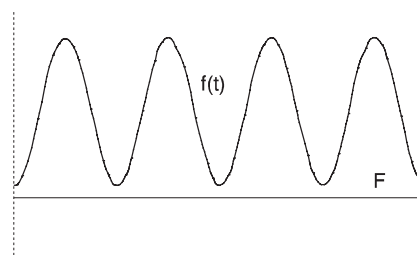
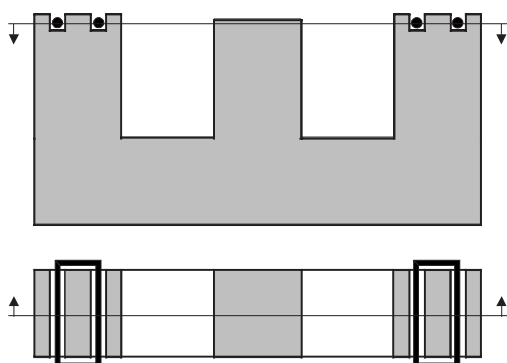
Habitualment les instal.lacions industrials solen treballar amb corrent altern, per aquest motiu hom desitjaria poder alimentar el contactor amb aquest tipus de corrent; això, però, dona problemes com veurem.

La força d'un electroimant sobre una peça no magnetitzada depèn del quadrat del corrent; en el cas de corrent sinusoidal la força serà del tipus sinus al quadrat i, per tant, sempre positiva. En la figura adjunta s'ha representat la força $f(t)$ d'un electroimant alimentat amb corrent altern sinusoidal.

Malgrat que aquesta força és sempre positiva, durant alguns instants és menor que la força F de la molla cosa que fa que el contactor alimentat amb corrent altern oscil·li i pugui arribar a cremar-se.



Per tal de solucionar aquest problema es col·loquen en el nucli del contactor les anomenades **espires d'ombra** que són uns anells de coure o alumini que es tanquen sobre una part de la secció del nucli. La presència de les espires d'ombra fa que en la part central de les branques laterals del nucli aparegui un segon flux magnètic decalat respecte al que passa per la perifèria d'aquestes branques. Per la branca central circula un flux igual a la suma dels altres dos. Això fa que la força de l'electroimant sigui proporcional a la suma dels tres fluxos i que, per tant, sempre superi la força de la molla com es veu a la figura adjunta.



S'anomena **relè** a un contactor que no té contactes de potència. Els relès s'empren com a complement als contactors en els automatismes. Algunes aplicacions poden ser memorització d'estats (planta destí d'un ascensor, número en comunicació en una centraleta telefònica, etc.) o per realitzar funcions lògiques.

Hi ha alguns relès especials com els relès de protecció (un d'ells, el relè tèrmic, el veurem més endavant) i els temporitzats.

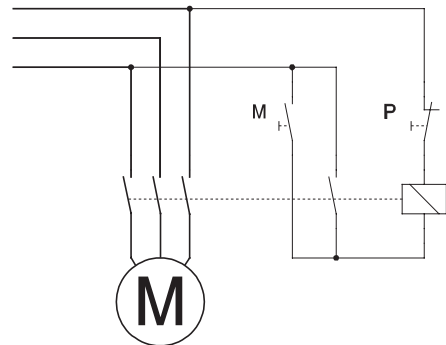
4-1- Circuit marxa-aturada

El circuit més senzill amb contactors i que s'empra sovint per a la connexió i desconexió d'algunes màquines és el circuit marxa-aturada, que és el representat a la figura següent.

Com es pot veure consta de dues parts, el circuit de potència (dibuixat amb línia gruixuda) que és el que alimenta la càrrega a través dels contactes principals i el circuit de maniobra (línia fina) que és el que realitza l'automatisme controlant l'alimentació de la bobina del contactor.

Si no premem cap dels dos pulsadors no pot passar corrent per la bobina i el contactor està en repòs, per tant el motor resta aturat. Si premem el pulsador de marxa (M) circularà corrent a través seu i de la bobina, això farà que el contactor canviï d'estat, els contactes principals es tanquen i també els auxiliars NO.

Si deixem anar el pulsador M el corrent continua circulant per la bobina gràcies al contacte NO, per tant el contactor continua indefinidament en estat de treball. El fet que l'alimentació d'un contactor depengui d'un contacte del propi contactor s'anomena **autoenclavament**. Si premem el pulsador d'aturada (P) el corrent a la bobina és interromput i el contactor torna a la posició de repòs en la qual romandrà fins que es torni a prémer el pulsador M.



Si interessa que la màquina pugui posar-se en marxa i aturar-se des de diversos punts només caldrà afegir més pulsadors de marxa i d'aturada. Cada pulsador de marxa ha de poder fer arribar corrent a la bobina, per tant caldrà posar-los tots en paral·lel. En canvi tots els pulsadors d'aturada han de poder tallar el corrent de la bobina i per això s'hauran de posar en sèrie.

S'anomena **enclavament** de dos contactors al fet que l'alimentació de l'un depengui, entre altres coses, de l'estat de l'altre.

5- Consideracions per al cas de circuits trifàsics amb neutre

En el cas de circuits trifàsics amb neutre cal tenir la precaució que mai estiguin les fases connectades i el neutre desconnectat ja que poden aparèixer tensions fase-neutre estranyes si la càrrega és desequilibrada. Hi ha tres formes de fer la connexió:

- Connectar simultàniament fases i neutre. El disseny de l'aparell ha d'ésser molt acurat.
- No desconnectar mai el neutre. Només recomanable si el neutre està posat a terra en origen.
- Desconnectar primer les fases que el neutre i connectar primer el neutre que les fases. Té menys probabilitat de mal funcionament. És el més recomanable i aquell que empren molts interruptors de protecció; per aquest motiu cal cablejar els interruptors seguint les indicacions que el fabricant dona sobre el contacte de neutre.

Protecció de persones i instal·lacions

1- Postes a terra

1-1- Postes a terra de referència

El terreny i els materials de construcció són conductors de corrent elèctric. Tots els éssers (animats o inanimats) excepte aquells que estan expressament aïllats, estan en contacte amb ells.

Els neutres de generadors i secundaris de transformadors acostumen a posar-se a terra ja que així les fases tenen, respecte al terra, una tensió coneguda. Si això no es fes així la tensió d'una fase respecte al terra podria ser qualsevol ja que, en no tenir referència, tot petit corrent que aparegui per acoblament inductiu o capacitiu, pot afectar aquesta tensió. La tensió fase-terra podria llavors superar la tensió fase-fase i, fins i tot, la tensió màxima del material.

1-2- Postes a terra de protecció

Si una persona toca una carcassa que, per un defecte d'aïllament, està a tensió (contacte indirecte) es veurà sotmesa a una tensió que pot ésser perillosa si provoca la circulació d'uns mil·liamperes pel seu cos. Si aquesta carcassa es connecta a terra, la tensió que apareixerà serà molt menor ja que la resistència del cos quedarà en paral·lel amb una molt més petita.

1-3- Resistència del terreny

El valor de la resistència que presenta una posta a terra no és per raó de fenòmens de conducció (com en els metalls o els líquids) per tant, no verifica l'equació

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

La resistència de la posta a terra és a causa d'un fenomen de difusió i, per tant, la seva variació amb la distància provocarà una distribució de tensions. Clavem a terra dos electrodes verticals, A i B, i els connectem a una font de tensió. Si anem clavant un tercer electrode, X, entre els altres dos i alineat amb ells i tracem el gràfic de la tensió entre X i B en funció de la distància entre X i B obtindrem la gràfica de la figura.

Com podem observar la variació de la tensió amb la distància només es produeix prop dels electrodes A i B; per la qual cosa podem considerar una resistència pròpia de cada un mentre que la resta de terra la podem considerar sense resistència atès que en aquesta part no hi ha caiguda de tensió.

Si dos electrodes estan prou allunyats, la resistència que oferiran al pas de corrent de l'un a l'altre serà la suma de les dues; independentment de la distància.

La resistència de l'electrode depèn de:

- Resistivitat del terreny
- Forma de l'electrode
- Mides de l'electrode
- Materials de l'electrode

Els electrodes més corrents són les piques (barres clavades verticalment) les malles horitzontals, les plaques verticals i els fils horitzontals; els tres darrers necessiten excavació per a poder enterrar-los. Els materials més habituals són acer recobert de coure i acer galvanitzat.

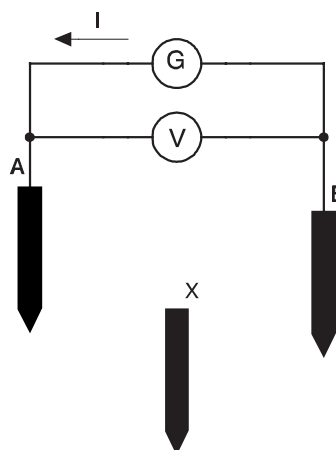
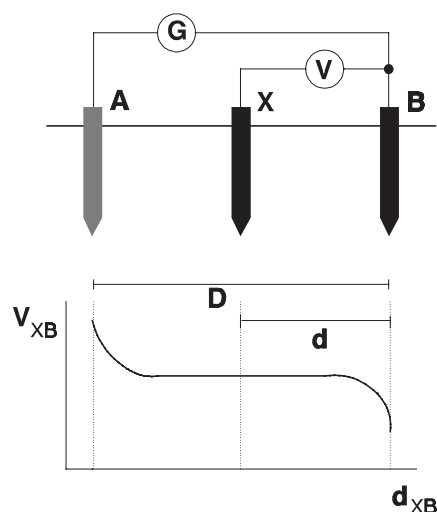
1-4- Mesura de la resistència d'un electrode

Es disposen dos electrodes (A i B) prou separats d'aquell (X) que volem mesurar de manera que no estiguin en línia recta. Es fan mesures de caiguda de tensió quan passa un corrent fix I per dos d'ells. Després es repeteix per tal de fer les mesures amb les tres parelles possibles.

$$R_{AB} = \frac{V_{AB}}{I} \quad R_{AX} = \frac{V_{AX}}{I} \quad R_{BX} = \frac{V_{BX}}{I}$$

$$\frac{V_{AX}}{I} = R_A + R_X \quad \frac{V_{BX}}{I} = R_B + R_X \quad \frac{V_{AB}}{I} = R_A + R_B$$

$$R_X = \frac{1}{2I} (V_{AX} + V_{BX} - V_{AB})$$

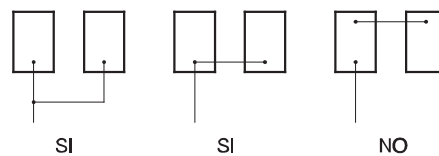


1-5- Instal.lació de postes a terra de protecció

Tots els elements conductors de l'estructura d'un mateix edifici han d'estar connectats a la mateixa posta a terra. Una posta a terra pot estar formada per diversos electrodes units entre si. Les postes a terra de les carcasses dels aparells elèctrics poden ser diferents si no és possible que un individu entri en contacte simultàniament amb totes dues.

Des de la instal.lació de posta a terra surten els conductors de protecció (normalment amb una funda a franges grogues i verdes) que connecten les masses, però:

- El conductor de protecció no es pot interrompre.
- Les carcasses no poden actuar com a conductor de protecció.



Els elements d'instal.lació d'aigua i gas s'han de posar a terra però no s'han d'emprar com a conductors ni d'electrodes de terra. La posta a terra d'un element es farà sempre per un únic punt de l'element.

2- Fusibles

El fusible és l'element més antic per a la protecció d'instal.lacions. Quan per una instal.lació circula un corrent que podria destruir algun dels elements de la mateixa, el fusible es fon abans, interrompent el pas del corrent i evitant els seus efectes destructius.

Bàsicament es tracta d'un fil o làmina pel qual circula el corrent. Aquest fil o làmina s'escalfa amb el pas del corrent. Si aquest corrent és elevat el fusible fondrà en un temps que depèn en forma quadràtica inversa de la intensitat.

$$E_{fusió} = R_{fusible} I^2 t$$

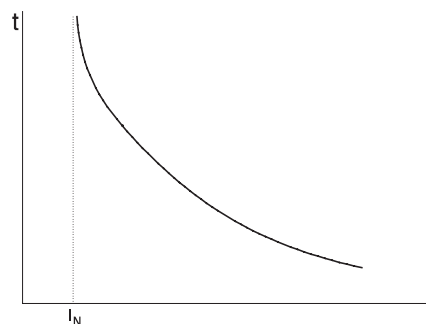
Si es produeix un curt circuit el fusible rebrà de cop l'energia de fusió i, per tant, fondrà quasi instantàniament.

Els seus valors característics són:

- Tensió nominal
- Corrent nominal
- Corba de fusió
- Corba de limitació
- Poder de tall

2-1- Corba de fusió

Gràfica que indica, per a un fusible concret, el temps de desconexió en funció del corrent. La figura adjunta n'és un exemple.

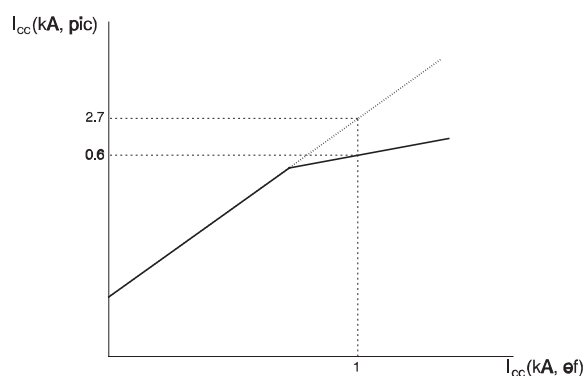


2-2- Limitació

Quan el corrent puja de valor (i no ha arribat al màxim) el fusible comença a fondre's; apareix un arc elèctric en el seu interior que té una caiguda de tensió, aquesta caiguda impedeix que el corrent segueixi creixent.

La corba de limitació ens dona el corrent màxim que hi haurà a partir del màxim que hi hauria si no hi hagués el fusible.

En la figura la línia gruixuda és la corba de limitació. Si, per exemple, el corrent de curtcircuit que hem calculat en valor eficaç és 1 kA, la màxima intensitat que circularia serien 2.7 kA en valor de pic però la limitació del fusible fa que el corrent no pugi més de 0.6 kA en valor de pic.



3- Relès tèrmics

És un element que s'empra normalment associat a un contactor per tal de protegir un aparell contra les sobrecàrregues.

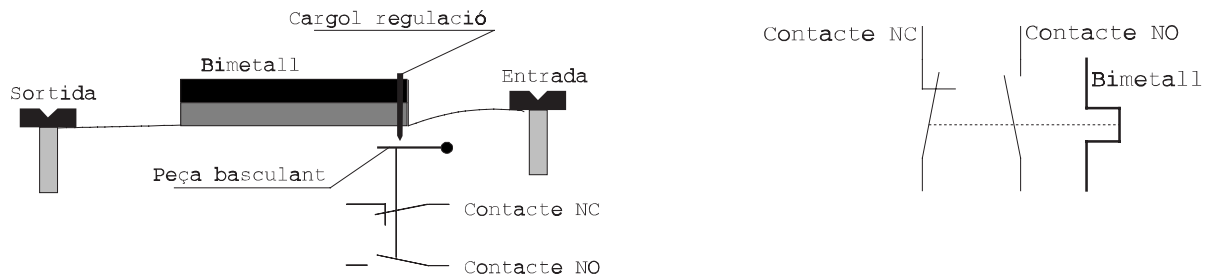
El seu principi de funcionament és un bimetall. Un bimetall està format per dues làmines iguals formades amb metalls diferents i soldades.



Si suposem que la superior es dilata més que la inferior sembla que en escalfar-se, la de dalt s'hauria d'allargar més que la de baix com es mostra a la part central de la figura però, a causa que estan soldades, això no és possible sinó que es dobleguen tal com es veu a la part inferior de la figura.

En un bimetall pel qual passi un corrent elèctric es produeix una corbatura que depèn de l'escalfament que aquest corrent li produeix.

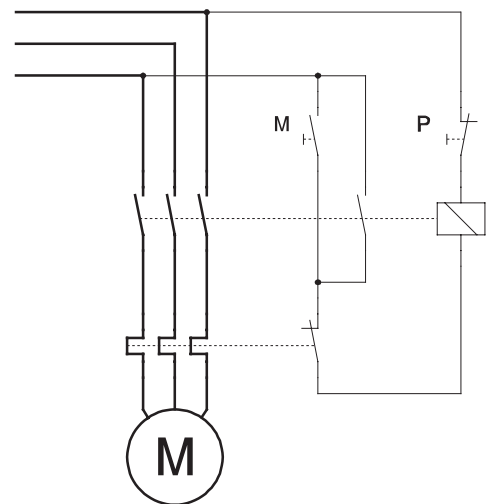
Les figures mostren el seu principi de funcionament i el seu esquema. L'esquema representat és monofàsic però habitualment són trifàsics.



Convé observar que el relè tèrmic no desconnecta la càrrega sinó que obre un contacte NC i tanca un NO atès que s'empra habitualment associat a un contactor.

S'anomena **guardamotor** a l'associació d'un contactor i un relè tèrmic. La figura adjunta mostra l'esquema d'un circuit guardamotor en què podem veure que en produir-se una sobrecàrrega s'obre el contacte NC del tèrmic i es desactiva el contactor provocant la desconexió del motor.

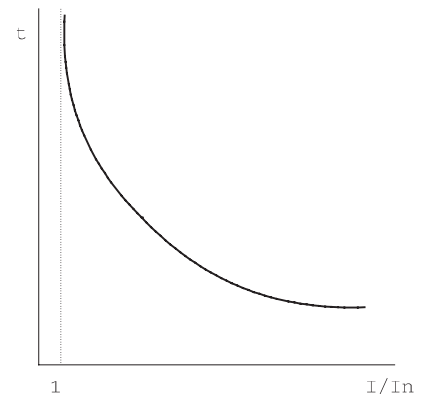
El contacte NO del tèrmic s'empra habitualment per encendre una bombeta pilot que ens indicarà que la desconexió ha estat provocada per una sobrecàrrega.



Si es produeix una sobrecàrrega, el bimetall es doblega fins que el cargol (que permet ajustar el temps de dispar del tèrmic) toca la peça basculant, moment en què es produeix la desconexió. El temps de desconexió és inversament proporcional al quadrat del corrent (Llei de Joule).

Com el seu funcionament es basa en la llei de Joule, el temps de desconexió dependrà en forma quadràtica inversa de la temperatura, tal com mostra la seva corba característica.

Convé observar que és habitual no graduar l'eix horitzontal en corrent sinó en corrent dividit pel corrent nominal o de regulació del tèrmic.



Els relès tèrmics no suporten ni poden desconnectar curts circuits. Cal acompanyar-los d'un element que protegeixi contra els curts circuits (per exemple uns fusibles).

3-1- Relès tèrmics compensats en temperatura

Imaginem-nos que tenim un relè tèrmic dins d'un armari amb altres elements. L'interior d'aquest armari probablement estarà a una temperatura més elevada que l'ambient. Això fa que quan el relè tèrmic desconnecti el motor estigui, probablement, a una temperatura relativament baixa. Per aquest motiu convé compensar l'actuació del relè tèrmic en funció de la temperatura del lloc on aquest està.

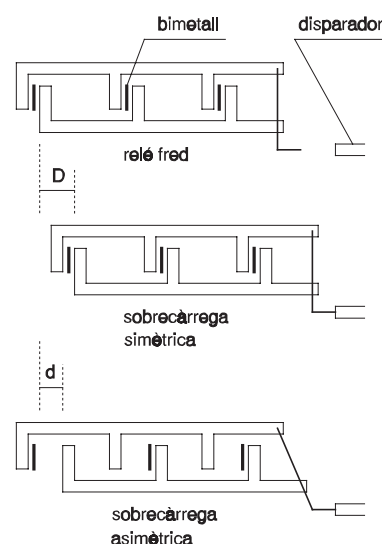
El relè tèrmic compensat en temperatura porta un bimetal·l addicional que compensa la sobretemperatura ambient de forma que l'actuació del tèrmic només depengui del corrent.

Cal anar amb compte, per exemple, si el relè tèrmic i el motor es troben en un mateix recinte petit ja que llavors l'escalfament de l'ambient probablement és provocat pel propi motor i llavors l'ús d'un relè tèrmic compensat en temperatura pot comportar la destrucció del motor.

3-2- Relès tèrmics diferencials

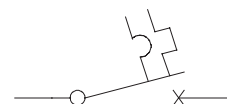
Quan en un dispositiu simètric (per exemple un motor) falla una fase, el seu corrent màxim per fase és menor, per tant, les sobrecàrregues seran a un nivell més baix de corrent.

Un relè tèrmic diferencial és un relè tèrmic que triga menys temps a disparar si la sobrecàrrega és asimètrica (2 fases) que si és simètrica (3 fases). El seu principi de funcionament es mostra a la figura on podem veure que amb una sobrecàrrega simètrica els bimetal·ls han de desplaçar-se una distància D per accionar el disparador mentre que si la sobrecàrrega és asimètrica només cal una distància $d < D$.

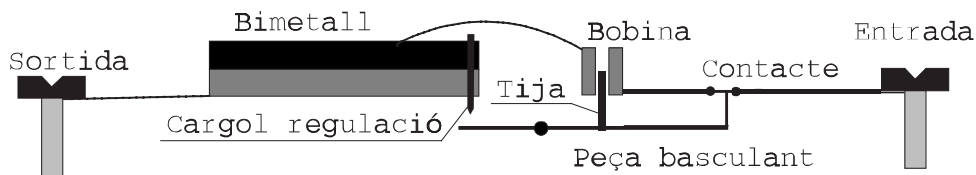


4- Interruptor automàtic magnetotèrmic

És un element dissenyat per a la protecció d'instal·lacions i aparells contra les sobrecàrregues i curts circuits. El seu esquema, per a un interruptor unipolar, és el de la figura.



El principi de funcionament de l'interruptor magnetotèrmic és el mostrat en la figura. El corrent entra per un dels borns i passa pel contacte que en funcionament normal és tancat, després passa per una bobina que té una tija mòbil en el seu interior i també per un bimetal·l; finalment surt per l'altre born.



Si es produeix una sobrecàrrega, el bimetall (part tèrmica) es doblega fins que el cargol (que permet ajustar el temps de dispar tèrmic) toca la peça basculant, moment en què es produeix la desconexió. El temps de desconexió és inversament proporcional al quadrat del corrent (Llei de Joule).

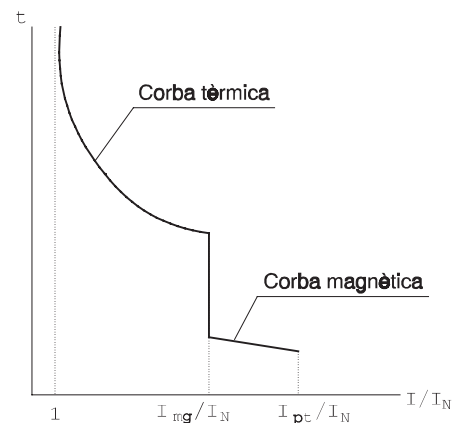
En cas de curt circuit el corrent que circula per la bobina (part magnètica) crea un camp magnètic suficientment fort com per atreure la tija, cosa que provoca la desconexió instantània. El corrent de desconexió magnètica sol estar entre 3 i 14 cops el corrent nominal, per tant en cas de sobrecàrregues molt fortes es produirà també la desconexió instantània.

Dins de l'interruptor hi ha una sèrie d'elements mecànics que provoquen la desconexió de l'interruptor encara que algú estigui subjectant la maneta. En els interruptors magnetotèrmics de més d'un pol (bipolars, tripolars, etc.) la sobrecàrrega o el curt circuit en un pol provoquen la desconexió en tots ells simultàniament.

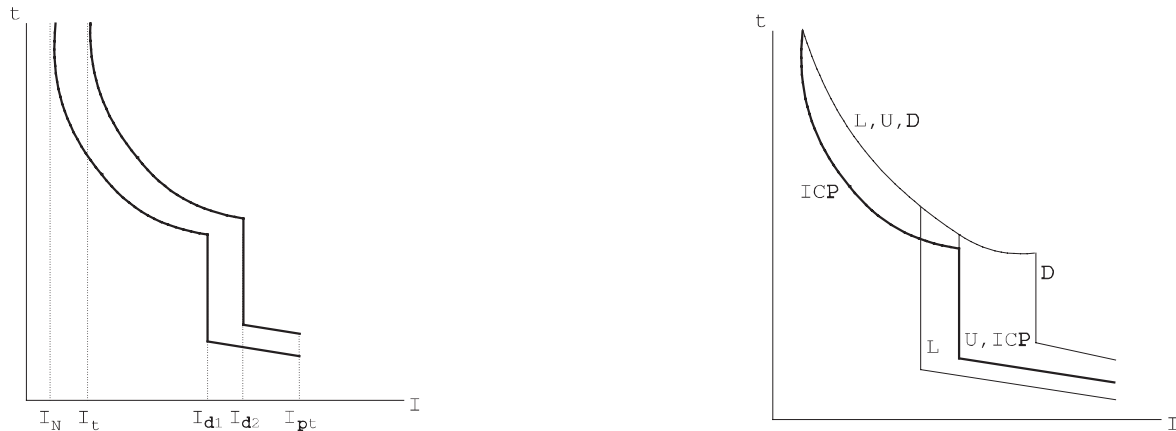
Les seves característiques són:

- Tensió nominal
- Corrent nominal
- Corba de disparament
- Poder de tall

La corba de disparament teòrica seria com la de la figura de l'esquerra on I_{mg} és el corrent de disparament magnètic, I_{pt} és el poder de tall i I_N el corrent nominal de l'interruptor.



A la pràctica la corba és doble deixant un marge a causa de les toleràncies de fabricació. Segons que sigui el que estem calculant emprarem la corba superior o la inferior. Així si volem saber el temps que la instal.lació haurà d'aguantar un curt circuit agafarem la superior (cas més desfavorable) mentre que si volem estar segurs que un motor pot arrencar sense provocar la desconexió agafarem la inferior.



I_t = corrent mínim de desconexió segura

I_{d1} , I_{d2} = límits del dispar magnètic

I_{pt} = poder de tall

Hi ha 4 corbes d'ús habitual

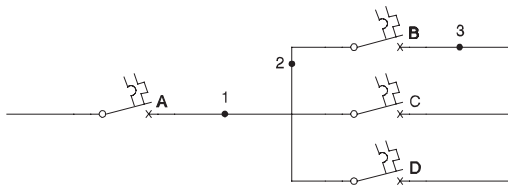
- La corba U és la normal. Té un dispar magnètic d'aproximadament $I_{d1} \geq 3.85 I_N$ i $I_{d2} \leq 8.8 I_N$.
- La corba L és la de nivell més baix. Té un dispar magnètic d'aproximadament $I_{d1} \geq 2.6 I_N$ i $I_{d2} \leq 3.85 I_N$. S'empra habitualment per protegir cables.
- La corba D està pensada per a elements amb corrents forts d'arrencada o de magnetització (motors, transformadors, etc.). Té un dispar magnètic de l'ordre de $I_{d1} \geq 10 I_N$ i $I_{d2} \leq 14 I_N$.

Aquestes tres corbes tenen aproximadament el mateix dispar tèrmic.

- La corba ICP (Interruptor de Control de Potència) té aproximadament el mateix dispar magnètic que la corba U però amb una corba tèrmica més pronunciada. És aquell que la companyia subministradora instal·la a la sortida dels comptadors per tal de limitar la potència consumida per la instal·lació.

5- Selectivitat

S'anomena així al fet que quan hi ha dos elements de protecció (per exemple magnetotèrmics o fusibles) en un circuit, en produir-se un defecte només actui el més proper al defecte. Per exemple en el circuit de la figura hi ha un magnetotèrmic general per a protegir la instal·lació i un magnetotèrmic més per a cada derivació. Anem a veure que passa si es produeix un curtcircuit.



Si el curt circuit és en 1 salta A

Si el curt circuit és en 2 salta A

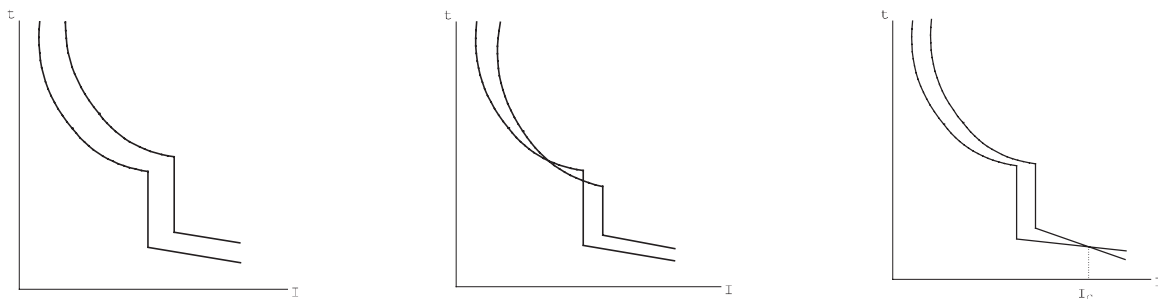
Si el curt circuit és en 3 salta B

Si això no es compleix no hi ha selectivitat. Una condició imprescindible per a que hi pugui haver selectivitat és que el calibre de A sigui més gran que el dels altres.

Per saber si hi ha selectivitat es superposen les corbes, tenint en compte que estan referides a corrents nominals diferents. Si no es tallen hi ha selectivitat. Si es tallen no hi ha selectivitat ja que en cas de curt circuit els interruptors poden disparar simultàniament o fer-ho el que no toca. Evidentment si els magnetotèrmics que fem tenen la corba desdoblada cal emprar la corba inferior del de calibre més gran i la superior del de calibre més petit.

Es diu que hi ha selectivitat parcial si només desapareixen simultàniament amb curts circuits molt grans. Això és interessant en dos casos:

- Equival a selectivitat total si el punt en què es tallen les corbes correspon a un corrent més gran que el curt circuit màxim de la instal.lació.
- En instal.lacions on la llargada del cable fa presuposar que la major part dels curts circuits seran amb corrent força inferior al màxim, cas en què la major part dels cops no hi haurà problemes de selectivitat.



En la figura de l'esquerra hi ha selectivitat total, a la del mig no hi ha selectivitat i a la de la dreta hi ha selectivitat parcial. Com es pot apreciar en la figura de la dreta només hi ha selectivitat quan $I < I_c$.

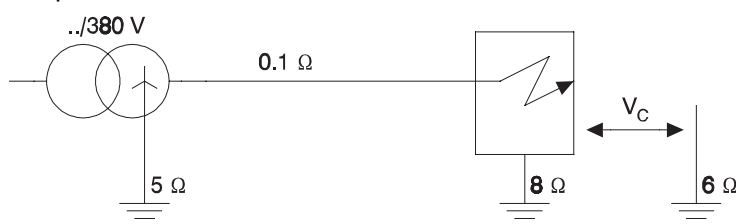
6- Interruptor de protecció diferencial

6-1- Màxima tensió de contacte

Les màximes tensions de contacte, és a dir, màximes tensions que poden aparèixer entre una carcassa posada a terra i terra a 1 m en cas d'un defecte fase-carcassa, estan limitades segons:

50 V	en ambients secs
24 V-25V	en ambients humits
12 V	en ambients molt humits o condicions especials.

Veiem un exemple:



$$I_d = \frac{380}{5 + 0.1 + 8} \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} = 16.75 A \quad V_C = 16.75 \cdot 8 = 134 V$$

Si posem un terra millor, p.e. 4 Ω , tindrem

$$I_d = \frac{380}{5 + 0.1 + 4} \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} = 24.11 A \quad V_C = 24.11 \cdot 4 = 96.43 V$$

Veiem que amb un terra millor la intensitat és més elevada.

Si posem un terra pitjor la intensitat serà més baixa i potser no detectarem el defecte (p.e. un magnetotèrmic de 20 A amb 16.75 no dispara mai).

Cal un aparell capaç de detectar els defectes d'aïllament, o sigui les fuites, per tal de garantir la desconexió ràpida de la instal·lació amb defecte.

Un interruptor diferencial s'empra per protegir les persones i les instal·lacions contra les fuites a terra. El terra i els elements de construcció són conductors del corrent elèctric, més o menys bons segons la seva composició. Es produeix una fuga a terra quan el corrent en lloc de retornar al generador a través dels cables corresponents, ho fa a través del terreny o dels elements de l'estructura.

Quan aquest corrent arriba a terra a través del cos humà pot produir-se una electrocució. Es considera que per sobre uns 30 mA (0.03 A) el corrent altern circulant pel cos humà pot ser mortal.

6-2- Principi de funcionament de l'interruptor diferencial

Sabem que en un sistema qualsevol la suma de corrents entrants és zero.

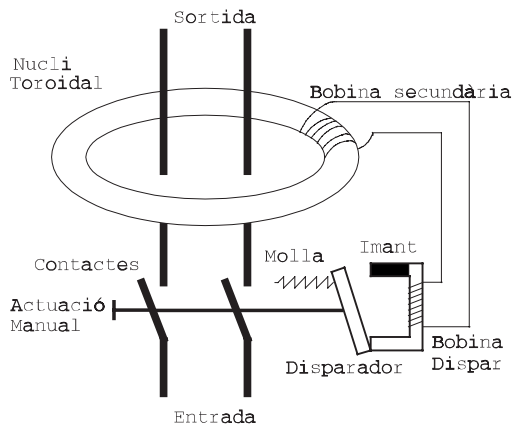
Si sumem els corrents que entren al nostre sistema

$$\begin{array}{l} \text{monofàsic} \left\{ \begin{array}{l} 2 \text{ fases} \\ 1 \text{ fase} + 1 \text{ neutre} \end{array} \right. \qquad \text{trifàsic} \left\{ \begin{array}{l} 3 \text{ fases} \\ 3 \text{ fases} + 1 \text{ neutre} \end{array} \right. \end{array}$$

La suma serà zero mentre no passi corrent pel terra o pel conductor de protecció. Quan la suma de tots els corrents supera un llindar s'assenyala defecte.

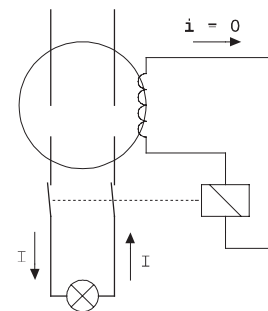
Important:

- Sempre s'han de comptar tots els conductors actius (inclòs el neutre)
- Mai s'ha de comptar el conductor de protecció.



El principi de funcionament és el simbolitzat a la figura. Quan l'interruptor diferencial es connecta, prement l'actuador manual, es tanquen els contactes i s'acosta la peça mòbil a l'imant; els contactes s'aguanten en posició tancada per l'atracció de l'imant. La força de l'imant és prou petita com per no poder tancar els contactes sense l'ajut de l'actuació manual.

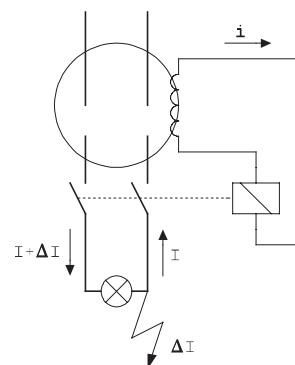
En situació de funcionament normal el corrent entra per un dels dos fils i surt per l'altre. En aquestes condicions cada un dels fils crea flux magnètic en el nucli toroidal però atès que el corrent en un fil té sentit contrari al de l'altre, el flux magnètic total és nul i, per tant, no s'indueix corrent en la bobina secundària.



Quan es produeix un defecte el corrent en un dels dos fils és més gran que en l'altre fil i , per tant, el flux magnètic en el nucli toroidal deixa de ser nul provocant l'aparició d'un corrent a la bobina secundària.

Si la diferència (ΔI) dels corrents és més gran que un valor mínim (sensibilitat del diferencial) el corrent de secundari circulant per la bobina de dispar és prou gran com per vèncer la força de l'imant provocant la desconexió dels contactes.

S'anomena sensibilitat nominal d'un diferencial al valor màxim de sensibilitat que pot tenir, el valor mínim de desconexió (sensibilitat real) està sempre entre el valor nominal i la seva meitat.



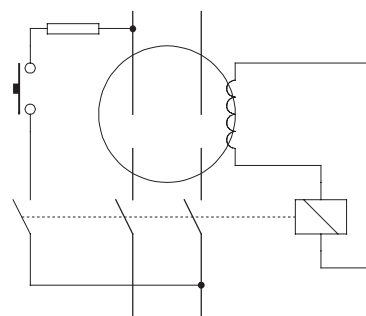
Les sensibilitats nominals més habituals són:

- Molt alta sensibilitat: 10 mA
- Alta sensibilitat: 30 mA
- Sensibilitat normal: 100 i 300 mA
- Baixa sensibilitat: 0.5 i 1 A

Els d'alta sensibilitat i molt alta sensibilitat s'empren en instal·lacions domèstiques, d'oficines de laboratoris i de serveis, els de sensibilitat normal en la indústria i els de baixa sensibilitat en alimentacions de potència gran.

Els diferencials acostumen a portar un pulsador de prova. Aquest pulsador simula un defecte fent passar un corrent apropiat per fora el nucli toroidal. Quan es prem aquest pulsador (cosa que cal fer periòdicament) el diferencial ha de desconectar.

Convé observar que sovint hi ha persones que senten passar corrent per dins el seu cos i pensen que el diferencial no funciona ja que no ha desconectat. Això probablement és fals i el que ha succeït és que el corrent és menor que la sensibilitat del diferencial.



Cal tenir en compte també que el diferencial desconecta en cas de fuites a terra; per tant una persona pot estar en contacte amb dos dels fils d'una instal·lació i , per tant, electrocutant-se i el diferencial no desconecta si aquesta persona està prou aïllada de terra. El diferencial és un aparell de seguretat contra els accidents amb el qual no s'ha de sobre-confiar. Així no s'ha de treballar sobre una instal·lació en tensió malgrat hi hagi un diferencial de protecció.

Els diferencials també tenen dispositiu de desconexió lliure, és a dir desconecten encara que algú aganti la maneta en la posició de connectat.

Només hi ha unes poques intensitats nominals (p.e. 25, 40, 63, 80, 100 A) ja que això només afecta la secció de fils del seu interior.

No són interruptors automàtics, per tant no poden tallar corrents de curt circuit; per això cal protegir-los sempre contra els curts circuits amb magnetotèrmics o fusibles.

6-3- Relès diferencials

Cada cop més hi ha la possibilitat de tenir un nucli toroidal separat que permeti el dispar d'interruptors magnetotèrmics. En circuits de corrent fort això funciona amb alimentació auxiliar.

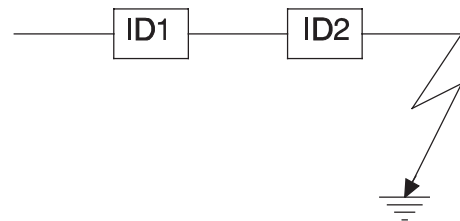
En circuits de petit corrent es fan diferencials sense contactes provistos d'una palanqueta que fa disparar un magnetotèrmic. El conjunt és més econòmic (només cal un joc de contactes de potència) i ocupa igual o menys lloc.

6-4- Selectivitat d'interruptors diferencials

Dos diferencials, en ésser instantanis, no poden tenir selectivitat. Perquè hi hagi selectivitat cal que

$$I_{\Delta 1} > I_{\Delta 2} \quad t_{d1} > t_{d2}$$

És a dir el diferencial ID2 ha de ser més sensible i més ràpid que el ID1 per tal que hi hagi selectivitat.



Molts fabricants fan diferencials anomenats selectius que són retardats. Hi ha selectivitat si el diferencial més proper a la generació és de tipus selectiu i de menys sensibilitat que el més proper a la càrrega.

Enllumenat viari

1- Classificació de les instal.lacions d'enllumenat

Qualsevol instal.lació d'enllumenat respon als mateixos fenòmens físics, tot i això se solen diferenciar diferents famílies d'instal.lacions per les diferències entre la metodologia de treball i els paràmetres a optimitzar.

Una possible classificació de les instal.lacions d'enllumenat pot ser:

- Enllumenat viari (Vialitat de vehicles i vianants).
- Enllumenat d'interiors (Edificis).
- Enllumenat per projecció (Pistes esportives i exterior d'edificis per immersió en llum).
- Enllumenat artístic-ornamental: (Fonts lluminoses, aparadors, efectes especials, ...).

De totes aquestes famílies només tractarem la de l'enllumenat viari.

2- Normativa a aplicar

La normativa d'obligat compliment pel que respecta al comportament luminotècnic de les instal.lacions d'enllumenat viari és força confosa entre els diferents estaments públics (MV, MIE, MOPU, MOP, Autonomies, Corporacions Locals, etc.), en general tots els països utilitzen les recomanacions CIE (Comissió Internacional de l'Enllumenat) (Europa) o IES (*Illuminating Engineering Society*) (USA) que tot i no ser d'obligat compliment representen un estàndard internacional de reconeguda solvència.

3- Fonaments físics de la llum

Anomenem llum visible a una fracció de l'espectre de radiacions electromagnètiques que és capaç de provocar sensació lluminosa en els receptors de l'òrgan de visió humana.

Una radiació electromagnètica es caracteritza fonamentalment per dos paràmetres:

- La qualitat o freqüència
- La quantitat o flux que s'emet o que es rep.

Com tota radiació, la llum es caracteritza per la freqüència d'oscil·lació de l'ona associada al camp electromagnètic, f , que és la inversa del període.

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

la velocitat de propagació de l'ona en el buit val

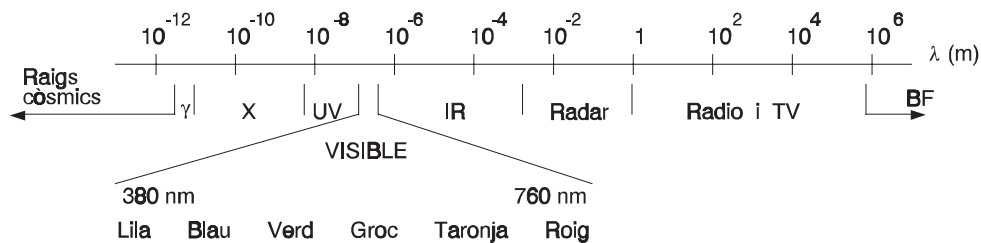
$$c \approx 300 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

que és molt semblant a la de propagació en l'aire, sovint es prefereix parlar de longitud d'ona en lloc de freqüència, entesa com l'espai que avança el raig en un període. La longitud d'ona es mesura en nm.

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad (\text{nm})$$

$$(1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m})$$

Podem classificar les ones electromagnètiques segons la seva longitud en un ampli espectre, una petita fracció del qual és visible, és a dir, pot ser captada pels òrgans de visió humans.

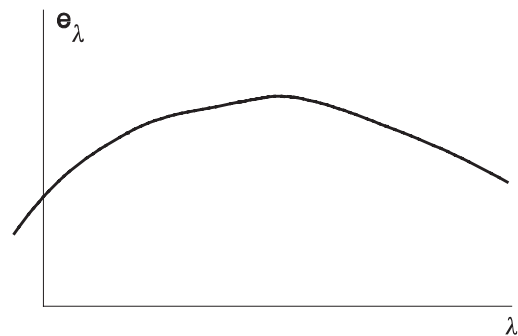


Tota font de radiació emet en un espectre, és a dir, en una multitud de freqüències, la funció de distribució de les quals és

$$e_{\lambda} = \frac{dE}{d\lambda}$$

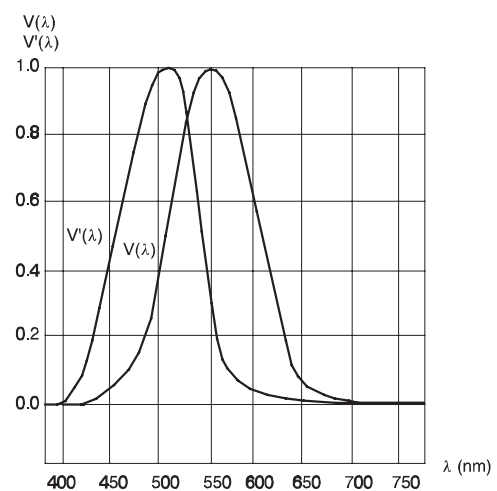
l'energia total emesa per la font per unitat de temps

$$E = \int_0^{\infty} e_{\lambda} d\lambda \quad (J)$$



De totes les freqüències emeses, només les longituds d'ona compreses en l'espectre visible donen sensació lluminosa i dins d'aquesta banda, una mateixa quantitat d'energia per unitat de temps dona sensació diferent de quantitat de llum. Com la sensació de quantitat de llum varia d'una persona a una altra, i molt especialment amb l'edat, la CIE ha definit l'estàndard promig de visió de la persona humana mitjançant els factors de visió $V(\lambda)$, s'assigna el valor 1 al 100% de sensació de llum per a una certa energia en una longitud d'ona on la sensació lluminosa és màxima i per comparació s'obtenen els valors de $V(\lambda)$ per a cada longitud; es distingeixen dues possibles situacions:

- Visió fotòpica: amb molta llum ($V'(\lambda)$)
- Visió escotòpica: amb poca llum ($V(\lambda)$)



Així doncs en luminotècnia, a diferència d'altres branques de l'enginyeria, no interessa quantificar les quantitats de radiació en termes de potència (watts) sinó en termes de sensació lluminosa provocada, definint-se per mesurar la quantitat de llum visible o **flux lluminós** una nova unitat anomenada lumen.

$$\Phi = E_V = \int_0^{\infty} e_{\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (lm)$$

que correspon a una mitja ponderada segons la sensació visual provocada només per l'espectre visible de la llum doncs fora de l'espectre visible $V(\lambda) = 0$.

Un lumen equival a 1/680 W de potència emesa a $\lambda = 555 \text{ nm}$

4- Característiques dels òrgans de visió humans

Els òrgans de visió humans (ulls + sistema nerviós) són capaços d'obtenir imatges en un arc de quasi 180° en recorregut horitzontal i de 130° en sentit vertical anomenat camp visual. Dins d'aquest ampli abast es distingeixen diverses zones.

- Camp de percepció nítida, un con d'uns 0.5° d'obertura, és l'utilitzat per a les feines de gran precisió com per exemple llegir.
- Camp visual central, comprèn un con d'obertura d'uns 25° excepte l'anteriorment esmentat on es poden realitzar tasques sofisticades però no de gran precisió.
- Entorn, comprèn un con d'obertura d'uns 60° excepte els esmentats anteriorment on es rep una informació visual no tan precisa.
- Camp perifèric, la resta des de l'entorn fins al final del camp visual, la informació obtinguda és d'un grau de concreció molt baix i forma només part de "l'ambient" o situació, per exemple, sabem si algú s'acosta però no sabem qui és fins que no entra dins l'entorn.

Les propietats bàsiques de l'ull humà són dues:

- **Acomodació** mitjançant el cristal·lí s'aconsegueix formar la imatge de l'objecte sobre la retina independentment (dins els límits d'acomodació) de la distància a què aquest es trobi.
- **Adaptació** ja que l'obertura de la pupil·la (diàmetre) és variable en funció de la quantitat de llum present per tal de mantenir l'excitació físico-química de la retina a nivells òptims.

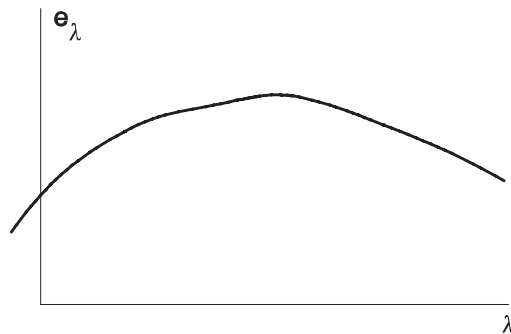
Les característiques bàsiques de la visió són:

- **Agudes** distingir com a diferents dos objectes que estan molt pròxims.
 - **Percepció en colors.** Dins la retina hi ha dues menes de receptors lluminosos, els bastonets i els cons, els bastonets són molt sensibles a la quantitat de llum però no al color mentre els cons ho són al color però necessiten quantitats elevades de llum, per aquest motiu amb il·luminacions molt petites la visió és bàsicament sense colors mentre que amb il·luminacions grans és amb colors.
 - **Visió binocular,** pel fet de ser l'ull un òrgan parell, el sistema nerviós pot elaborar la informació visual obtinguda des de dos punts diferents per tal d'obtenir una representació en 3D a partir de les dues que són 2D de les dues retines.
-

5- Caracterització de les fonts lluminoses

Tota font lluminosa (natural o artificial) es caracteritza per

- *Potència que emet* (Flux lluminós mesurat en lúmens)
- *Potència que consumeix* (Consum de fonts artificials), es mesura en watts. Es defineix com **eficàcia lluminosa** o **rendiment lluminós** la relació flux/potència consumida ϕ/P mesurada en lm/W
- *Com distribueix la llum en l'espai*
- *Quin espectre de longituds d'ona emet*. L'espectre pot ser continu o discret (a salts), es quantifica mitjançant la corba de distribució espectral.



Com és una informació molt exhaustiva i d'elaboració costosa, es resumeix, a costa de perdre informació, en dos paràmetres

- Temperatura de color: per comparació amb el color aparent d'un cos negre, les fonts de temperatura de color baixa són vermelloses i les de temperatura de color alta són blavoses representant respectivament els colors anomenats càlids i freds.
- Rendiment de color: quantifica la reproducció dels colors d'un objecte il·luminat amb la font, com major és el rendiment millor és la reproducció dels colors.

Pel que respecta a l'enllumenat de vials, atès que la finalitat primordial és la seguretat de la circulació, les qüestions associades a la reproducció del color, tot i ésser importants, de vegades es sacrifiquen a favor de l'obtenció d'uns costos assequibles d'instal·lació i explotació.

6- Components d'una instal·lació d'enllumenat viari

En funció de les tècniques emprades, es distingeixen quatre parts en el disseny i execució d'una instal·lació d'enllumenat viari:

- Sistema lluminós
- Sistema elèctric
- Sistema mecànic
- Obra civil

El sistema lluminós serà objecte d'aquest capítol mentre el sistema elèctric s'inclou dins el tractament general de les instal·lacions elèctriques. Els dos restants queden fora de l'abast de l'assignatura.

7- Fotometria

Com s'ha vist en apartats anteriors mesurem la quantitat de llum emesa per una font (flux) per unitat de temps en unitats fisiològiques anomenades lumen. Per tal de tenir en compte la distribució en l'espai d'aquest flux, es defineix la magnitud **intensitat lluminosa** (denotada per I) com la quantitat de flux emesa en cada direcció; té per unitat la candela (cd).

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad 1 \text{ cd} = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ sr}}$$

on Ω és l'angle sòlid comprès per un conjunt de direccions en l'espai i $d\Omega$ és la direcció en què es troba I i en la qual s'emeta $d\phi$.

Es defineix com **il·luminància** o **il·luminació** la quantitat de flux lluminós rebut per una superfície perpendicular als raigs incidents per unitat de superfície, la denotem per E . Es mesura en lux.

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad 1 \text{ lux} = \frac{1 \text{ lm}}{\text{m}^2}$$

Es defineix com **luminància** d'una superfície (L) (antigament brillantor), a la intensitat lluminosa que emet en una determinada direcció per unitat de superfície. Es mesura en cd/m^2 .

$$L = \frac{dI}{dS}$$

8- Efectes psico-fisiològics conseqüència de l'enllumenat

8-1- Efecte Talbot

Qualsevol font lluminosa que emeti de forma intermitent a una freqüència per sobre de 16 Hz és percebuda pels òrgans de visió de forma contínua, per raó d'aquest efecte veiem el cinema i la televisió com un procés continu quan en realitat és discret, anàlogament les làmpades de descàrrega tenen intermitències de 100 Hz i tot i això les veiem de forma contínua.

8-2- Efecte estroboscòpic

Quan una font emet de forma intermitent a una freqüència que coincideix o quasi coincideix amb la freqüència de gir o desplaçament d'objectes per ella il·luminats aquests es veuen de forma estàtica, a nivell industrial aquest efecte es pot aprofitar per a la detecció de determinades velocitats de gir o bé cal eliminar-lo per tal d'evitar accidents posant fonts lluminoses que tinguin decalades en el temps les intermitències (en un sistema trifàsic convé posar una tercera part de les làmpades a cada fase).

8-3- Flicker

Fenomen d'oscil·lació de molt baixa freqüència de la quantitat de llum present que provoca fatiga visual, pot ser causat per oscil·lacions en la tensió d'alimentació de les fonts lluminoses o pel desplaçament relatiu de l'observador respecte de totes les fonts lluminoses, es caracteritza per la seva baixa freqüència (4 a 10 Hz) i pel fet que normalment és inconscient.

8-4- Fatiga

La fatiga física o psíquica pot ser provocada per la realització de tasques en un entorn on la quantitat de llum sigui insuficient, o bé si la luminància (brillantor) dels objectes presents és excessiva. De vegades també pot ser provocada per efectes estroboscòpics o flicker inconscients.

8-5- Contrast

És l'efecte que ens permet la visió si L_0 és la luminància (brillantor) del fons del camp de visió i L és la luminància de l'objecte a visualitzar, es defineix el contrast C com

$$C = \frac{L - L_0}{L_0}$$

i de vegades com

$$C = \frac{L - L_0}{\frac{1}{2}(L_0 + L)}$$

L'existència de contrastos és el que ens permet distingir l'objecte del fons, un contrast molt baix fa que la visió de l'objecte sigui impossible mentre que un contrast excessiu provocarà fatiga visual.

El contrast pot ser positiu $L - L_0 > 0$, o bé negatiu $L - L_0 < 0$, en les tasques visuals de vialitat (conducció de vehicles i circulació de vianants) diürnes, la visió és per contrast positiu (luminància de l'objecte major que la luminància de fons o del vial) mentre que en el cas nocturn, amb presència d'enllumenat viari la visió és per contrast negatiu, doncs la luminància del possible obstacle és menor que la del fons o calçada.

8-6- Enlluernament

És l'efecte que produeix incomoditat o incapacitat de la visió pel fet d'existir superfícies amb una luminància gran, es distingeix entre directe i indirecte.

L'**enlluernament directe** és causat per l'observació d'una font lluminosa o objecte amb luminància gran que es troba dins el camp de visió, per tal d'evitar-lo no podem instal.lar fonts lluminoses o objectes d'alta luminància dins el camp de visió, en el cas de l'enllumenat viari caldrà situar les fonts de llum a una determinada alçada i no a nivell de la calçada doncs el camp de visió normal està en una zona de la calçada per davant en el sentit de marxa.

L'**enlluernament indirecte** és provocat per superfícies fora del camp de visió, també s'anomena **enlluernament de vel**, es distingeix l'enlluernament de vel directe o causat per la presència de fonts lluminoses (lluminàries de l'enllumenat viari) o bé indirecte com a conseqüència de l'existència de superfícies reflectants. En el cas de l'enllumenat viari, l'enlluernament de vel indirecte més freqüent és causat per la presència de boira o aigua en la calçada.

$$\text{Enlluernament} \left\{ \begin{array}{l} \text{Directe} \\ \text{De vel} \left\{ \begin{array}{l} \text{Directe} \\ \text{Indirecte} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

En qualsevol instal·lació d'enllumenat viari només tindrem un enlluernament de vel i alhora només podrem realitzar dissenys que assegurin uns certs límits d'enlluernament pel vel directe (situació i tipus de lluminària) doncs l'indirecte, causat per fenòmens atmosfèrics, en no tenir solució luminotècnica comportarà altres solucions no luminotècniques com la disminució de la velocitat de circulació dels vehicles, l'augment de les distàncies de seguretat, el major cansament dels conductors, etc. Així doncs, en el disseny luminotècnic d'una instal·lació es tindrà en compte l'enlluernament de vel directe distingint-lo en dues categories: enlluernament molest, el qual provoca fatiga; i enlluernament petorbador, el qual provoca un cert grau d'incapacitat de visió, que de vegades no és percebut pel conductor com a tal.

9- Paràmetres de qualitat i de disseny d'una instal·lació

En els inicis de la luminotècnica, l'únic paràmetre disponible per mesurar la qualitat de la instal·lació era la potència instal·lada per unitat de superfície; paràmetre clarament insuficient doncs ni tan sols és luminotècnic. Posteriorment es va incloure un paràmetre luminotècnic que durant molt temps va ser el més important: la il·luminació mitja de la calçada (E_{mig}), actualment hi ha molts criteris més precisos i adequats, tot i això, encara s'empra, per la seva simplicitat en els predimensionats de les instal·lacions.

Efectivament, si només valorem una instal·lació per la il·luminació promig (promig de llum rebuda per unitat de superfície de la calçada) estem deixant de banda consideracions molt importants com ara les relatives a enlluernament de vel, distribució de la llum en la calçada i la més important, la visió humana és possible per contrast de luminància (brillantor) i no per la llum rebuda per la calçada.

Per tal de compensar algun dels defectes de criteri abans esmentats es va desenvolupar el criteri de la uniformitat d'il·luminació: es tracta d'avaluar la distribució de la llum en la calçada mitjançant el càlcul (en procés de disseny de la instal·lació) de la il·luminació en una sèrie estandaritzada de punts de la calçada (mètodes dels 9 o dels 12 punts de CIE), el promig de les il·luminacions d'aquests punts ens dona el valor de la il·luminació promig mentre que la distribució de la llum l'avaluem mitjançant dos nous paràmetres.

Uniformitat mitja d'il·luminància

$$U_{Emig} = \frac{E_{m\grave{a}x}}{E_{mig}}$$

Uniformitat extrema d'il·luminància

$$U_{E\theta x} = \frac{E_{m\grave{a}x}}{E_{min}}$$

definits respectivament com els quocients entre les il·luminacions màxima/mitja i màxima/mínima.

Malgrat afegir aquests nous paràmetres el mètode encara pateix d'alguna mancança; es van afegir els paràmetres referents a l'enlluernament:

□ **Índex de confort G** (per a l'enlluernament de vel molest) és una fórmula empírica que dona el grau de molèstia causat per lluminàries, essent els seus possibles valors

- 1: Intolerable
- 2: Molest
- 5: Admissible
- 7: Satisfactori
- 9: Inapreciable

□ **Increment llindar TI** (per a l'enlluernament de vel pertorbador) indica l'increment de contrast necessari per a la presència de l'enlluernament respecte de les mateixes condicions lluminoses sense lluminàries. Com més baix és, millor. També s'obté mitjançant una fórmula empírica.

Amb l'addició de tots aquests paràmetres només ens queda per solucionar un inconvenient, la resposta de l'ull és al contrast, i per obtenir un bon contrast necessitem que la luminància de la calçada sigui elevada, per tant és raonable basar el disseny luminotècnic de la instal.lació no en la il.luminació mitja i les seves uniformitats sinó en la luminància mitja i les seves uniformitats, calculades en uns quants punts estàndard de la calçada.

Uniformitat mitja de luminància

$$U_{Lmig} = \frac{L_{m\grave{a}x}}{L_{mig}}$$

Uniformitat extrema de luminància

$$U_{L\theta x} = \frac{L_{m\grave{a}x}}{L_{m\grave{i}n}}$$

Si aquests paràmetres no s'han inclòs fins fa molt poc temps és perquè tenen una complexitat de càlcul major que els altres mètodes. Anàlogament la comprovació de la instal.lació realitzada és més complexa ja que els aparells de mesura de luminància són cars i complexos mentre que els luxòmetres per a la mesura de la il.luminació són barats i simples, per aquest motiu habitualment s'inclouen tant els criteris de luminància com els d'il.luminació doncs, si bé la luminància ens serveix per al disseny, la il.luminació és útil per a una primera comprovació dels valors reals de la instal.lació. Actualment s'acostuma a realitzar un predimensionament a base de la il.luminància mitja i després emprar un paquet informàtic per acabar d'ajustar els càlculs a partir de la resta de paràmetres.

Així doncs, els paràmetres emprats per al disseny de la instal·lació són:

- En fase de predimensionat
 - Il·luminació (il·luminància) mitja
- En fase de disseny
 - Luminància
 - Mitja
 - Uniformitats de luminància
 - mitja
 - extrema
 - Il·luminància
 - Mitja
 - Uniformitats de il·luminància
 - mitja
 - extrema
 - Enlluernament
 - Molest: Índex G
 - Pertorbador: Increment llindar TI
 - Guia visual
 - Guiatge per la llum i els suports de les lluminàries
 - Estètica
 - Mimetització o coherència amb l'entorn
 - Economia
 - D'instal·lació, de manteniment i d'exploració

Així les recomanacions internacionals classifiquen les vies en diverses categories:

- A:** Autopistes i Autovies
- B:** Carreteres importants amb trànsit exclusiu per a vehicles automòbils
- C:** Carreteres importants de velocitat moderada i/o trànsit mixt
- D:** Vies urbanes de trànsit mixt
- E:** Vies de trànsit mixt de velocitat i volum moderats (per exemple, zones residencials)

i a cada categoria li assignen uns paràmetres mínims de qualitat (màxim de TI per a l'enlluernament pertorbador)

	Il.luminància mitja E_{mig} (lux)	Uniformitat mitja Il.luminància $U_{E mig}$	Luminància mitja L_{mig} (cd/m ²)	Uniformitat mitja Luminància $U_{L mig}$	Índex de confort G	TI %
A	30 ÷ 50	0.75	2	0.4	6	10
B	30 ÷ 50	0.6	1 - 2	0.4	5 - 6	10
C	15 ÷ 25	0.6	1 - 2	0.4	5 - 6	10 ÷ 20
D	15 ÷ 25	0.75	2	0.4	4	20
E	7 ÷ 12	0.5	0.5 - 1	0.4	4 - 5	20

Cal destacar que l'increment de la luminància mitja per sobre de 2.5 cd/m² és molt costosa en consum de la instal.lació i pràcticament no augmenta el contrast per a la visió essent del tot innecessari superar aquest valor.

10- Càlcul del valor mig d'il.luminació de la calçada (Avantprojecte o predimensionat de la instal.lació)

Cada lluminària incorpora una o més làmpades que donen un flux lluminós anomenat nominal, és a dir, el de 100 o 2000 hores (segons la vida de la làmpada) de funcionament i alimentada a la tensió nominal, amb el pas del temps aquest flux va decreixent per motius diversos com són l'envelliment de la làmpada, l'envelliment de la lluminària i el depòsit de pols en els sistemes òptics; es defineix com coeficient de depreciació la relació entre el flux que emet la lluminària al final de la vida útil de la làmpada i/o la lluminària (és a dir, abans que la làmpada deixi de funcionar) i el nominal

$$F = \frac{\Phi_{final}}{\Phi_{nominal}}$$

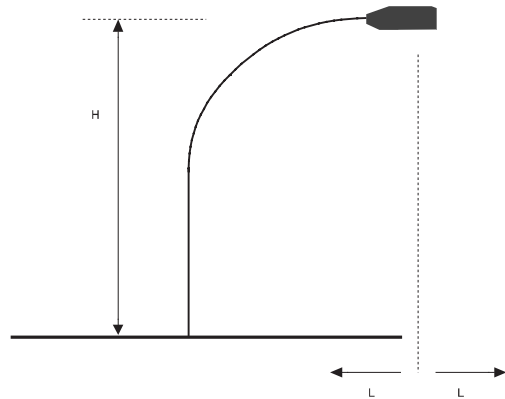
Els factors que incideixen en l'estimació del coeficient de depreciació són diversos com l'envelliment dels equips, si són oberts o tancats i la neteja a què se'ls sotmet, a títol orientatiu F oscil.la entre 0.6 i 0.85 des de zones brutes amb lluminària oberta a zones netes amb lluminària tancada.

Com els paràmetres de disseny són els mínims a aconseguir, caldrà comptar que els fluxs són els de la làmpada abans de la seva substitució i la lluminària envellida i abans de la neteja periòdica, de forma que amb l'equip nou superarem àmpliament els paràmetres mínims.

Del flux final que emet la lluminària

$$\phi_{final} = \phi_{nominal} \cdot N \cdot F$$

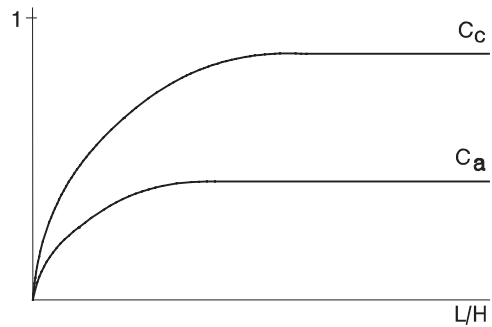
on N és el número de làmpades, una part s'emet cap endavant (costat calçada) i una altra part s'emet cap enrera (part vorera), de cadascuna d'aquestes parts, arriba a la calçada una fracció en funció de la distància (L) endavant i enrera respecte de l'eix transversal del vial i l'alçada de la instal.lació (H).



El fabricant de la lluminària ens dona aquesta informació mitjançant els coeficients d'utilització del costat vorera i del costat calçada, C_a i C_c respectivament, on

$$C_c = \frac{\phi \text{ que arriba a la calçada}}{\phi \text{ total emès per la lluminària}}$$

$$C_a = \frac{\phi \text{ que arriba a la vorera}}{\phi \text{ total emès per la lluminària}}$$



graficats en funció de L/H per a cada lluminària

En funció de la disposició de les lluminàries podem trobar el coeficient total d'utilització U com a combinació dels diferents coeficients de vorera i calçada de les lluminàries que intervenen. El flux que arriba a la calçada en una interdistància D (distància entre dos punts de llum) val ϕ_i

$$\phi_i = \phi_{final} \cdot U$$

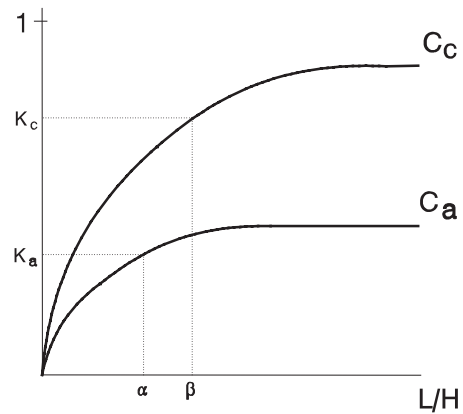
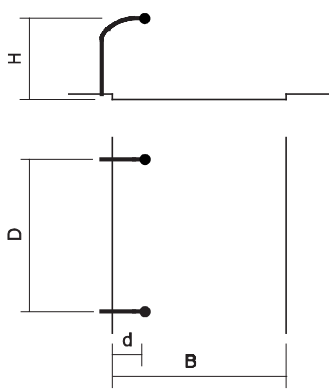
i la superfície il.luminada és $D \cdot B$ on B és l'amplada de la calçada, per tant, el valor mig d'il.luminació és

$$E_{mig} = \frac{\phi_i}{D \cdot B} = \frac{\phi_{final} \cdot U}{D \cdot B} = \frac{\phi_{nom} \cdot N \cdot F \cdot U}{D \cdot B}$$

on conegut el valor d' E_{mig} desitjat, la lluminària a emprar i la disposició dels punts de llum, podem trobar la interdistància D necessària o, coneguda la interdistància, podem saber quina il.luminació promig s'obindrà.

10-1- Obtenció dels coeficients d'utilització

Cas 1: Calçada senzilla amb fanals a un costat (centre òptic sobre la calçada)



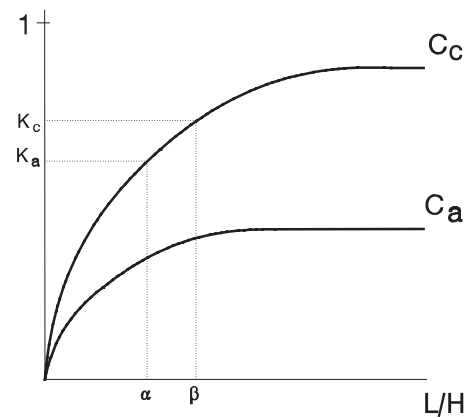
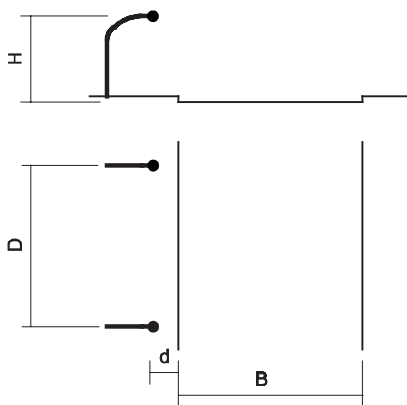
Una part de la llum que arriba a la calçada surt endavant de la lluminària (representada per K_c) i la resta surt enrera de la lluminària (representada per K_a); per tant el factor d'utilització serà

$$U = K_c + K_a$$

$$\alpha = \frac{d}{H} \quad \beta = \frac{B - d}{H}$$

El valor d pot ser nul si el centre òptic del fanal està sobre la vertical del límit de la vorera, en quin cas K_a serà zero.

Cas 2: Calçada senzilla amb fanals a un costat (centre òptic sobre la vorera)



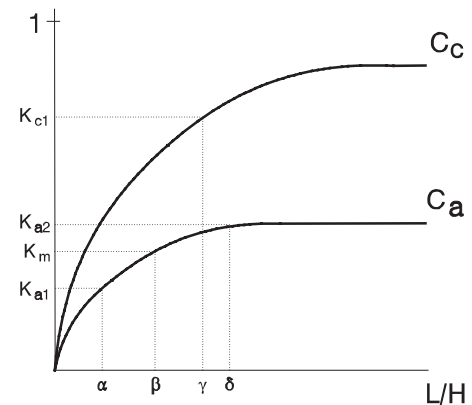
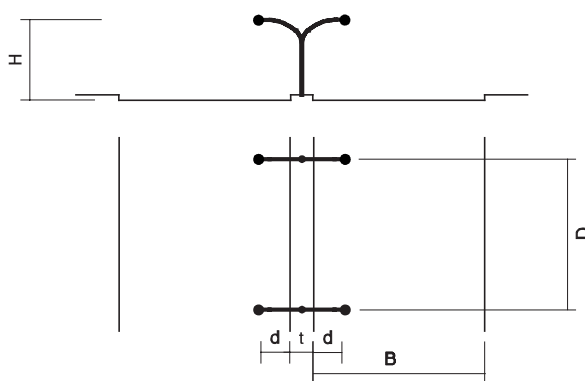
$$\alpha = \frac{d}{H} \qquad \beta = \frac{B + d}{H}$$

De la llum que surt endavant de la lluminària fins al límit de la calçada (representada per K_c) n'hi ha una part que incideix a la vorera (representada per K_a); per tant el factor d'utilització serà

$$U = K_c - K_a$$

El valor d pot ser nul si el centre òptic del fanal està sobre la vertical del límit de la vorera, en quin cas K_a serà zero.

Cas 3: Calçada doble amb fanals a la mitgera



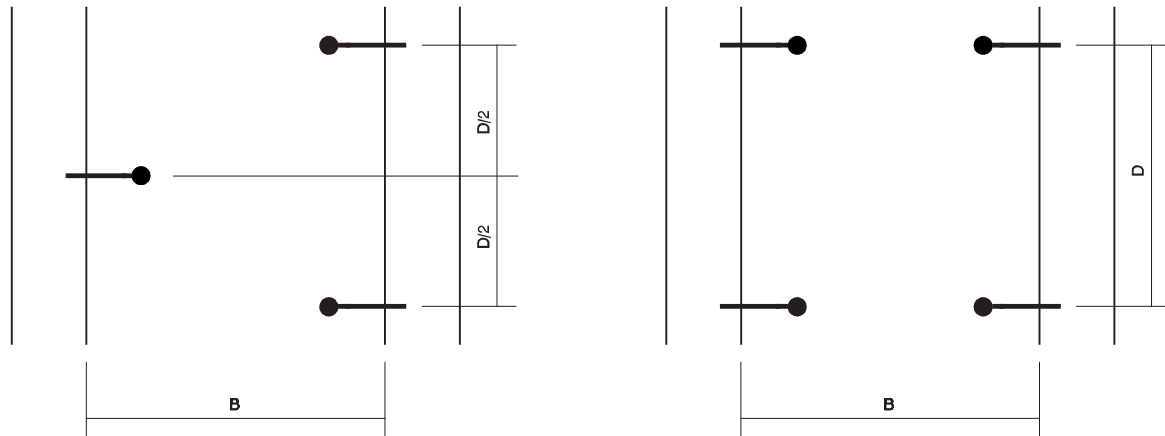
$$\alpha = \frac{d}{H} \qquad \beta = \frac{d+t}{H} \qquad \gamma = \frac{B-d}{H} \qquad \delta = \frac{B+t+d}{H}$$

Els coeficients K_{a1} i K_{c1} representen la llum que un fanal envia a la calçada que li correspon; mentre que K_{a2} és la llum que l'altre fanal envia a la calçada en estudi, llavors K_m és la part d'aquest que no arriba a la calçada en estudi (il·lumina la mitgera i l'altra calçada). Pel que fa a la llum que arriba a una sola calçada, el factor d'utilització serà

$$U = K_{c1} + K_{a1} + K_{a2} - K_m$$

Cas 4: Fanals als dos costats de la calçada

Hi ha dues possibilitats d'instal·lació segons si els fanals es col·loquen en forma simètrica o asimètrica.



En ambdós casos, pel que fa als càlculs de E_{mig} tindrem el doble de punts de llum respecte de les disposicions anteriors, per tant es pot considerar la superfície de mitja calçada (però els coeficients d'utilització de la calçada sencera).

$$E_{mig} = \frac{\Phi_i}{D \cdot B'} \qquad B' = \frac{B}{2}$$

i els coeficients d'utilització són com en el cas d'un sol costat; per tant, sigui quina sigui la disposició, els coeficients d'utilització els obtenim a partir d'un dels tres casos esmentats abans.

Com ja s'ha esmentat anteriorment aquest càlcul és només orientatiu a títol d'avantprojecte doncs cal tenir en compte la distribució de la luminància i els paràmetres d'enlluernament. Com els càlculs associats amb les luminàncies són pesats, se solen emprar programes informàtics per realitzar-los.

11- Fonts lluminoses artificials

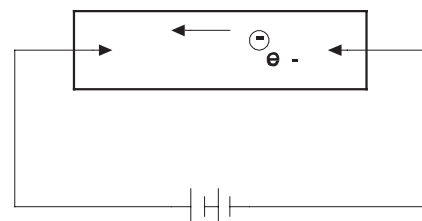
Podem classificar les fonts lluminoses artificials per a aplicacions generals segons dos criteris: el fenomen físic en què es basen o la tecnologia emprada en la seva construcció

- Segons fenomen físic
 - Incandescència (fenomen: termoluminiscència)
 - Descàrrega (fenomen: radiació)
 - Fluorescència (fenomen: radiació + fluorescència)
- Segons tecnologia
 - Incandescència
 - Clàssica
 - Halògens
 - Fluorescència (Fluorescents)
 - Descàrrega
 - Vapor de mercuri (Hg) a alta pressió (VMAP)
 - Normal
 - Color corregit
 - Mescla
 - Halogenurs metàl·lics
 - Vapor de sodi (Na)
 - A baixa pressió (VSBP)
 - A alta pressió (VSAP)
 - Normal
 - Amb autoencesesa

Les làmpades d'incandescència (bombetes clàssiques) es caracteritzen per un molt bon rendiment de color però en ser la seva vida curta (1000 hores) i la seva eficàcia lluminosa baixa (6 a 20 lm/W) rarament s'empen en l'enlluminat viari.

11-1- Descàrrega elèctrica en un gas

En una ampolla amb gas amb dos electodes en els seus extrems, aquest pot arribar a ser conductor en determinades condicions de pressió, temperatura i tensió aplicada.



El camp elèctric generat en l'interior del gas fa que aquest s'ionitzi en part, els electrons que queden lliures són accelerats pel camp elèctric en el sentit de l'electrode negatiu cap a l'electrode positiu establint-se un corrent elèctric, l'electró accelerat xoca amb d'altres àtoms de gas amb dues possibilitats.

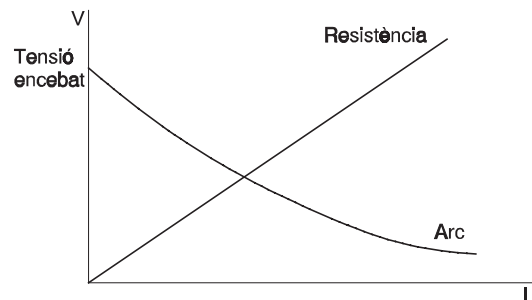
- Xoc elàstic: Varia la trajectòria de les partícules que xoquen (similar al xoc de boles de billar).
- Xoc inelàstic: L'electró cedeix energia arrencant un electró de l'àtom o canviant-lo d'òrbita, augmentant en el primer cas la ionització, el nombre de càrregues i , per tant, el corrent augmenta. En cas que l'electró hagi canviat d'òrbita, quan l'àtom torna a l'equilibri, l'excedent d'energia es lliura en forma d'emissió de radiació a longituds d'ona quàntiques (discretes).

$$\Delta E = h \cdot f \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

on f és la freqüència, h és la constant de Planck ($h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ J s) i ΔE és l'excés d'energia entre les òrbites, magnitud quàntica.

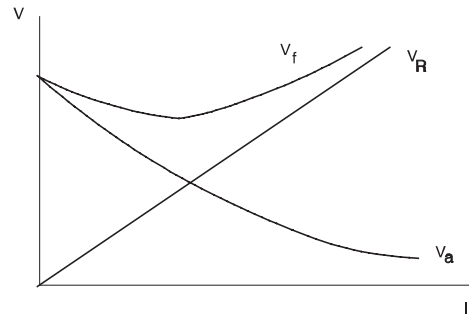
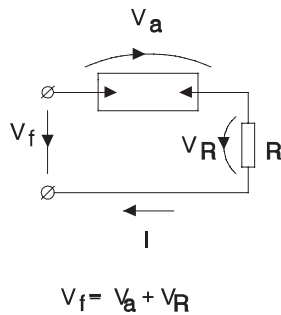
Els nuclis dels àtoms ionitzats són càrregues positives però que no tenen un paper important en el procés de descàrrega doncs en ser molt més pesats que els electrons la seva velocitat de desplaçament és sensiblement menor.

Si la descàrrega l'alimentéssim amb corrent continu, els ions positius (nuclis) s'anirien desplaçant cap a l'electrode negatiu dificultant el manteniment del procés, caldria canviar la polaritat aplicada a la làmpada cada cert temps de funcionament; quan l'alimentació és alterna aquest problema es resol automàticament.



Com ja s'ha esmentat anteriorment, un electró amb un xoc inelàstic pot provocar més ionització i , per tant, més corrent circulant, que alhora pot seguir augmentant, és un fenomen d'allau que s'anomena característica inversa dels arcs elèctrics. A partir de la tensió a què comença el fenomen (tensió d'encebat), cal una tensió inferior per mantenir el mateix nivell de corrent, i com major és el corrent menor és la tensió necessària per mantenir-lo, contràriament a la majoria d'elements electrotècnics (R, L, C) que tenen característica directa (major corrent, major tensió).

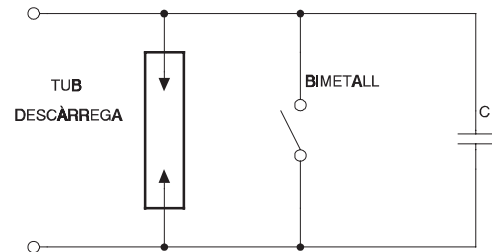
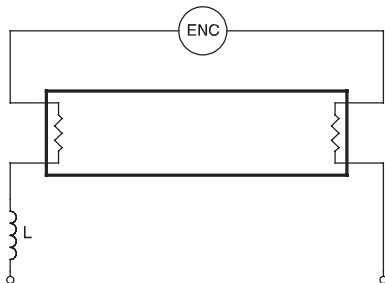
Si mantinguéssim la tensió en borns de l'ampolla, un cop encebat l'arc, el corrent augmentaria infinitament provocant la destrucció de l'equip per excés d'energia, per tal de limitar-lo i estabilitzar-ne el funcionament, necessitem un artefacte que baixi la tensió de l'arc quan aquest augmenta de corrent: és l'anomenat balast, un element de característica positiva que s'instal·la en sèrie i fa que el conjunt tingui també característica positiva. En el cas de corrent continu el balast pot ser una resistència i en el cas d'alterna pot ser una resistència, una inductància o una capacitat.



En no ser la tensió d'arc una funció lineal del corrent, ni que la tensió aplicada al conjunt sigui sinusoidal, el corrent que circula no ho serà. Els balasts resistius tenen l'inconvenient de dissipar energia (potència activa) per la qual cosa es prefereixen els reactius, majoritàriament inductàncies ja que faciliten l'ençebad en molts casos.

11-2- Làmpades fluorescents

Consisteixen en un tub de vidre en què s'han instal·lat dos electrodes en els extrems, el tub és ple de gasos rars (argó i xenó) amb una pressió parcial d'uns 100 a 1000 Pa i mercuri amb una pressió parcial de 0.1 a 1 Pa. La funció del mercuri és fer que la tensió d'ençebad (a què anirà l'arc) sigui prou baixa, mentre que els gasos rars ajuden a homogeneïtzar l'arc i a evacuar el calor per ell generat cap a les parets. Per al seu funcionament el tub necessita una sèrie d'elements auxiliars: balast i ençebador.



El balast normalment és una inductància i l'ençebador pot realitzar-se de diferents maneres, però majoritàriament s'empren els de descàrrega: un petit tub de descàrrega de tensió d'ençebad molt baixa que té en paral·lel un bimetal·lel i un petit condensador.

En el moment de connexió de l'equip, el bimetall de l'encebador és obert, en ser la resistència dels electrodes del tub baixa, la major part de la tensió d'alimentació apareix en el tub de descàrrega de l'encebador encebant-hi un arc, aquest arc dissipa una energia en forma tèrmica que escalfa el bimetall i fa que es tanqui, amb aquest tancament, el corrent circulant per la inductància de balast i els electrodes del tub augmenten considerablement, els electrodes s'escalfen i vaporitzen el mercuri de l'interior del tub, com el tub de descàrrega de l'encebador s'ha quedat sense tensió ja no dissipa energia i el bimetall en refredar-se obre el circuit, davant de l'obertura brusca, la inductància de balast dona tensió transitòria alta

$$v_L = L \frac{di}{dt}$$

que sumada a la de la xarxa és la tensió que veu el tub, com aquesta tensió és superior a la d'encebat (que ha disminuït gràcies a l'escalfament dels electrodes) l'arc s'enceba en el tub principal, la tensió suportada pel tub passa a ser, gràcies al balast, menor que la de la xarxa i no permet un reencebament del tub de l'encebador quedant aquest fora de servei a l'espera d'una propera connexió.

L'arc del tub principal manté un fort grau d'ionització i per tant, ni que el corrent passi per zero a cada semiperíode en el cas de corrent altern i, per tant, l'arc s'interrompi, en el proper semiperíode, amb la tensió de la xarxa ja n'hi ha prou per encebar-se sense necessitat de l'encebador, la làmpada continua en funcionament fins que l'apaguem. La necessitat del sistema d'arrencada és perquè si el tub és fred, la tensió d'encebat és superior a la de la xarxa.

L'arc s'extingeix i es reenceba 100 cops per segon, però gràcies a l'efecte Talbot la visió que en tenim és contínua, també apareixen fenòmens estroboscòpics a freqüències de rotació múltiples de 50 Hz.

El petit condensador de l'encebador està destinat a l'eliminació de les interferències electromagnètiques provocades per l'obertura del bimetall.

De la potència elèctrica consumida pel tub, en un cas típic, una petita fracció (2.5%) es transforma en llum visible, una altra fracció (60%) es transforma en radiació en la banda dels ultraviolats UV i la resta (37.5%) en calor.

Les parets del tub estan recobertes d'una pols de substàncies fluorescentes (compostos de fòsfor) que són capaces, per foto-excitació electrònica de transformar part de la radiació UV rebuda en llum visible (22.5% del total) i la resta de radiació UV la transformen a calor (37.5% del total). Així doncs, les làmpades de fluorescència tipus fan una transformació del 25% de l'energia a radiació visible i del 75% a calor i radiacions no visibles (fonamentalment calor).

En funció de les classificacions i forma dels components es pot aconseguir una àmplia gamma d'espectres d'emissió que varien tan el color aparent de la làmpada com el rendiment energètic i lluminós que pot tenir essent els valors més habituals de rendiment lluminós de 40 a 80 lm/W i una vida d'unes 8000 hores.

Tradicionalment, els rendiments lluminosos amb fluorescents han estat molt dependents de la temperatura ambient, cosa que dificultava la seva aplicació en determinades instal·lacions, com en el cas de l'enllumenat viari, amb l'ús d'electrodes constituïts amb amalgames de mercuri; aquesta dependència ha disminuït sensiblement.

També són de recent incorporació balasts electrònics que treballen a altes freqüències 10 ÷ 50 kHz que a més de disminuir el tamany dels equips allarguen la vida de la làmpada.

Com la majoria de balasts convencionals són reactius, convé instal·lar junt amb la làmpada un condensador per compensar l'energia reactiva consumida.

11-3- Làmpades de vapor de sodi a baixa pressió (VSBP)

També són làmpades de descàrrega amb gasos rars com neó (Ne) o argó (Ar) a pressions parcials de 100 a 1000 Pa que en lloc de mercuri (Hg) com en els fluorescents tenen en el seu interior sodi (Na) a pressions parcials d'1 Pa.

Per mantenir l'arc és necessari que la temperatura del gas sigui elevada, és per això que es tanca el tub de descàrrega anomenat cremador dins un altre tub amb un reflector d'infrarojos.

L'encebament no precisa elements auxiliars, amb la làmpada freda el sodi està dipositat a les parets, aplicant tensió s'inicia la descàrrega en el neó que té un rendiment lluminós baix però que escalfa el sodi que es va vaporitzant, la làmpada va augmentant de rendiment i temperatura fins a arribar al règim permanent en uns 15 minuts. En cas d'apagament de la làmpada cal esperar de 3 a 7 minuts a què el sodi es solidifiqui per iniciar la reencesa ja que si hi ha sodi vaporitzant a temperatures inferiors a la de règim permanent el neó no enceba l'arc inicial.

Com la tensió d'encebament és superior a la de xarxa (300 a 600 V) el balast es realitza mitjançant un autotransformador elevador saturable.

La principal característica d'aquestes làmpades és el seu elevat rendiment lluminós, de l'ordre de 180 lm/W, el millor de què disposem, l'inconvenient principal és, però, que l'emissió de llum és quasi monocromàtica compresa entre els 589 i els 589.6 nm (color taronja típic) de forma que la reproducció del color dels objectes il·luminats és nul·la. La vida útil és d'unes 7000 hores.

En els tubs de molt petita potència (18 W) l'equip és similar al dels fluorescents amb reactància i encebador.

11-4- Làmpades de vapor de sodi a alta pressió (VSAP)

Es diferencia de l'anterior perquè la pressió parcial del sodi és major (10 kPa) i, per tant, la temperatura a l'interior del cremador també. La pressió interior és superior a l'atmosfèrica, cosa que junt amb l'elevada temperatura i l'alta reactivitat química del sodi en aquestes condicions dificulten la seva construcció.

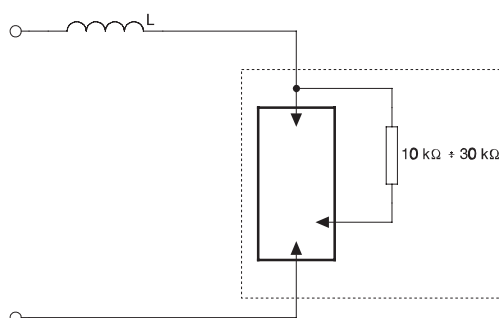
Tenen una tensió d'encebament alta (~ 2 kV), per la qual cosa necessita com equip auxiliar una reactància de balast i encebador.

El rendiment lluminós és inferior als VSBP (125 lm/W) però l'espectre d'emissió és més complet, mancant-hi només els blaus d'on surt el típic color grogós. La reproducció de color no és massa bona però mai tan dolenta com el VSBP. La vida útil normal és d'unes 8000 o 9000 hores.

11-5- Làmpades de vapor de mercuri a alta pressió (VMAP)

Consisteix en un tub de descàrrega anomenat cremador que es tanca dins d'una ampolla per pujar suficientment la temperatura. A més dels gasos rars s'inclou mercuri que arriba a pressions de treball altes (2 a 18 atmosferes).

L'arrencada es realitza mitjançant un electrode auxiliar que enceba un arc sobre els gasos rars, l'energia del qual serveix per escalfar el mercuri, l'arc inicial té un balast resistiu de gran resistència de manera que quan s'ha arribat al règim permanent el corrent per l'electrode auxiliar és menyspreable. El temps d'encesa és de l'ordre d'uns 4 minuts i cal esperar que condensi el mercuri (uns 5 minuts) per a la reencesa. El rendiment és de l'ordre dels 50 lm/W i la reproducció de colors força bona ja que emet en un espectre de freqüències relativament ampli predominant el blau/verd. La vida de les làmpades VMAP és superior a 12000 hores i l'estabilització es realitza amb balast inductiu.



Hi ha la varietat anomenada de color corregit en la qual es recobreix la superfície interior de l'ampolla amb una pols fluorescent de forma que deixi passar la llum visible generada i converteixi part de la radiació UV emesa a visible augmentant una mica el rendiment (60 lm/W) i millorant la reproducció de color doncs afegeix el vermell que li mancava.

També hi ha la varietat anomenada llum barreja que consisteix a estabilitzar l'arc mitjançant un balast resistiu que no és més que un filament d'incandescència, amb això s'obté una reproducció de color molt bona ja que la part de descàrrega dona els tons freds i la part incandescent els calents, la vida útil s'escurça a 6000 hores i el rendiment baixa a 30 lm/W.

11-6- Làmpades d'halogenurs metàl.lics

Són en realitat làmpades VMAP que formen família independent pel fet de portar halogenurs metàl.lics afegits i tenir formes, potències i aplicacions diferents.

Es caracteritzen per ser de gran potència (5 kW), s'apliquen a l'enllumenat per projecció (retransmissions televisades, immersió en llum d'edificis, ...), tenen una bona reproducció de color, un rendiment de 80 a 90 lm/W i una vida de 6000 a 7000 hores. La seva aplicació a l'enllumenat viari és excepcional.

11-7- Fluxs aproximats i tipus més habituals de làmpades (a les 2000 hores de funcionament)

Llum barreja			
160 W / 2700 lm	250 W / 4900 lm	500 W / 11500 lm	
Vapor de mercuri de color corregit			
80 W / 3500 lm	125 W / 5500 lm	250 W / 12000 lm	
400 W / 21500 lm	700 W / 38000 lm	1000 W / 58000 lm	
Vapor de sodi a baixa pressió			
55 W / 7500 lm	90 W / 12500 lm	135 W / 21500 lm	
180 W / 31500 lm			
Vapor de sodi a alta pressió			
70 W / 5300 lm	150 W / 15000 lm	250 W / 26500 lm	
400 W / 46000 lm			

12- Lluminàries

S'entén per lluminària l'aparellatge òptic (que de vegades suporta l'aparellatge elèctric) necessari per distribuir la distribució de llum en l'espai de la forma desitjada. El seu funcionament es basa en les lleis de la reflexió i la refracció.

Les lluminàries es classifiquen, entre d'altres, segons els criteris d'obertura del feix de llum, així tenim

CUT-OFF: feix molt poc obert
 NON CUT-OFF: feix molt obert
 SEMI CUT-OFF: obertura de feix intermitja

Les més emprades en enllumenat viari són les CUT-OFF i SEMI CUT-OFF ja que les NON CUT-OFF tendeixen a oferir coeficients d'utilització molt baixos i enlluernaments elevats.

13- Instal·lacions singulars

Hi ha dos casos d'enllumenat viari que són singulars: els túnels llargs i els passos inferiors. Descriure de forma detallada la problemàtica i les seves possibles solucions són fora de l'abast del nostre curs, solament esmentarem la causa principal de la necessitat d'un enllumenat particular d'aquest tipus de situació: el forat negre.

Efectivament, a diferència de la resta de l'enllumenat viari, la màxima necessitat luminotècnica es dona quan la llum natural és present i la mínima a la nit. En el tram d'entrada del túnel tenim una luminància molt baixa mentre que en l'exterior, especialment en dies assolellats, és molt alta. Això provoca que el contrast d'un objecte dins el túnel amb el fons del túnel sigui molt inferior que el contrast de dins a fora i que la visió de l'interior sigui impossible, és l'anomenat fenomen forat negre.

Per evitar-ho caldrà dotar la part d'entrada del túnel amb una luminància gran (instal·lació costosa i explotació cara), com major sigui la luminància de l'exterior, major haurà de ser la de l'interior.

Si el túnel és prou llarg, per raons d'economia, s'instal·larà la luminància gran en el tram d'entrada, anomenat tram d'adaptació, ja que l'ull necessita força temps per adaptar-se a una situació de luminància menor, més endavant es poden baixar els nivells de luminància, en el tram anomenat de transició fins a arribar al nivell mínim, la situació es repeteix a la sortida atès que cal facilitar l'adaptació de l'ull a la forta luminància exterior, sortosament l'adaptació de menys a més luminància és més ràpida i el tram de sortida és més curt.

Cal preveure doncs en els túnels i passos inferiors una il·luminació molt major que en la resta de l'enllumenat viari, adaptable a la quantitat de llum existent a l'exterior; fa que el cost en aspectes luminotècnics d'una instal·lació d'aquest tipus sigui comparativament molt elevat.

Càrregues no lineals

Entenem per càrrega no lineal un consum en què la forma de l'ona de corrent no és igual a la de l'ona de tensió. Si, per exemple, alimentem una càrrega no lineal amb una tensió sinusoidal absorbirà un corrent que no serà sinusoidal.

1- Definicions

1-1- Descomposició d'una ona distorsionada

Anomenem **Ona distorsionada** a tota aquella ona periòdica que té una forma no sinusoidal. Tota ona distorsionada que sigui periòdica de freqüència f es pot descomposar en suma de funcions sinusoidals de freqüències múltiples de f (f , $2f$, $3f$, ...) segons la teoria desenvolupada per Fourier. Així, podem escriure

$$i(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + a_3 \cos 3\omega t + \dots \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$
$$+ b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + b_3 \sin 3\omega t + \dots$$

el càlcul dels coeficients a_n i b_n es realitza segons les següents expressions

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos \frac{2\pi nt}{T} dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \sin \frac{2\pi nt}{T} dt$$

Sabem que una funció del tipus

$$f(t) = F \cos(\omega t - \alpha)$$

la podem descomposar en suma d'una funció sinusoidal i una cosinusoidal

$$f(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t \quad A = F \cos \alpha \quad B = F \sin \alpha$$

Basant-nos en aquesta propietat i en el fet que el valor de pic d'una ona sinusoidal és $\sqrt{2}$ cops el valor eficaç, podem escriure la sèrie de Fourier de la funció $i(t)$ com

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} I_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2} I_2 \cos(2\omega t + \varphi_2) + \dots$$

que podem escriure

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$$

A partir d'ara parlarem d'una component de freqüència f i fase φ_1 , una de freqüència $2f$ i fase φ_2 , etc.

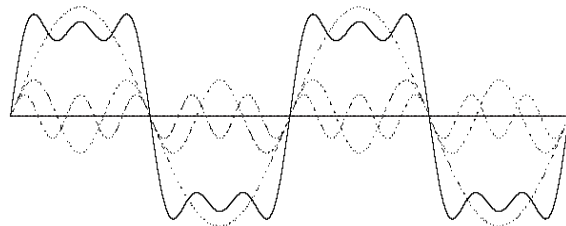
Al terme constant (I_0) se l'anomena **component contínua**, a l'ona de freqüència f se l'anomena **component fonamental** mentre que a les de freqüències $2f$, $3f$, $4f$, etc. se les anomena **components harmòniques** o, simplement, **harmònics**. Entenem per **ordre** d'un harmònic al nombre de cops que la seva freqüència és més gran que la fonamental; així la component de freqüència $7f$ és el 7^e harmònic.

La component contínua és igual al valor mig de l'ona. En el cas d'ones simètriques respecte a l'eix temporal no hi haurà component contínua ni harmònics parells.

El valor eficaç de la funció es podrà escriure com

$$I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}$$

En la figura següent es mostra una ona distorsionada (línia sòlida) i les seves components (línies discontinües). La que té la mateixa freqüència que l'ona que analitzem és la component fonamental i les altres són les components harmòniques. En la figura anterior les altres dues components són harmònics d'ordres 3 (la que fa tres cicles en un període de la fonamental) i 5 (la que fa cinc cicles).



En les instal·lacions elèctriques de potència prenem com a freqüència fonamental la freqüència del sistema (50 Hz). Això fa que puguin aparèixer components de freqüència menor que la fonamental; o sigui l'ona varia d'amplitud seguint un procés periòdic (ona modulada). A les components de freqüència inferior a la fonamental se les anomena **subharmònics**.

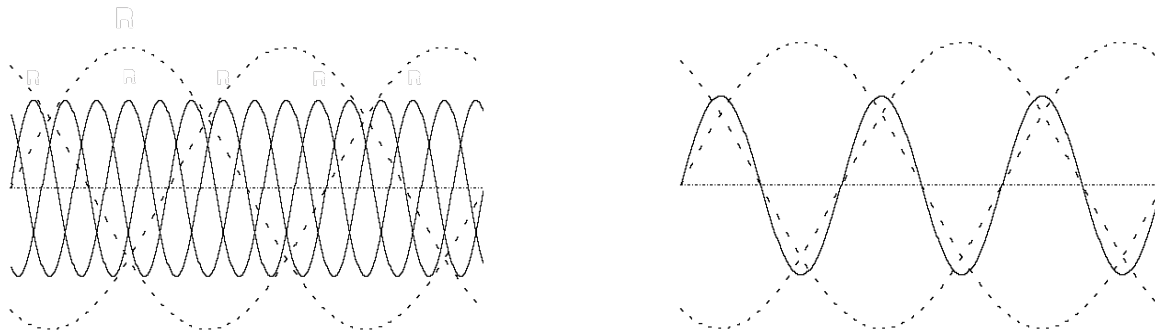
Algunes càrregues consumeixen corrents quasi aleatoris que poden ser descomposats per cicle en diverses components moltes de les quals tindran una freqüència no múltiple de la fonamental. Aquestes components s'anomenen **interharmònics**.

1-1-1- Seqüència dels harmònics

En un sistema trifàsic no distorsionat els corrents de les tres fases porten un cert ordre. Si el sistema és simètric i la càrrega també les tres ones de corrent tindran el mateix mòdul i estaran desfasades 120° ; direm que la seqüència és directa si l'ordre amb què les tres ones passen successivament per un estat és A-B-C i direm que és inversa si és C-B-A.

Amb ones distorsionades es pot fer el mateix plantejament amb cada un dels harmònics. Suposem un sistema trifàsic en que els corrents de les tres fases estan distorsionats i les seves formes d'ona són iguals, desfasades 120° i de seqüència directa.

En aquestes condicions les components fonamentals formen un sistema de seqüència directa com fàcilment es pot deduir, les ones del cinquè harmònic formen un sistema de seqüència inversa (figura de l'esquerra) i les tres ones de tercer harmònic estan en fase (figura de la dreta). Un sistema trifàsic format per tres ones iguals i en fase s'anomena de seqüència homopolar.



De la mateixa manera el setè harmònic tornarà a ser de seqüència directa i així successivament. En la següent taula hi ha la classificació dels harmònics segons la seqüència.

Directa	Inversa	Homopolar
1	2	3
4	5	6
7	8	9
10	11	12
...
$3n-2$	$3n-1$	$3n$

Així si la seqüència de les ones fonamentals és la directa, tots els harmònics d'ordre $3n-2$ seran de seqüència directa, els d'ordre $3n-1$ de seqüència inversa i els d'ordre $3n$ de seqüència homopolar.

1-2- Mesura de la distorsió

Per mesurar la distorsió es defineix la distorsió harmònica total (**THD Total Harmonic Distortion**) com el quocient entre el valor eficaç del conjunt de les components harmòniques i el valor eficaç de la component fonamental.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \qquad THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}$$

1-3- Potències

Si una càrrega està sotmesa a una tensió $u(t)$ i deixa passar un corrent $i(t)$

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \cos(n\omega t + \alpha_n) \qquad i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \cos(n\omega t + \beta_n)$$

on n és senar, definim les potències activa (P) i reactiva (Q) com

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} I_n U_n \cos(\alpha_n - \beta_n) \qquad Q = \sum_{n=1}^{\infty} I_n U_n \sin(\alpha_n - \beta_n)$$

i anomenem potència aparent al producte dels valors eficaços de tensió i corrent.

$$S = UI = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$$

L'equació que relaciona P , Q i S en règim sinusoidal ja no és vàlida en presència d'harmònics. Es defineix la potència de distorsió (D) com

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

El factor de potència (FP) no és assimilable al cosinus de cap angle sinó que simplement és el quocient entre la potència activa i la potència aparent.

$$FP = \frac{P}{S}$$

2- Elements generadors d'harmònics

Hi ha molts tipus de càrregues creadores de corrents harmònics però bàsicament poden agrupar-se en tres grups:

- Elements que contenen inductàncies saturables
- Elements que treballen amb arcs de descàrrega
- Equips electrònics

aquests tipus seran analitzats a continuació.

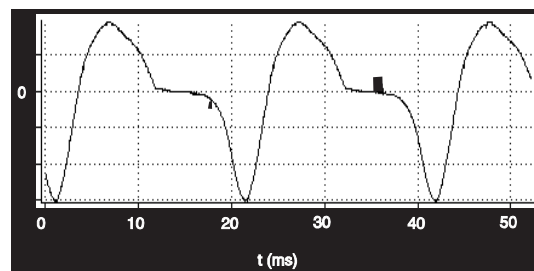
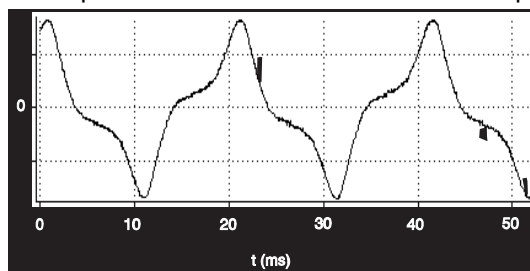
2-1- Elements que contenen inductàncies saturables

Les inductàncies amb nucli de ferro tenen un comportament no lineal a causa de la saturació del nucli. A mida que la tensió entre els seus borns va pujant, el ferro va saturant-se de forma que el coeficient d'autoinducció disminueix. Això fa que el corrent augmenti més que proporcionalment amb la tensió resultant, per tant, distorsionat. Cal tenir en compte que, a més, la histèresi provoca l'aparició d'ones de corrent magnetitzant asimètriques, o sigui amb contingut d'harmònics parells.

Exemples d'inductàncies saturables són els transformadors, els motors i les reactàncies de làmpades de descàrrega.

Els transformadors solen dissenyar-se per a treballar molt a prop de la saturació per tal de reduir cost i pes del nucli; això fa que el corrent magnetitzant tingui força harmònics, principalment el tercer. És habitual que els transformadors treballin alimentats amb sobretensió per tal de compensar les caigudes de tensió, cosa que provoca una més gran absorció de corrents harmònics.

Aquesta distorsió del corrent magnetitzant pot ser despreciable en un transformador a plena càrrega però esdevé important quan el transformador està força descarregat. A la figura de l'esquerra s'hi representa l'ona de corrent absorbida per un transformador en buit.



És sabut que els transformadors no són capaços de deixar passar corrents continus. Un transformador que es vegi obligat a subministrar corrent continu al secundari es veurà sotmès a una forta saturació asimètrica i consumirà un corrent fortament distorsionat. En la figura de la dreta es pot veure la forma d'ona fortament distorsionada que correspon al corrent primari (magnetitzant més càrrega) d'un transformador alimentant un rectificador monofàsic de mitja ona amb càrrega resistiva.

2-2- Elements que treballen amb arcs de descàrrega

Es produeix un arc de descàrrega quan el corrent elèctric circula per l'aire (o un altre gas o el buit), habitualment entre dos electrodes. Els arcs de descàrrega es caracteritzen per tenir una resistència inversament proporcional (aproximadament) al corrent que circula, que és la causa de la seva no-linealitat. En aquest tipus de càrregues s'hi inclouen les làmpades de descàrrega i els soldadors d'arc.

Una resistència que disminueixi de valor en augmentar el corrent que hi circula portarà, si es connecta a una font de tensió, inevitablement a un curt circuit. Per aquest motiu és habitual que aquestes càrregues portin una reactància amb nucli de ferro en sèrie, que pot entrar fàcilment en saturació.

Així aquest tipus de càrrega té una elevada no-linealitat ja que està formada per elements no lineals de característiques diferents.

En el cas de l'enllumenat s'acostuma a posar un condensador per compensar la potència reactiva cosa que pot provocar un augment dels harmònics si el condensador i la reactància tenen una freqüència de ressonància propera a la d'algun dels harmònics presents. Algunes làmpades halògenes consumeixen component contínua i harmònics parells.

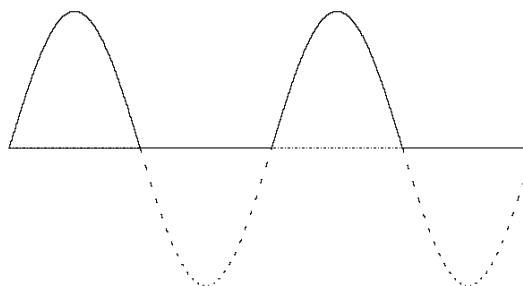
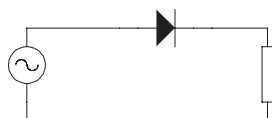
En el cas dels soldadors, l'arc és clarament no constant ni homogeni, fet que porta l'aparició de subharmònics i interharmònics.

2-3- Equips electrònics

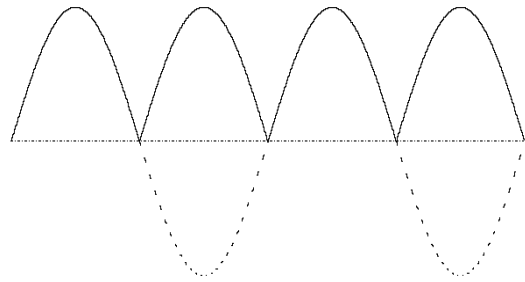
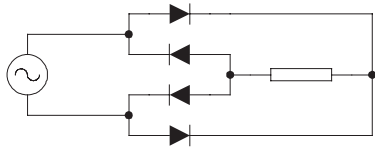
Els equips electrònics es basen en elements semiconductors. Entre ells el més habitual és el **diode**. Un diode és un element que només deixa passar el corrent en un sentit. La fletxa que forma part del seu símbol indica el sentit en què deixa passar el corrent.



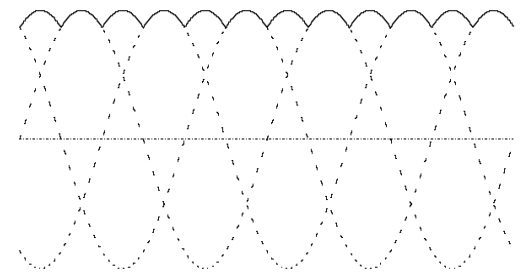
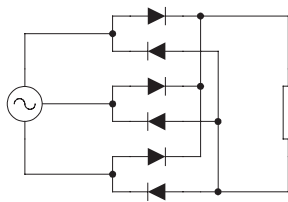
En el circuit de la figura, atès que la càrrega és una resistència, quan la tensió és positiva també ho és el corrent i el diode conduirà mentre que si és negativa el diode no conduirà. Aquest circuit s'anomena rectificador de mitja ona.



Per aprofitar també els semicicles negatius es pot emprar el rectificador d'ona completa.



Si es disposa d'una xarxa trifàsica es pot emprar el muntatge de la figura en el qual, a cada instant, només condueixen dos diodes.



Sovint el rectificador de mitja ona no és emprat per obtenir corrent continu sinó per reduir la tensió d'elements de característica resistiva. Per exemple moltes estufes elèctriques porten un diode en sèrie per tal de reduir la potència i un interruptor que fa un pont al diode quan a l'usuari li interessa la màxima potència.

Aquests equips provoquen l'aparició de components contínues i harmònics parells i, a més, provoquen greus saturacions als transformadors com ja s'ha vist. La norma *UNE-21-806-90 part 2* prohibeix aquesta pràctica en receptors de potència superior als 200 W.

Els rectificadors per obtenir corrent continu solen ser d'ona completa. En molts casos interessa poder variar la tensió de sortida dels rectificadors i llavors es substitueixen els diodes per dispositius que només deixen passar corrent en un sentit quan estan activats i si no no deixen passar corrent (tiristors).

Habitualment a la sortida d'un rectificador s'acostuma a posar una inductància en sèrie o un condensador en paral·lel per tal de disminuir l'arriestat. Els rectificadors es podran classificar segons el filtre (inductiu o capacitiu) que portin.

2-3-1- Rectificadors amb filtre inductiu

Les ones de corrent que consumeixen de la xarxa són similars a l'ona quadrada ja que quan condueix un diode la gran inductància en sèrie fa que el corrent sigui quasi constant i quan passa a conduir l'altre canvia el signe del corrent a la xarxa però no el de la càrrega. En una ona quadrada hi són presents tots els harmònics senars i la seva amplitud és inversament proporcional al seu ordre.

En els rectificadors trifàsics alguns harmònics no apareixen a causa que les ones de corrent continuen estant formades per rectes però tenen més de dos nivells ja que la major part del temps només condueixen dues fases. El seu contingut d'harmònics ve donat per l'equació

$$h = kq \pm 1 \qquad I_h = \frac{I_1}{h}$$

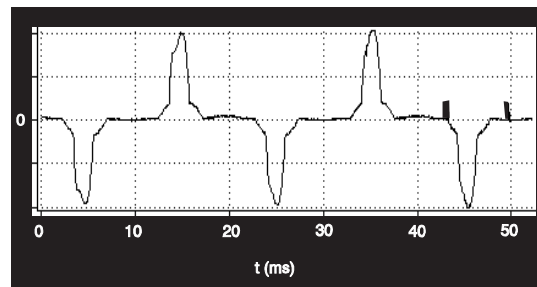
on q és el nombre de polsos del rectificador que en els trifàsics més habituals és 6. Aquests harmònics s'anomenen característics però, a més d'aquests, hi ha els causats per les asimetries.

L'aplicació més habitual d'aquests equips és la variació de velocitat de motors de corrent continu.

2-3-2- Rectificadors amb filtre capacitiu

El condensador de la sortida manté una tensió propera al valor de pic de la sinusoide. Això fa que la conducció dels diodes es verifiqui només quan la tensió de la xarxa és superior a la del condensador, és a dir en un temps molt curt al voltant del pic de l'ona de tensió.

Tota l'energia de la càrrega serà absorbida en un temps molt curt per tant el corrent serà en forma de pics molt alts i estrets, com es mostra a la figura. A més totes les càrregues d'aquest tipus absorbeixen el pols de corrent en el màxim de la sinusoide, cosa que fa que el corrent total sigui de la mateixa amplada però amb més alçada.

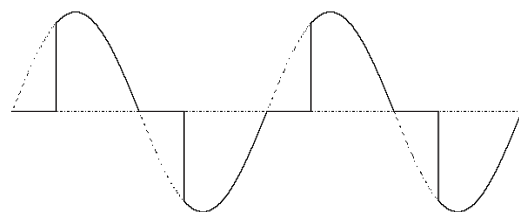


L'amplada d'aquest pols està habitualment entre 2 ms i 3 ms mentre que mig període de l'ona de tensió són 10 ms.

Aquest tipus de convertidor és el més emprat. El podem trobar en els variadors de freqüència, en les fonts d'alimentació dels aparells electrodomèstics (televisors, magnetoscòpis, equips HiFi, microones, etc.) i d'oficina (ordinadors, fotocopiadores, fax, etc.) i en els carregadors de bateries (en quin cas la bateria fa les funcions de condensador).

2-3-3- Reguladors de tensió alterna

Els reguladors són equips que basen el seu funcionament en retallar les ones de tensió que rebrà la càrrega, de forma que des d'un angle 0 fins a un angle α la tensió a la càrrega és nul·la i des d' α fins a π té un valor igual al de la tensió de la xarxa. En el següent semiperíode l'efecte és simètric.



El fet que la sinusoide no estigui completa fa disminuir el seu valor eficaç. Els reguladors s'empren per a l'arrencada i reducció de potència de motors d'inducció (serres, trepants, etc.) tant monofàsics com trifàsics així com a reguladors de llum. Els reguladors proporcionen un contingut d'harmònics molt variable en funció del valor de l'angle α .

Hi ha alguns aparells en què la regulació es fa deixant passar o no semiones senceres; en aquest cas la tensió eficaç promig a la càrrega depèn de la relació entre semiperíodes blocats i semiperíodes no blocats. Poden provocar, segons els casos, la presència de subharmònics, components contínues i harmònics parells.

2-4- Aparició de tensions distorsionades

Els generadors de tensió d'elevada potència, com són els de les centrals, subministren tensions que es poden considerar sinusoidals. En la xarxa de distribució les tensions es poden considerar sinusoidals en origen però la circulació de corrents harmònics provoca l'aparició de caigudes de tensió que, a causa que les línies i els transformadors són inductius, augmenten amb la freqüència donant lloc a tensions distorsionades en els punts de consum.

Les ressonàncies que puguin aparèixer entre les bateries de condensadors i les inductàncies dels transformadors i les línies poden provocar tensions o corrents, de la freqüència de ressonància, molt elevats.

Especialment perjudicats seran aquells consumidors que tinguin la seva instal·lació connectada a la xarxa en el mateix punt que un consumidor amb càrregues fortament distorsionants.

3- Efectes dels harmònics

Els harmònics de corrent afecten al sistema elèctric i a alguns tipus de càrregues que s'hi connecten. Si, a més dels harmònics de corrent, apareixen els de tensió es veuran afectades la majoria de les càrregues. En alguns casos l'aparició d'harmònics de tensió en l'alimentació d'algunes càrregues no lineals pot provocar un augment important de la distorsió de l'ona de corrent d'aquestes càrregues.

3-1- Efectes sobre els motors

Els harmònics provoquen en els motors un augment de les pèrdues en el ferro i en el coure que provocaran sobreescalfament; per tant caldrà sobredimensionar-los. Aquestes pèrdues portaran a una reducció de la vida de la màquina.

Les pèrdues en els motors d'inducció (tant monofàsics com trifàsics) són a causa no tant sols del contingut d'harmònics sinó també al valor màxim del flux. Els mateixos harmònics provoquen més pèrdues en motors d'inducció que en transformadors. No haurien d'alimentar-se els motors amb més d'un 5% de THD en tensió.

Cada un dels harmònics de tensió presents a la xarxa tendeix a fer girar al motor a una velocitat diferent, la corresponent a la seva freqüència. Habitualment, quan la component fonamental és molt més gran que les components harmòniques, la velocitat del motor serà la que li correspondria si no hi hagués harmònics presents.

Aquesta presència d'harmònics provoca en el motor l'aparició de parells de gir paràsits que poden provocar oscil·lacions amb el conseqüent desgast mecànic. Aquests harmònics provoquen, a més, un sobrecalfament del motor que probablement escurçarà la seva vida.

3-2- Efectes sobre les mesures de magnituds elèctriques

Molts aparells de mesura de tensions o corrents són sensibles al valor eficaç (aparells de ferro mòbil, aparells tèrmics, *testers* tipus *True-RMS*, etc.), al valor mig rectificat (aparells de quadre mòbil, *testers* convencionals, etc.) i altres al valor de pic (alguns aparells electrònics).

Atès que interessa mesurar el valor eficaç de tensions i corrents, s'acostuma a fer la correcció de l'escala per tal que, quan l'ona d'entrada és sinusoidal, la indicació correspongui al valor eficaç. Així en els aparells sensibles al valor mig, l'escala indica el valor mesurat multiplicat per 1.11 mentre que en els sensibles al valor màxim es multiplica per 0.707 .

Aquest fet dona lloc a que la lectura d'aquests aparells només sigui correcta quan l'ona d'entrada és sinusoidal. En la taula següent es presenten aproximadament els valors que marcarien diversos tipus d'aparells per a unes quantes formes d'ona típiques; s'ha agafat com a base el valor eficaç.

Forma d'ona	Eficaç	1.11 Mig	0.707 Pic
Sinusoidal	1.00	1.00	1.00
Quadrada	1.00	1.11	0.71
Triangular	1.00	0.97	1.22
Convertidor amb filtre capacitiu	1.00	0.5	2.01
Neutre convertidors amb filtre capacitiu	1.00	0.87	1.36
Sinusoide i convertidor amb filtre capacitiu	1.00	0.83	1.68

Els aparells que mesuren el factor de potència basant-se en l'angle de fase poden donar resultats molt allunyats de la realitat amb ones distorsionades. El factor de potència només es pot obtenir com a quocient entre el valor mig de la potència instantània i el producte de valors eficaços de tensió i corrent. Els wattímetres magnetoelèctrics mesuren el valor mig de la potència instantània.

Els harmònics poden saturar els transformadors de tensió provocant errors de mesura. Pel que fa als transformadors de corrent, apareix un decalatge entre els corrents de primari i secundari.

3-2-1- Errors en els comptadors d'energia

En parlar dels errors en les mesures elèctriques a causa dels harmònics és clàssica la pregunta sobre si la facturació a la que porten els comptadors és la correcta, inferior o superior a aquesta. Aquesta pregunta sembla difícil de respondre si es tenen en compte les dificultats que apareixen a l'intentar analitzar el comportament dels comptadors en presència d'harmònics.

Si s'analitza amb profunditat la pregunta s'arriba a la conclusió de que la pròpia pregunta no té sentit. Veiem-ho amb un parell d'exemples.

Una instal·lació elèctrica està composta exclusivament per càrregues de tipus resistiu (forns de resistències, làmpades d'incandescència, estufes, etc.). Tota la potència activa que entra en la instal·lació es converteix en potència útil (llum i calor) en els elements esmentats cosa que fa pensar que el comptador hauria d'indicar l'energia corresponent a la potència activa total.

Una segona instal·lació està composta exclusivament per motors d'inducció. Com ja hem vist els motors d'inducció converteixen a mecànica la potència activa deguda a la component fonamental (menys unes pèrdues), mentre que la resta de la potència activa total es converteix en calor (als debanats i als coixinets). En aquest cas el comptador hauria d'indicar tan sols l'energia corresponent a la component fonamental. Tot i així, si la tensió d'alimentació té harmònics, el client perd diners ja que la vida dels seus motors serà més curta.

3-3- Efectes sobre els cables i altres sistemes de distribució

S'anomena **efecte pel·licular** (efecte *skin*) al fet que el camp magnètic creat per un conductor provoca que el corrent en el propi conductor tendeixi a circular per la seva perifèria i no pel centre.

S'anomena **efecte de proximitat** al fet que el camp magnètic creat per un conductor provoca que el corrent en els conductors veïns no es distribueixi uniformement.

Aquests efectes no tenen gaire importància a 50 Hz pero si a freqüències superiors com són les dels harmònics. Ambdós efectes tenen com a conseqüència una disminució de la secció efectiva del conductor i, per tant, un augment de la seva resistència. En el cas de cables multiconductors la impedància depèn de la posició geomètrica de les fases entre elles i respecte al neutre.

Les caigudes de tensió poden augmentar força a causa de l'augment de la reactància del cable amb la freqüència així com per l'augment de la resistència a causa de l'efecte pel·licular. A més el corrent en si mateix pot augmentar força si apareix una ressonància.

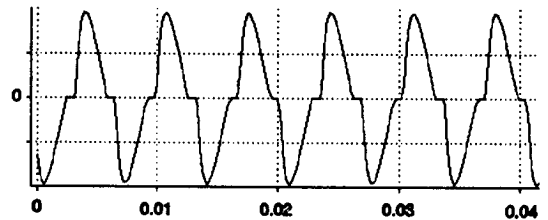
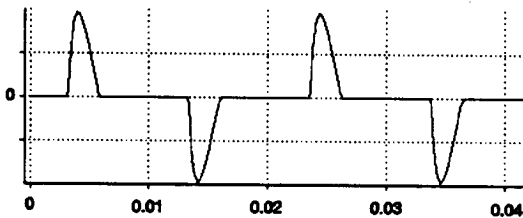
3-3-1- Corrent en el conductor neutre

Quan les càrregues monofàsiques estan connectades entre fase i neutre (que és la forma de connexió més habitual) sabem que les intensitats de les tres fases es sumen al neutre. Si les tres fases tenen corrents iguals en mòdul i factor de potència i amb forma sinusoidal, la seva suma és nul·la. Per aquest motiu és habitual instal·lar el neutre de secció més petita que les fases.

Quan les ones estan distorsionades la seva suma no és zero. Els harmònics d'ordres 3, 6, 9 i, en general, qualsevol ordre múltiple de tres (harmònics de seqüència homopolar) es sumen al neutre provocant la presència de corrents importants al neutre. Si la càrrega és equilibrada el corrent de neutre no tindrà component fonamental sinó que només tindrà components de seqüència homopolar, o sigui de 150 Hz i els seus múltiples.

Aquest important corrent de neutre, especialment si el neutre està sobrecarregat, fa que les caigudes de tensió en el neutre siguin importants cosa que fa aparèixer tensions neutre-terra no negligibles.

Per exemple en el cas de tres fonts d'alimentació idèntiques amb polsos estrets (menys de 3.3 ms) connectades en estrella, les tres intensitats queden de tal forma que quan una d'elles és diferent de zero les altres són nul·les. Com es mostra a les figures següents, això fa que els corrents no es cancel·lin al neutre de tal manera que el corrent de neutre és més gran que el de cada fase.



El valor mig i el valor eficaç del corrent de fase són

$$I_{mxF} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt$$

$$I_{RMSF} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t)]^2 dt}$$

Si en un semiperíode anomenem t_0 a l'instant en que comença el pols i t_1 a l'instant en que acaba, sabem que la funció és nul·la fora de l'interval $\{t_0, t_1\}$ i llavors, atès que en el segon semiperíode tant el valor absolut de la funció (cas del valor mig) com el quadrat de la mateixa (cas del valor eficaç) tenen el mateix valor que en el primer, recordant que la integral definida d'una funció és l'àrea tancada sota la corba, tenim

$$I_{mrF} = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_1} |\dot{i}(t)| dt$$

$$I_{RMSF} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_1} [\dot{i}(t)]^2 dt}$$

En el neutre el pols (positiu o negatiu) es repeteix sis cops per període de manera que la integral a l'interval $\{0, T\}$ serà sis cops més gran que en l'interval $\{t_0, t_1\}$; així

$$I_{mrN} = \frac{6}{T} \int_{t_0}^{t_1} |\dot{i}(t)| dt = 3 \left[\frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_1} |\dot{i}(t)| dt \right]$$

$$I_{RMSN} = \sqrt{\frac{6}{T} \int_{t_0}^{t_1} [\dot{i}(t)]^2 dt} = \sqrt{3} \sqrt{\frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_1} [\dot{i}(t)]^2 dt}$$

Comparant amb els valors de fase

$$I_{mrN} = 3 I_{mrF}$$

$$I_{RMSN} = \sqrt{3} I_{RMSF}$$

S'ha d'anar amb compte al dimensionar el neutre d'instal·lacions amb moltes càrregues electròniques (sovint es recomana que el neutre sigui de secció doble que les fases) i també al fer mesures ja que, tal com hem vist, el valor mig del corrent de neutre és tres cops més gran que el de fase, cosa que pot portar a sobredimensionar el neutre.

En línies que alimenten fluorescents el corrent de neutre pot variar entre 0.75 i 1.57 cops el corrent de fase; si en la tensió d'alimentació apareix un tercer harmònic, el tercer harmònic de corrent augmenta fortament. En algunes instal·lacions es retiren tubs fluorescents de les seves pantalles (mantenint els condensadors); això fa que el corrent de neutre augmenti molt. El reglament de baixa tensió obliga que en les instal·lacions d'enllumenat públic amb làmpades de descàrrega el neutre sigui de la mateixa secció que les fases.

Tot el que s'ha dit fins ara feia referència a corrents de fase iguals. Si les càrregues no estan distribuïdes simètricament, la secció del neutre haurà de ser encara més gran.

3-4- Efectes sobre els transformadors de potència

La circulació de corrents harmònics pels transformadors provoca, per efectes d'inducció, un augment de les pèrdues i caigudes de tensió en els debanats del transformador. Si la tensió de primari està distorsionada augmenten també les pèrdues en el ferro (histèresi i corrents induïts de Foucault). Tot això implica també un escalfament més gran del transformador.

A més els transformadors que s'alimenten amb tensions distorsionades produeixen un soroll audible i la seva vida es veu sensiblement reduïda. No s'haurien d'alimentar els transformadors amb tensions que tinguin més del 5% de THD.

El neutre dels transformadors trifàsics pot no tenir les dimensions apropiades a la instal·lació que s'hi connecta, de manera que caldrà emprar un transformador sobredimensionat.

3-4-1- Reducció de la intensitat segons ANSI/IEEE C57.110

La recomanació americana **ANSI/IEEE C57.110** (*IEEE recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents*) proposa un mètode per calcular la màxima intensitat (en valor eficaç) que pot entregar un transformador segons el contingut harmònic que tingui aquesta intensitat.

Aquest mètode de càlcul es basa en que una fracció (en un transformador normal és de l'ordre del 5 al 10%) de les pèrdues en els debanats és a causa de la circulació de corrents induïts. A l'assaig de curt circuit del transformador apareixen juntes, amb el nom de pèrdues al coure (P_{Cu}) o pèrdues en càrrega, les pèrdues que depenen del quadrat del valor eficaç de la intensitat amb les pèrdues a causa de fenòmens d'inducció.

L'equació que proposa la recomanació és

$$I_{m\grave{a}x}(pu) = \sqrt{\frac{1 + P_{ec-r}(pu)}{1 + \frac{\sum_{h=1}^{h_{m\grave{a}x}} \left(h \frac{I_h}{I_1} \right)^2}{\sum_{h=1}^{h_{m\grave{a}x}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} P_{ec-r}(pu)}}$$

on

$I_{m\grave{a}x}(pu)$	Corrent màxim que pot subministrar (en tant per u)
I_1	Component fonamental del corrent en valor eficaç
I_h	Component de l'harmònic d'ordre h del corrent en valor eficaç
$P_{ec-r}(pu)$	Fracció de les pèrdues en el coure a causa dels fenòmens d'inducció en règim nominal de funcionament (en tant per u)

El valor P_{ec-r} a vegades es pren 0.1 o 0.05 (segons hem comentat abans) però pot calcular-se segons l'expressió

$$P_{ec-r}(pu) = \frac{P_{Cu-r} - 3 R_P I_P^2 - 3 R_S I_S^2}{3 R_P I_P^2 + 3 R_S I_S^2} = \frac{P_{Cu-r}}{3 R_P I_P^2 + 3 R_S I_S^2} - 1$$

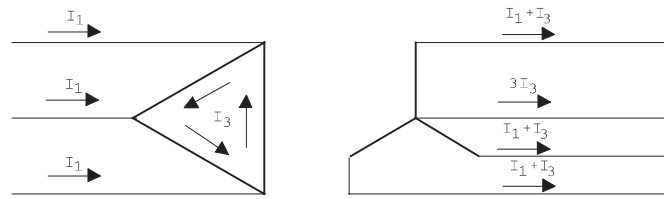
on

P_{Cu-r}	Pèrdues al coure en règim nominal de funcionament
R_P, R_S	Resistències del primari i del secundari en l'esquema equivalent per fase mesurades en corrent continu
I_P, I_S	Corrents nominals de primari i secundari

Obviament totes les magnituds s'expressen en unitats del SI excepte aquelles que ho fan en tant per un.

3-4-2- Debanats en triangle

En els transformadors triangle estrella els harmònics múltiples de tres que s'absorbeixen al secundari apareixen reflexats al primari. Atès que aquests harmònics estan en fase, per les tres inductàncies que formen el triangle passarà el mateix corrent (si la càrrega és equilibrada) de manera que aquest corrent no circularà pels fils que alimenten al triangle.



Aquests corrents harmònics estan circulant pel primari escalfant-lo però no són detectats per les proteccions ja que no passen per les fases d'alimentació; això pot provocar la destrucció del transformador.

3-5- Efectes sobre els condensadors

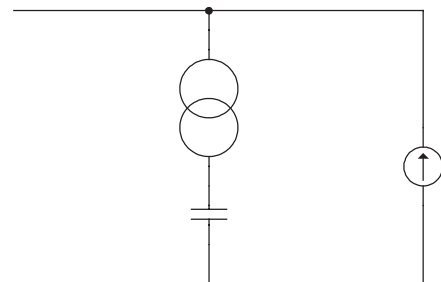
La impedància que presenta un condensador és inversament proporcional a la freqüència. Per això la presència d'harmònics fa que pel condensador circulin corrents harmònics de valor apreciable. Com a conseqüència els condensadors s'escalfen i acaben destruint-se.

Si es preveu que els harmònics de corrent a la instal·lació poden ser importants, serà convenient que els condensadors portin una inductància en sèrie per a limitar el corrent (o per a produir un efecte de filtrat com veurem més endavant).

3-5-1- Ressonància sèrie

Atès que les càrregues no lineals es comporten com a fonts de corrents harmònics, aquests circularan per la instal·lació, principalment per on trobin menor resistència; aquest serà el cas d'un condensador i una inductància que entrin en ressonància.

Per exemple pot haver-hi una ressonància sèrie quan, vist des de la càrrega no lineal, una bateria de condensadors i el transformador que l'alimenta estan en sèrie (figura).



La impedància del conjunt a la freqüència de ressonància és molt baixa de manera que, en cas que hi hagi una component d'intensitat a la freqüència esmentada, el corrent al condensador pot fer-se molt gran.

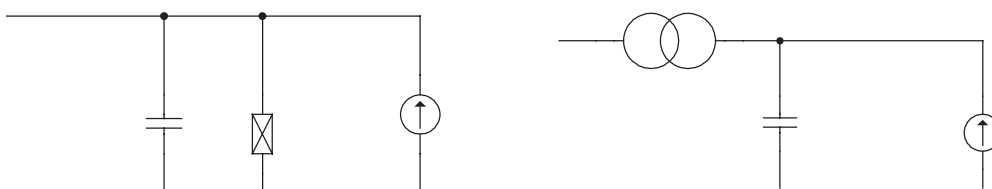
Cal recordar que malgrat la impedància del conjunt és molt petita, la de cada element és més gran de manera que la tensió del condensador pot ser fàcilment més gran que la tensió d'alimentació.

En aquest cas el condensador pot ser destruït per sobrecorrent o per sobretensió.

3-5-2- Ressonància paral·lel

Com més gran és la impedància que la instal·lació ofereix a la circulació dels corrents harmònics, més gran serà la tensió que apareixerà. El cas més desfavorable es produeix quan una de les freqüències harmòniques presents a la instal·lació presenta una ressonància paral·lel.

Apareix una ressonància paral·lel, per exemple, quan una bateria de condensadors està en paral·lel amb una càrrega inductiva o si la bateria és alimentada pel mateix transformador que la càrrega no lineal.



En aquest cas, vist des de la càrrega no lineal, el condensador està en paral·lel amb la inductància. La ressonància paral·lel fa que, a la freqüència de ressonància, la impedància del conjunt sigui molt elevada de manera que si la càrrega no lineal genera una component harmònica de corrent amb una freqüència propera a la de ressonància, apareixerà una forta component de tensió de l'esmentada freqüència en borns del condensador i totes les altres càrregues connectades al mateix punt. En aquest cas el condensador pot ser destruït.

3-6- Efectes sobre els grups electrògens

Aquests elements són fonts d'energia d'emergència, la qual cosa fa que en molts casos el seu funcionament no pugui ser comprovat en condicions de funcionament normal; llavors el dia que són necessaris apareixen els problemes de funcionament.

Els grups electrògens es caracteritzen per tenir una potència de curt circuit molt més petita que la de la xarxa; o sigui la seva impedància de sortida és molt més gran. Aquesta més gran impedància provoca més grans caigudes de tensió que provoquen distorsions també més grans. Aquesta impedància elevada comporta també que les freqüències de ressonància siguin molt menors cosa que desaconsella completament la compensació de reactiva a la sortida d'aquests equips si les càrregues no han de ser totes lineals.

En la majoria dels casos, quan la xarxa torna a estar present el grup intenta sincronitzar-se amb la xarxa abans de transferir els consums. Si la tensió en borns de l'equip està molt distorsionada la sincronització automàtica es fa molt difícil de manera que la transferència automàtica pot esdevenir impossible.

Les càrregues que absorbeixen corrents amb valors de pic elevats (per exemple les electròniques) requereixen un sobredimensionament de l'equip. Si l'equip es dimensiona a partir de la potència aparent de la càrrega, el seu límit estarà de l'ordre de 1.41 cops el seu valor eficaç, però en aquestes càrregues aquest factor pot ser molt més gran de manera que el grup no funcionarà correctament. Per aquest motiu es recomanable no dimensionar l'equip pel valor eficaç del corrent sinó pel valor de pic dividit per arrel de dos, tal com es mostra en les expressions següents.

En monofàsic

$$S = \frac{V \cdot I_{m\grave{a}x}}{\sqrt{2}}$$

En trifàsic

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I_{m\grave{a}x}}{\sqrt{2}}$$

3-7- Efectes sobre els equips electrònics

Els equips que es basen en la freqüència de la xarxa poden tenir problemes. Per exemple els rellotges basats en els passos per zero de la tensió poden donar greus problemes de precisió en el cas d'ones de tensió amb una distorsió important.

En els variadors de velocitat que retallen l'ona poden haver-hi errors en la sincronització amb els passos per zero que fins i tot són destructius en alguns casos.

4- Filtres per a reduir el contingut d'harmònics

Un filtre és un circuit elèctric que deixa passar corrents de determinades freqüències i no deixa passar els de les altres. Els filtres poden classificar-se de diferents formes que comentarem a continuació.

Els filtres es poden connectar en sèrie i en paral·lel. El cas sèrie és escassament emprat en potència ja que el fet que tot el corrent de les freqüències tolerades hagi de passar pel seu interior obliga a unes potències implicades molt elevades. El filtre paral·lel, en canvi, només ha de deixar passar els corrents de les freqüències a eliminar i podrà ser, per tant, més reduït.

Segons el seu comportament poden ser de quatre tipus:

- Passa-alts. Deixa passar tots els corrents de freqüències per sobre la freqüència característica del filtre.
- Passa-baixos. Deixa passar tots els corrents de freqüències per sota la freqüència característica del filtre.
- Passa-banda. Deixa passar tots els corrents de freqüències al voltant de la freqüència característica del filtre. També s'anomenen filtres sintonitzats.
- Para-banda. Bloqueja tots els corrents de freqüències al voltant de la freqüència característica del filtre i deixa passar la resta.

Els filtres més emprats en potència són els paral·lels que són sempre passa-banda (filtre sintonitzat) i passa-alts.



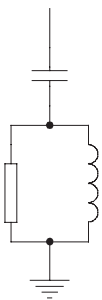
Els **filtres sintonitzats** estan formats per branques RLC com la de la figura. La impedància d'aquest conjunt vindrà donada per l'equació

$$\underline{Z}(f) = R + j \left[2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} \right]$$

on R és la suma de la resistència pròpia de la inductància i aquella que opcionalment posarem en sèrie amb el conjunt.

Aquesta associació presenta un punt d'impedància mínima en l'anomenada freqüència de sintonització (que coincideix amb la freqüència de ressonància inductància-capacitat) caracteritzada per l'expressió

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



Els **filtres passa-alts** més habituals estan formats per un conjunt RL paral·lel en sèrie amb un condensador. La impedància d'aquest filtre és petita al voltant de la freqüència característica, creix lleugerament per a freqüències superiors i fortament per a freqüències inferiors; la podem expressar amb

$$\underline{Z}(f) = \frac{1}{j2\pi fC} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j2\pi fL} \right)^{-1}$$

La freqüència característica es determina amb l'expressió

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Per tenir un filtre s'hauran de connectar un conjunt de branques sintonitzada cada una a una de les freqüències més importants que convé reduir i una branca passa alts (opcional) que redueixi els harmònics d'ordre superior.

Cal tenir en compte que a freqüències inferiors a la de sintonització d'una branca del filtre, aquesta és capacitiva cosa que fa aparèixer una freqüència de ressonància paral·lel amb la xarxa inferior a la de sintonització. D'aquesta manera per sota de cada una de les freqüències de sintonització d'un filtre (i per sobre de l'anterior, si n'hi ha) apareix sempre una ressonància paral·lel.

Si, a causa de la variació del valor d'un dels components, augmentés la freqüència de sintonització del filtre podria resultar la ressonància paral·lel a la freqüència d'un dels harmònics que es volen reduir, cosa que faria aparèixer importants sobretensions que podrien ser destructives.

Per aquest motiu solen sintonitzar-se els filtres entre un 3 i un 10% per sota de la freqüència de l'harmònic que es vol reduir.

Cal deixar clar que els filtres no eliminen els harmònics sinó que només els redueixen. Al calcular un filtre s'ha de tenir en compte el corrent que passarà per cadascuna de les branques (considerant els harmònics estimats) així com les tensions que poden aparèixer en borns de cada un dels elements de la branca. A la freqüència fonamental els filtres són capacitius de manera que, a més, serveixen per a la compensació de reactiva.

En cas que un conjunt s'empri per a compensar la reactiva i com a filtre, s'haurà de tenir la precaució de que sempre les branques es connectin en ordre creixent de freqüències de sintonització, deixant el filtre passa-alts (si n'hi ha) per a la darrera connexió. La desconexió es farà sempre en l'ordre contrari.

Problemes de selecció de cables

Problema SC1

Es tracta d'alimentar 9 motors trifàsics de 12 kV i una potència de 500 kW $\cos \varphi = 0.75$ (i). La instal.lació es farà amb un cable de coure tripolar que passarà per una safata contínua amb 5 cables més, separats, a una temperatura ambient de 30°C. Cerqueu el cable a emprar, pel criteri de densitat de corrent.

$$S_N = \frac{P_N}{\cos \varphi} = \frac{9 \cdot 500000}{0.75} = 6 \text{ MVA} \qquad I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} V_N} = \frac{6000000}{\sqrt{3} \cdot 12000} = 289 \text{ A}$$

Coeficients

Per temperatura: 30°C $\Rightarrow K = 1.12$

Per disposició: més de 3 cables sense tocar-se en una safata contínua $\Rightarrow k = 0.80$

$$I' = \frac{I}{\prod_i K_i} = \frac{289}{1.12 \cdot 0.8} = 322 \text{ A}$$

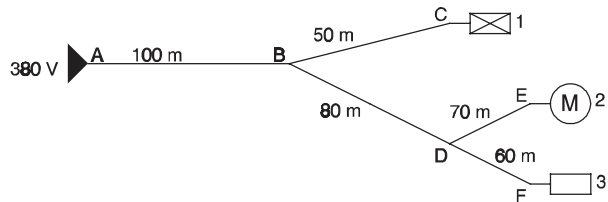
Tensió nominal

$$10 > 12 > 15 \Rightarrow \text{cable } 8.7/15 \text{ kV}$$

Triem cable 8.7/15 kV de secció 150 mm² ja que admet 350 A.

Problema SC2

En la instal·lació trifàsica de la figura



$$P_1 = 8 \text{ kW} \quad \cos \varphi_1 = 0.4$$

$$P_2 = 10 \text{ kW} \quad \cos \varphi_2 = 0.8$$

$$P_3 = 30 \text{ kW}$$

calceu les seccions dels cables sabent que van sota tub a 45°C i que les caigudes de tensió no poden superar

$$AB: 0.5\%$$

$$BC, BD: 3\%$$

$$DE, DF: 5\%$$

Coefficient de temperatura a 45°C $K_T = 0.93$

Coefficient cables sota tub $K_D = 0.80$

$$I_{DF} = \frac{30000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 45.58 \text{ A} \quad I_{DF} = 45.58 + j 0 \quad I'_{DF} = \frac{45.58}{0.8 \cdot 0.93} = 61.3 \text{ A}$$

$$I_{DE} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.8} = 19 \text{ A} \quad I_{DE} = 19(0.8 - j0.6) = 15.2 - j 11.4 \quad I'_{DE} = \frac{19}{0.8 \cdot 0.93} = 25.5 \text{ A}$$

$$I_{BD} = I_{DE} + I_{DF} = 60.78 - j 11.4 \quad I_{BD} = 61.84 \text{ A} \quad I'_{BD} = \frac{61.84}{0.8 \cdot 0.93} = 83.1 \text{ A}$$

$$I_{BC} = \frac{8000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.4} = 30.39 \text{ A} \quad I_{BC} = 30.39(0.4 - j0.92) = 12.16 - j 27.85 \quad I'_{BC} = \frac{30.39}{0.8 \cdot 0.93} = 40.8 \text{ A}$$

$$I_{AB} = I_{BD} + I_{BC} = 72.94 - j 39.25 \quad I_{AB} = 82.83 \text{ A} \quad I'_{AB} = \frac{82.83}{0.8 \cdot 0.93} = 111.3 \text{ A}$$

Atès que els cables van sota tub és recomanable triar-los unipolars. Fem una primera tria de seccions a partir dels corrents trobats i cerquem les seves resistències

$$s_{AB} = 70 \text{ mm}^2 \quad s_{BC} = 16 \text{ mm}^2 \quad s_{BD} = 35 \text{ mm}^2 \quad s_{DE} = 6 \text{ mm}^2 \quad s_{DF} = 25 \text{ mm}^2$$

$$R_{AB} = 0.270 \cdot 100 = 27.0 \text{ m}\Omega \quad R_{BC} = 1.18 \cdot 50 = 59.0 \text{ m}\Omega \quad R_{BD} = 0.539 \cdot 80 = 43.12 \text{ m}\Omega$$

$$R_{DE} = 3.15 \cdot 70 = 220.5 \text{ m}\Omega \quad R_{DF} = 0.755 \cdot 60 = 45.3 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{\Delta U} = \sqrt{3} I (R + j X) (\cos \varphi - j \sin \varphi) = \sqrt{3} R I (\cos \varphi - j \sin \varphi)$$

$$\Delta U \approx \sqrt{3} R I \cos \varphi = \sqrt{3} R \Re\{I\} \quad \Delta U\% \approx \frac{\sqrt{3} R \Re\{I\}}{U} 100$$

$$\Delta U_{AB} = \frac{\sqrt{3} 27.0 \cdot 10^{-3} 72.94}{380} 100 = 0.9\% > 0.5\%$$

$$\Delta U_{BC} = \frac{\sqrt{3} 59.0 \cdot 10^{-3} 12.16}{380} 100 = 0.33\% < 3\%$$

$$\Delta U_{BD} = \frac{\sqrt{3} 43.12 \cdot 10^{-3} 60.78}{380} 100 = 1.20\% < 3\%$$

$$\Delta U_{DE} = \frac{\sqrt{3} 220.5 \cdot 10^{-3} 15.2}{380} 100 = 1.53\% < 5\%$$

$$\Delta U_{DF} = \frac{\sqrt{3} 45.3 \cdot 10^{-3} 45.58}{380} 100 = 0.94\% < 5\%$$

Cal reduir la caiguda a A-B; cerquem la resistència que ha de tenir el cable.

$$\Delta U_{AB} = \frac{\sqrt{3} R_{AB} 72.94}{380} 100 < 0.5\% \quad R_{AB} < 15.03 \text{ m}\Omega$$

$$\frac{R_{AB}}{100 \text{ m}} < \frac{15.03}{100} \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} = 0.1503 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} = 0.1503 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

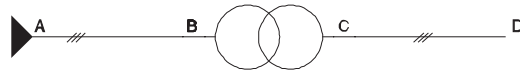
Caldrà un cable de $s_{AB} = 150 \text{ mm}^2$ ($0.126 \Omega/\text{km}$) en el qual

$$R_{AB} = 0.126 \cdot 100 = 12.6 \text{ m}\Omega$$

$$\Delta U_{AB} = \frac{\sqrt{3} 12.6 \cdot 10^{-3} 72.94}{380} 100 = 0.42 < 0.5\%$$

Problema SC3

En el circuit trifàsic de la figura, calculeu els corrents i les potències de curt circuit en A, B, C i D.



Punt A	Tram AB	Transformador	Tram CD
$S_{cc} = 500 \text{ MVA}$	Cable a l'aire 15/25 kV	25/0.38 kV 8 MVA	Cable BT a l'aire
$\cos \varphi_{cc} = 0.2$	$3 \times 120 \text{ mm}^2$	$\varepsilon_{cc} = 4\%$	$3 \times (1 \times 300 \text{ mm}^2)$
$V = 25 \text{ kV}$	$l = 2 \text{ km}$	$\cos \varphi_{cc} = 0.35$	$l = 500 \text{ m}$

$$\text{AB: } R_{AB} = 0.195 \cdot 2 = 0.39 \Omega \quad X_{AB} = 0.121 \cdot 2 = 0.242 \Omega$$

$$\text{BC: } R_{BC}'' = \frac{4}{100} \frac{380^2}{8 \cdot 10^6} \cdot 0.35 = 0.25 \text{ m}\Omega \quad X_{BC}'' = R_{BC}'' \frac{\sqrt{1-0.35^2}}{0.35} = 0.68 \text{ m}\Omega$$

$$r_t = \frac{25000}{380} = 65.79$$

$$\text{CD: } R_{CD} = 0.0629 \cdot 0.5 = 31.45 \text{ m}\Omega$$

La potència de curt circuit en el punt A ens permet determinar l'esquema equivalent del tram anterior a A.

$$I_{ccA} = \frac{500 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 25 \cdot 10^3} = 11.55 \text{ kA}$$

$$R_{\infty A} = \frac{25 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 11.55 \cdot 10^3} \cdot 0.2 = 0.25 \Omega$$

$$X_{\infty A} = R_{\infty A} \frac{\sqrt{1-0.2^2}}{0.2} = 1.23 \Omega$$

$$I_{ccB} = \frac{\frac{V'}{\sqrt{3}}}{|R_{AB} + j X_{AB} + R_{\infty A} + j X_{\infty A}|} = \frac{\frac{25 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}}{\sqrt{(0.39 + 0.25)^2 + (0.242 + 1.2)^2}} = 9.15 \text{ kA}$$

$$S_{ccB} = \sqrt{3} 25000 9.15 10^3 = 396.2 MVA$$

$$R_{AB}'' = \frac{0.39}{r_t^2} = 91.03 \mu\Omega \qquad X_{AB}'' = \frac{0.242}{r_t^2} = 55.91 \mu\Omega$$

$$R_{\infty A}'' = \frac{0.25}{r_t^2} = 57.76 \mu\Omega \qquad X_{\infty A}'' = \frac{1.23}{r_t^2} = 282.97 \mu\Omega$$

$$I_{ccC} = \frac{\frac{V''}{\sqrt{3}}}{\left| R_{\infty A}'' + j X_{\infty A}'' + R_{AB}'' + j X_{AB}'' + R_{BC}'' + j X_{BC}'' \right|}$$

$$I_{ccC} = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{\sqrt{(91.03 + 57.76 + 250)^2 + (55.91 + 282.97 + 680)^2} 10^{-6}} = 200.5 kA$$

$$S_{ccC} = \sqrt{3} 380 200.5 10^3 = 132 MVA$$

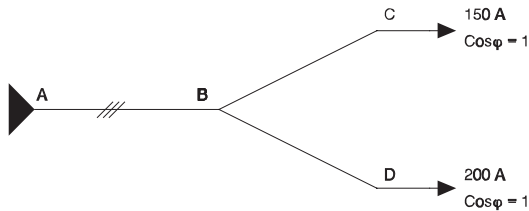
$$I_{ccD} = \frac{\frac{V''}{\sqrt{3}}}{\left| R_{\infty A}'' + j X_{\infty A}'' + R_{AB}'' + j X_{AB}'' + R_{BC}'' + j X_{BC}'' + R_{CD} \right|}$$

$$I_{ccD} = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{\sqrt{(91.03 + 57.76 + 250 + 31450)^2 + (55.91 + 282.97 + 680)^2} 10^{-6}} = 6.89 kA$$

$$S_{ccD} = \sqrt{3} 380 6.89 10^3 = 4.53 MVA$$

Problema SC4

Calculeu les seccions per al circuit de la figura.



$$I_{AB} = 1000 \text{ m} \quad I_{BC} = 500 \text{ m}$$

$$I_{BD} = 3000 \text{ m}$$

$$\Delta U < 1.5\% \text{ en BC i BD}$$

$$\Delta U < 0.5\% \text{ en AB}$$

$$\text{Temps desconexió} = 0.5 \text{ s}$$

Sabent que en A

$$U_N = 25 \text{ kV}$$

$$S_{cc} = 100 \text{ MVA}$$

$$\text{Cos } \varphi_{cc} = 0.2$$

i que els cables van enterrats a 1.2 m de fondària a $T = 40^\circ\text{C}$

Preparem una taula de la qual podem omplir les dues primeres columnes i la resta l'anirem omplint a mida que avancin els càlculs.

Emprarem tres cables de coure unipolars aïllats 15/25 kV.

$$K_d = 0.99 \quad K_t = 0.85 \quad I' = \frac{I}{0.99 \cdot 0.85} = \frac{I}{0.842}$$

	d(m)	I (A)	I' (A)	s (mm ²)	R (mΩ)	X (mΩ)	I _{cc} (kA)	s (mm ²)	ΔU%
L ₁	1000	350	416	185	125	122	2.25	11.8	0.3
L ₂	500	150	178	50	231	75.5	2.21	11.6	0.24
L ₃	3000	200	238	70	990	429	2.03	10.63	1.37
L ₀		350			1250	6124	2.31		

L₀ és la línia equivalent al tram anterior a A.

$$I_{cca} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 25 \cdot 10^3} = 2.31 \text{ kA}$$

$$R_0 + j X_0 = \frac{25 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2.31 \cdot 10^3} (0.2 + j \sqrt{1 - 0.2^2}) = 1.25 + j 6.124 \Omega$$

$$\Delta U_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot 350 \cdot 125 \cdot 10^{-3}}{25000} \cdot 100 = 0.3\% < 0.5\%$$

$$\Delta U_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot 150 \cdot 231 \cdot 10^{-3}}{25000} \cdot 100 = 0.24\% < 1.5\%$$

$$\Delta U_3 = \frac{\sqrt{3} \cdot 200 \cdot 990 \cdot 10^{-3}}{25000} \cdot 100 = 1.37\% < 1.5\%$$

$$I_{ccB} = \frac{\frac{25000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{(1250 + 125)^2 + (6124 + 122)^2} \cdot 10^{-3}} = 2.25 \text{ kA}$$

$$I_{ccC} = \frac{\frac{25000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{(1250 + 125 + 231)^2 + (6124 + 122 + 75.5)^2} \cdot 10^{-3}} = 2.21 \text{ kA}$$

$$I_{ccD} = \frac{\frac{25000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{(1250 + 125 + 990)^2 + (6124 + 122 + 429)^2} \cdot 10^{-3}} = 2.03 \text{ kA}$$

$$s(I_{cc})_1 \geq 2.25 \cdot \frac{\sqrt{0.5}}{135} \cdot 10^3 = 11.8 \text{ mm}^2$$

$$s(I_{cc})_2 \geq 2.21 \cdot \frac{\sqrt{0.5}}{135} \cdot 10^3 = 11.6 \text{ mm}^2$$

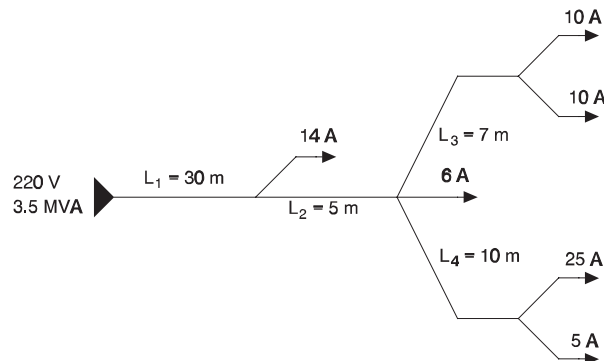
$$s(I_{cc})_3 \geq 2.03 \cdot \frac{\sqrt{0.5}}{135} \cdot 10^3 = 10.63 \text{ mm}^2$$

Les seccions previstes pel criteri de màxim corrent compleixen les especificacions de corrent de curt circuit i caiguda de tensió. Per tant les seccions seran

$$S_1 = 185 \text{ mm}^2 \quad S_2 = 50 \text{ mm}^2 \quad S_3 = 70 \text{ mm}^2$$

Problema SC5

Calculeu les seccions i els corrents de curt circuit sabent que en cada tram $\Delta U \leq 1\%$ i que cal realitzar la instal·lació amb cables unipolars sota tub a 35°C . El circuit és en corrent continu.



Coefficient de temperatura a 35°C $K_T = 1.06$

Coefficient de disposició sota tub $K_D = 0.8$

Preparem una taula de la qual en podem omplir les dues primeres columnes i les altres les anirem omplint a mida que avancin els càlculs.

	I(A)	l(m)	I'(A)	s(mm ²)	R(mΩ)	ΔU%
L ₁	70	30	82.5	25	22.65	1.44
L ₂	56	5	66	16	5.90	0.30
L ₃	20	7	23.6	4	33.04	0.60
L ₄	30	10	35.4	10	18.90	0.52
L ₀					6.91	

$$I_{cc} = \frac{3.5 \cdot 10^6}{220} = 15.9 \text{ kA}$$

$$R_0 = \frac{220}{2 \cdot 15.9 \cdot 10^3} = 6.91 \text{ m}\Omega$$

$$\Delta U\% = \frac{2 \cdot I \cdot R}{U} \cdot 100$$

Hem de refer L₁ ja que $\Delta U > 1\%$

$$\Delta U_1\% = \frac{2 \cdot 70 \cdot R_1}{220} \cdot 100 < 1\%$$

$$R_1 < 15.7 \text{ m}\Omega$$

$$\frac{R_1}{30 \text{ m}} < 0.52 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}} = 0.52 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$s_1 = 50 \text{ mm}^2$$

$$R_1 = 0.378 \cdot 30 = 11.34 \text{ m}\Omega$$

$$\Delta U_1 = 0.72\%$$

$$I_{cc1} = \frac{220}{2 (6.91 + 11.34) 10^{-3}} = 6.03 \text{ kA}$$

$$I_{cc2} = \frac{220}{2 (6.91 + 11.34 + 5.90) 10^{-3}} = 4.56 \text{ kA}$$

$$I_{cc3} = \frac{220}{2 (6.91 + 11.34 + 5.90 + 33.04) 10^{-3}} = 1.92 \text{ kA}$$

$$I_{cc4} = \frac{220}{2 (6.91 + 11.34 + 5.90 + 18.90) 10^{-3}} = 2.56 \text{ kA}$$

Problema SC6

Un consum trifàsic a 380 V, de P = 11.2 kW amb Cos φ = 1 està alimentat amb cable a l'aire. Amb les condicions d'instal.lació del cable el fabricant ens dona les següents taules:

Secció (mm ²)	Intensitat màxima (A)	R (65°C) (Ω/km)
1	9.5	20.5
1.5	12	14
2.5	17	8.2
4	24	5.1
6	29	3.6
10	40	2.1

Temperatura aire (°C)	Factor de reducció
25	1.3
30	1.22
35	1.13
40	1
45	0.87
50	0.71

- a) Indiqueu quina ha d'ésser la secció del cable si la temperatura de l'aire és de 50°C.
- b) Sabent que la longitud del cable és de 50 m, i suposant que el conductor arriba a una temperatura de 65°C, si es desitja que la caiguda de tensió sigui inferior a l'1%, quina és la secció necessària?

a)

$$I_N = \frac{11200}{\sqrt{3} \cdot 380} = 17A \quad K_T = 0.71 \quad I_{elec} = \frac{17}{0.71} = 23.97A$$

$$s = 4 \text{ mm}^2$$

b)

$$\Delta U_{composta \text{ m}\acute{a}xima} = \frac{1}{100} \cdot 380 = 3.8 V \quad \Delta U_{simple \text{ m}\acute{a}xima} = \frac{3.8}{\sqrt{3}} = 2.194 V$$

$$\Delta U_{simple} = I R = 17 R \quad 2.194 > 17 R \quad R < 0.129$$

$$\frac{R}{50 \cdot 10^{-3} \text{ km}} < 2.58 \Omega/\text{km} \quad s = 10 \text{ mm}^2$$

Problema SC7

En el magatzem tenim cables unipolars de les següents característiques per al tipus d'instal·lació que es vol fer

Secció mm ²	I _{màx} (A)	R(50°C) Ω/km
2.5	11.8	7
4	19	4.4
6	28	3
10	46	1.6
16	73	1.1
25	92	0.7

Coefficient de reducció en funció de la temperatura ambient

- 10°C	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C
0.8	0.91	0.95	0.98	1	1.1

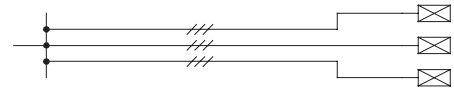
Coeficient de reducció en funció del número de circuits trifàsics en paral·lel

1	2	3	4
1	0.95	0.9	0.85

a) Es volen alimentar 3 càrregues trifàsiques idèntiques de valors nominals

$$P = 16 \text{ kW} \quad \text{Cos } \varphi = 0.8$$

$$U = 380 \text{ V}$$



cadascuna d'elles amb una terna de cables independent. Sabent que només hi hauran aquests 3 circuits i que la temperatura ambient estimada és de 20°C, escolliu la secció nominal corresponent.

b) Quina secció caldria instal·lar en el cas anterior si no es vol que en cap cas la caiguda de tensió sigui superior al 4%, s'estima la temperatura de funcionament del cable en 50°C i les longituds de cada tram són

$$l_1 = l_2 = l_3 = 500 \text{ m}$$

a)

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \text{Cos } \varphi} = 30.4 \text{ A}$$

Coeficient per temperatura $K_{20} = 0.98$

Coeficient per nombre de circuits $K_3 = 0.9$

$$I' = \frac{I}{K_{20} K_3} = 34.5 \text{ A}$$

Secció escollida $s = 10 \text{ mm}^2$

b)

$$\Delta U = \sqrt{3} R I \text{Cos } \varphi \quad R \leq \frac{\frac{4}{100} 380}{\sqrt{3} 30.4 0.8} = 0.361 \Omega \quad \frac{R}{l} \leq \frac{0.361 \Omega}{0.5 \text{ km}} = 0.722 \Omega/\text{km}$$

Per tant, $s = 25 \text{ mm}^2$

Problema SC8

Una càrrega trifàsica consumeix 51.1 kVA amb un factor de potència de 0.82 inductiu quan s'alimenta amb un sistema 3 x 380 V 50 Hz. Aquesta càrrega s'alimenta mitjançant una terna de cables unipolars posats en una safata en la qual hi ha un circuit trifàsic més idèntic al de la càrrega.

Es suposa que la temperatura serà de 40°C i que la temperatura de l'interior dels cables arribarà a 50°C.

La longitud del cable és de 200 m. Es suposa que la tensió a l'origen de la línia serà tal que al final es mantindrà constant a 380 V.

Secció mm ²	I _{màx} (A)	R(50°C) Ω/km
2.5	11.8	7
4	19	4.4
6	28	3
10	46	1.6
16	73	1.1
25	92	0.7
35	123	0.52

Coefficient de reducció en funció de la temperatura ambient

- 10°C	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C
1.3	1.2	1.1	1.05	1	0.9

Coefficient de reducció en funció del número de circuits trifàsics en paral·lel

1	2	3	4
1	0.95	0.9	0.85

Es demana:

- De les seccions disponibles (veure taula), quina és l'adient sota el criteri de règim tèrmic permanent (o de màxima densitat de corrent)
- Si es desitja que la caiguda de tensió no superi el 3.5%, quina secció cal posar?
- Quina potència és la màxima que es pot alimentar a $\cos \varphi = 0.82$ amb una terna de cables unipolars de 35 mm² amb les mateixes condicions que en els apartats anteriors.

a)

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} U} = \frac{51100}{\sqrt{3} 380} = 77.64 \text{ A}$$

Coefficient de temperatura $K_T = 0.9$

Coefficient de número de circuits $1 + 1 = 2$ circuits $K_N = 0.95$

$$I_{\text{elecció}} = \frac{I_N}{K_T K_N} = \frac{77.64}{0.9 \cdot 0.95} = 90.8 \text{ A}$$

triem $s = 25 \text{ mm}^2$

b)

Anomenem R_m la màxima resistència que pot tenir el cable per mantenir la caiguda de tensió demanada; com $U_F = 380 \text{ V}$

$$0.035 = \frac{U_I - U_F}{U_I}$$

$$0.965 U_I = U_F$$

$$U_I = \frac{380}{0.965} = 393.8 \text{ V}$$

$$U_I - U_F = 13.8 \text{ V} = \sqrt{3} I R_m \cos \varphi$$

$$R_m = \frac{13.8}{\sqrt{3} 77.64 \cdot 0.82} = 0.125 \text{ } \Omega$$

Resistència màxima per kilòmetre

$$\frac{R_m}{l(\text{km})} = \frac{0.125}{0.2} = 0.625 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$s = 35 \text{ mm}^2$ ja que $0.52 < 0.625 \text{ } \Omega/\text{km}$ i $0.7 > 0.625 \text{ } \Omega/\text{km}$

c)

Corrent màxim admès, pel criteri de densitat de corrent

$$123 \text{ A} = \frac{I_N}{K_T K_N} = \frac{I_N}{0.9 \cdot 0.95} \Rightarrow I_N = 105.17 \text{ A}$$

$$S_N = \sqrt{3} U_N I_N = \sqrt{3} 380 105.17 = 69.2 \text{ kVA}$$

Pel criteri de la caiguda de tensió màxima, sabem que

$$\Delta U_{\max} = \sqrt{3} I R \cos \varphi \qquad R = 0.52 \text{ } \Omega/\text{km} \cdot 0.2\text{km} = 0.104 \text{ } \Omega$$

$$I = \frac{13.8}{\sqrt{3} 0.104 0.82} = 93.43 \text{ A}$$

$$S_N = \sqrt{3} U_N I_N = \sqrt{3} 380 93.43 = 61.49 \text{ kVA}$$

El factor més limitant és la caiguda de tensió, per tant amb $\cos \varphi = 0.82$ el màxim que es pot alimentar són 61.49 kVA

$$P = 61.49 0.82 = 50.42 \text{ kW}$$

Problemes de compensació de reactiva

Problema ER1

Una instal·lació trifàsica està formada per 2100 fluorescents 220 V 50 Hz 40 W
Cos $\varphi = 0.41$ connectats en estrella.

Calculeu:

- El preu de 8 h de funcionament (sabent que 1 kWh val 13 ptes.) i el corrent absorbit.
- El preu de 8 h de funcionament si fos Cos $\varphi = 1$ i el corrent absorbit.
- El condensador que cal posar en paral·lel amb cada tub per tal de millorar al màxim el Cos φ sabent que només hi ha condensadors d'un nombre enter de μF .
- Amb tots els tubs compensats com en l'apartat c) calculeu el nou preu i el nou corrent.

a)

$$P = 2100 \cdot 40 = 84 \text{ kW}$$

$$r(\%) = \frac{17}{\text{Cos}^2 \varphi} - 21$$

$$\text{Preu} = 84 \text{ kW} \cdot 8 \text{ h} \cdot 13 \frac{\text{ptes.}}{\text{kWh}} \left(1 + \frac{\frac{17}{0.41^2} - 21}{100} \right) = 15736 \text{ ptes.}$$

$$I = \frac{84000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.41} = 311.28 \text{ A}$$

b)

$$\text{Preu} = 84 \text{ kW } 8 \text{ h } 13 \frac{\text{ptes.}}{\text{kWh}} \left(1 + \frac{\frac{17}{1^2} - 21}{100} \right) = 8387 \text{ ptes.}$$

$$I = \frac{84000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 127.63 \text{ A}$$

c)

$$P = 40 \text{ W} \quad S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{40}{0.41} = 97.56 \text{ VA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 88.98 \text{ VAR} \quad Q_C = Q = 88.98 = \frac{220^2}{X_C}$$

$$X_C = 543.9 \Omega \quad C = \frac{1}{\omega X_C} = 5.85 \mu\text{F}$$

Podem triar entre $C = 6 \mu\text{F}$ i $C = 5 \mu\text{F}$. Si agafem el de $6 \mu\text{F}$, atès que és més gran que el necessari, resultarà un circuit capacitiu; la qual cosa no interessa. Agafem doncs $C = 5 \mu\text{F}$

$$X_C = \frac{1}{2 \pi \cdot 50 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 636.62 \Omega \quad Q_C = \frac{220^2}{636.62} = 76.03 \text{ VAR}$$

$$Q = 88.98 - 76.03 = 12.96 \text{ VAR}$$

$$\underline{S} = 40 + j 12.96 \text{ VA} \quad \cos \varphi = 0.951 \text{ (i)}$$

d)

$$\text{Preu} = 84 \text{ kW } 8 \text{ h } 13 \frac{\text{ptes.}}{\text{kWh}} \left(1 + \frac{\frac{17}{0.951^2} - 21}{100} \right) = 8542 \text{ ptes.}$$

$$I = \frac{84000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.951} = 134.2 \text{ A}$$

Problema ER2

En un edifici hi ha una fluctuació de promig de consum de potència reactiva de:

8-10h	34 kVAr
10-13h	28 kVAr
13-15h	12 kVAr
15-17h	31 kVAr
17-21h	22 kVAr
21-8h	7 kVAr

Decidiu la bateria automàtica a instal·lar sabent que cada graó pot ésser de 5, 10 o 20 kVAr i que el regulador pot controlar fins a 6 nivells.

Fem una taula on per cada potència veiem les combinacions possibles de graons. En les combinacions a, b i c tots els graons seran iguals de valors 5, 10 i 20 kVAr respectivament. En la combinació d disposarem d'un graó de 5 kVAr i la resta de 10 kVAr mentre que en la e serà un de 10 kVAr i la resta de 20 kVAr. En aquests dos darrers casos ens referirem com a mig graó a aquest graó més petit.

Els nombres entre parentesi indiquen el grau d'aproximació.

	a	b	c	d	e
	n 5	n 10	n 20	5 + n 10	10 + n 20
34	6 (88%)	3 (88%)	1 (59%)	3 (88%)	1.5 (88%)
31	6 (97%)	3 (97%)	1 (65%)	3 (97%)	1.5 (97%)
28	5 (89%)	2 (71%)	1 (71%)	2.5 (89%)	1 (71%)
22	4 (91%)	2 (91%)	1 (91%)	2 (91%)	1 (91%)
12	2 (83%)	1 (83%)	0 (0%)	1 (83%)	0.5 (83%)
7	1 (71%)	0 (0%)	0 (0%)	0.5 (71%)	0 (0%)

Així en la tercera filera de la columna d, 2.5 vol dir dos graons de 10 kVAr i un de 5 kVAr.

Podem observar que a i d donen lloc al mateix grau d'aproximació; el mateix passa amb b i e. La millor aproximació es troba en els casos a i d.

En general, pel mateix grau d'aproximació, les bateries 1:2:2 requereixen menys graons que les 1:1:1; cosa que també s'ha posat de manifest en aquest cas.

Atès que una bateria 1:2:2 serà més econòmica, triarem cas d; és a dir 3·10+5 (tres graons de 10 kVAr i un de 5 kVAr).

Problema ER3

L'enllumenat d'un túnel està format per 180 làmpades 220 V 65 W $\text{Cos } \varphi = 0.4$ (i) distribuïdes simètricament en estrella.

Si el conjunt s'alimenta amb un sistema trifàsic de 381 V calculeu la potència reactiva que ha de subministrar una bateria de condensadors connectada en triangle per tal que el factor de potència de la instal·lació sigui 0.98 (i).

$$P = 180 \cdot 65 = 11700 \text{ W}$$

$$S = \frac{P}{\text{Cos } \varphi} = \frac{11700}{0.4} = 29250 \text{ VA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 26808 \text{ VAR}$$

$$P' = 11700 \text{ W}$$

$$S' = \frac{P'}{\text{Cos } \varphi'} = \frac{11700}{0.98} = 11939 \text{ VA}$$

$$Q' = \sqrt{S'^2 - P'^2} = 2375 \text{ VAR}$$

$$Q_C = Q - Q' = 24432 \text{ VAR}$$

Problemes de proteccions

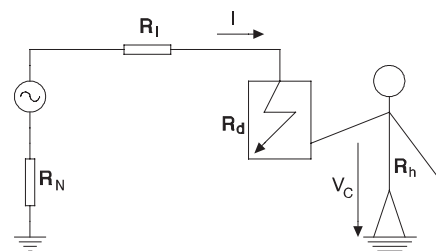
Problema PT1

En una instal.lació de 380 V el neutre està posat a terra amb una impedància de terra de $R_N = 6 \Omega$. Es produeix un defecte en un aparell (defecte fase-carcassa). La resistència de la línia és $R_l = 0.8 \Omega$ i la del defecte de $R_d = 0.2 \Omega$. Si la resistència del cos humà és $R_h = 2500 \Omega$. Calculeu

- Corrent que passa per una persona que toqui la carcassa i tensió de contacte.
- Corrent que circularia si la carcassa estés posada a terra amb una resistència de terra de $R_t = 3.5 \Omega$ i tensió de la carcassa respecte a terra.
- Corrent que passaria per una persona que toqués la carcassa quan està posada a terra en les condicions de l'apartat b) i la tensió de contacte que apareixeria.

a)

$$I = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{R_N + R_l + R_d + R_h}$$
$$I = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{6 + 0.8 + 0.2 + 2500} = 87.5 \text{ mA}$$

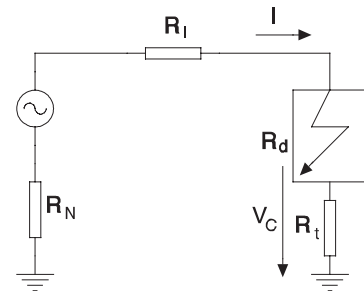


$$V_C = I R_h = 87.5 \cdot 10^{-3} \cdot 2500 = 218.8 \text{ V}$$

b)

$$I = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{R_N + R_l + R_d + R_t} = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{6 + 0.8 + 0.2 + 3.5} = 20.9 \text{ A}$$

$$V_C = 20.9 \cdot 3.5 = 73.1 \text{ V}$$

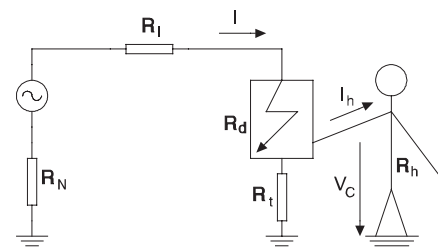


c)

$$R = R_h // R_t = \frac{2500 \cdot 3.5}{2500 + 3.5} = 3.495 \Omega$$

$$I = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{R_N + R_l + R_d + R} = 20.9 \text{ A}$$

$$V_C = I \cdot R = 20.9 \cdot 3.495 = 73.1 \text{ V}$$



$$I_h = \frac{V_t}{R_h} = \frac{73.1}{2500} = 29 \text{ mA}$$

Problema PT2

Un motor trifàsic compensat de 380 V 50 kW $\cos \varphi = 1$ es connecta a una instal·lació. En el punt de connexió la potència de curt circuit és de 20 MVA. Si el motor consumeix en arrencar entre 6 i 8 cops el corrent nominal i el temps màxim d'arrencada és d'un segon; trieu un fusible i calculeu el màxim corrent en cas de curt circuit.

$$I_n = \frac{50000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 76 \text{ A}$$

$$I_{a \text{ màx}} = 76 \cdot 8 = 608 \text{ A}$$

$$I_{cc} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 380} = 30.39 \text{ kA}$$

Descartem tots els fusibles amb poder de tall inferior a 30.39 kA. Agafem fusible de 80 A i mirem, a la corba de fusió, el temps que triga amb 608 A.

Els gl no serveixen atès que amb 608 A fonen en menys d'un segon. Els aM de 80 A si serveixen ja que triguen més d'un segon a fondre. Agafem un cilíndric aM de talla 2 i 80 A que té un poder de tall de 100 kA.

El corrent màxim ve donat per la corba de limitació i serà d'uns 12 kA de cresta. Si no hi hagués fusible hauria estat de 90 kA.

Problema PT3

Una màquina trifàsica (compensada) de 10 kW 380 V té un pic de connexió de 13 I_n que dura 0.3 s. Si la potència de curt circuit en el punt de connexió és de 15 MVA, determineu el fusible necessari i el màxim corrent de curt circuit.

$$I_N = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 15.2A \qquad I_{cc} = \frac{15 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 380} = 22.8kA \qquad I_0 = 13 \cdot 15.2 = 197.5A$$

Correspondria un fusible de 16 A. Cap dels fusibles de 16 A aguanta 197.5 A durant 0.3 s.

Caldrà augmentar el calibre a un aM cilíndric de calibre 20, però serà necessari augmentar la secció dels cables ja que les sobrecàrregues petites no són protegides pel fusible. El temps de fusió a 197.5 A serà de 0.41 s.

El corrent de curt circuit serà de 3.2 kA (en lloc de 53 kA sense fusible).

Problema PT4

Un motor trifàsic de 1300 kW 6 kV $\cos \varphi = 0.8$ consumeix en arrencar un corrent de 13 I_n . Trobeu el fusible apropiat sabent que arrenca en 1.5 s i que la potència de curt circuit és 200 MVA. Trobeu el màxim corrent de cresta i el temps de fusió en cas d'un curt circuit de 9 kA.

$$I_n = \frac{1300 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0.8} = 156.4A \qquad I_{cc} = \frac{200 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 19.3kA \qquad I_a = 13 \cdot 156.4 = 2033A$$

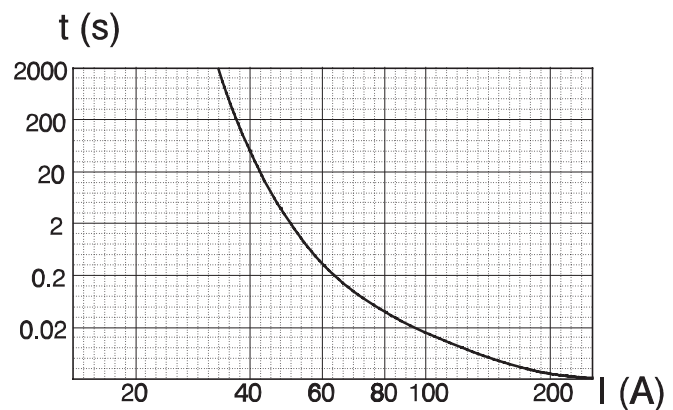
Un fusible de 160 A fon en 0.75 s amb 2033 A; cal un fusible més gran. L'adequat és de 200 A que a 2033 A fon en 2.9 s. Caldrà tenir en compte que el fusible és de 200 A i no de 160 A al dimensionar els cables.

El màxim corrent de cresta per a 19.3 kA serà d'uns 20 kA.

En cas d'un curt circuit de 9 kA la fusió serà en uns 4 ms i la seva cresta serà de 17 kA.

Problema PT5

Un motor té un corrent nominal de 10 A. Durant l'arrencada el motor consumeix 8 cops el corrent nominal i l'arrencada dura 0.5 s. Si la corba de fusió del fusible que el protegeix és la de la figura, està connectat adequadament el fusible. Per què?



No va bé perquè a 80 A el temps de fusió és menor que 0.1 s i arrenquem amb 0.5 s.

Problema PT6

En un taller cal instal.lar un magnetotèrmic per tal de protegir el primari d'un transformador 380/220 V. El transformador és trifàsic de 20 kVA i té un pic de connexió de $6 I_n$. Sabent que la potència de curt circuit en el punt de connexió és de 2.5 MVA, trobeu l'interruptor apropiat.

$$I_{1n} = \frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 30.4 \text{ A}$$

Convé un magnetotèrmic de calibre 32 A

$$I_{cc} = \frac{2.5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 380} = 3.8 \text{ kA}$$

Cal un poder de tall superior a 3.8 kA, per exemple 6 kA.

$$I_0 = 6 I_n = 182.3 \text{ A}$$

Aquest valor ha de caure a la part tèrmica de la corba (si cau a la magnètica la desconexió serà instantània).

$$\frac{I_0}{32 \text{ A}} = 5.7$$

No pot ser de corba L ja que en connectar saltarà. Amb corba U el disparament és molt probable.

Triem un de corba D de 32 A que amb 182.3 A triga entre 0.6 s i 3.2 s en desconectar.

Problema PT7

El transformador d'una nau industrial és trifàsic de 380/220 V 20 kVA. La càrrega més important que alimenta és un motor trifàsic de 220V 8 kW $\cos \varphi = 0.86$. Sabem que el pic de connexió del transformador és de $9 I_n$ i el del motor de $6 I_n$ durant 2 seg. Sabent que la potència de curt circuit en el punt de connexió és de 2.1 MVA, calculeu el magnetotèrmic de protecció que cal situar al primari del transformador.

$$I_{mn} = \frac{8000}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0.86} = 24.4 \text{ A} \qquad I_{t1n} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 30.4 \text{ A}$$

$$I_{m0} = 6 \cdot 24.4 = 146.5 \text{ A (2 seg)} \qquad I_{t10} = 9 \cdot 30.4 = 273.5 \text{ A}$$

$$I_{cc} = \frac{2.1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 380} = 3.2 \text{ kA} \qquad r_t = \frac{380}{220} = 1.73$$

$$I'_{mn} = \frac{24.4}{r_t} = 14.1A \quad I'_{m0} = \frac{146.5}{r_t} = 84.8A \text{ (2 seg)}$$

A la vista del corrent nominal del transformador, ens decidim per un magnetotèrmic de calibre 32 A

$$\frac{I_{t10}}{32} = \frac{273.5}{32} = 8.5 \quad \frac{I'_{m0}}{32} = \frac{84.8}{32} = 2.7 \text{ (2 seg)}$$

Pel corrent de curt circuit hem d'agafar interruptors amb poder de tall superior a 3.2 kA . Ens decidim pels inferiors, és a dir de 6 kA.

A causa del pic de connexió del transformador només podem agafar un de corba D ja que els altres, amb 273.5 A , desconnectarien instantàniament.

Cal comprovar l'arrencada del motor, a 84.8 A el temps de dispar està entre 4.5 i 35 s per tant funciona correctament.

Problema PT8

En un laboratori hi ha un transformador 381/127 V monofàsic de 10 kVA amb un pic de connexió de 10 I_n en 0.2 s. El transformador alimenta una màquina de 7800 W $\cos \varphi = 0.8$. Sabem que el corrent de curt circuit al primari és de 7 kA i al secundari de 4 kA. Si el motor consumeix en arrencar 7 I_n durant 1 s, trieu els interruptors de protecció de primari i secundari tenint en compte que la connexió és simultània (al connectar el transformador queda connectat el motor).

$$r_t = \frac{381}{127} = 3 \quad I_{1n} = \frac{10000}{381} = 26.3A \quad I_{2n} = \frac{10000}{127} = 78.7A$$

$$I_{t0} = 10 \cdot 26.3 = 263A \quad I_{1cc} = 7000A \quad I_{2cc} = 4000A$$

$$I_m = \frac{7800}{0.8 \cdot 127} = 76.8A \quad I'_m = \frac{76.8}{r_t} = 25.6A$$

$$I_{m0} = 76.8 \cdot 7 = 538A \quad I'_{m0c} = \frac{538}{r_t} = 179A$$

$$I'_{tot0} = 179 + 263 = 443A$$

En el secundari cal un interruptor de calibre 80 A amb poder de tall superior a 4 kA i no ha de disparar amb 538 A en 1 s

$$\frac{538}{80} = 6.73$$

No n'hi ha cap de 80 A que serveixi. Triem un de 100 A ($5.38 I_N$) i 10 kA corba D (atès que no hi ha aparells d'aquest calibre amb poder de tall inferior) que amb 537 A triga entre 0.75 i 10 s en disparar.

En el primari cal un interruptor de calibre 32 A i poder de tall superior a 7 kA que no ha de disparar amb 443 A en 0.2 s ni amb 179 A en 1 s.

$$\frac{443}{32} = 13.8 \quad \frac{179}{32} = 5.6$$

En primari no aguanta cap de 32 A ja que amb 443 A desconnecten en un temps molt inferior a 0.2 s. Provem un de 8 kA (corbes L i U) de 40 A ($11 I_n$ en 0.2 s i $4.5 I_n$ en 1 s) però succeeix el mateix. També succeeix el mateix si ho provem amb un de 10 kA corba D.

Provem un de 10 kA corba D de 50 A ($8.9 I_n$ en 0.2 s i $3.6 I_n$ en 0.5 s); amb 443 A ($8.9 I_n$) dispara entre 0.4 i 3.8 s i amb 179 A ($3.6 I_n$) dispara entre 3 i 30 s; per tant aguanta. Caldrà instal·lar cables per 50 A ja que si s'instal·len per 32 A no estaran protegits contra sobrecàrregues.

Problema PT9

Un transformador trifàsic s'alimenta mitjançant una font de tensió fixa (independent del corrent consumit), a la sortida del transformador (costat baixa) es situa un armari d'interruptors automàtics.

Sabent que les característiques del transformador són

$$S_N = 250kVA \quad U_N = 6000/380V \quad \epsilon_{cc} = 5\%$$

i que els poders de tall disponibles són

3 kA 4.5 kA 6 kA 8 kA 10 kA

Seleccioneu quin serà el poder de tall necessari per als interruptors anteriorment esmentats.

$$I_N = \frac{250000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 379.8 \text{ A} \quad I_{cc} = \frac{I_N}{\epsilon_{cc}(\text{pu})} = \frac{379.8}{0.05} = 7597 \text{ A}$$

Poder de tall necessari 8 kA

Problema PT10

Un motor trifàsic s'alimenta a 380 V consumint un corrent de 14.8 A. La línia que alimenta aquest motor, té instal·lat, per protegir-la, un interruptor magnetotèrmic de 6 kA corba U de calibre 15 A. Si el motor pateix una sobrecàrrega que fa que el corrent sigui 1.5 cops superior, dispararà el magnetotèrmic?. Si ho fa, en quant temps?

Corrent en cas de sobrecàrrega $14.8 \cdot 1.5 = 22.2 \text{ A}$

Relació al corrent nominal del magnetotèrmic $\frac{22.2}{15} = 1.48$

Cercant en la gràfica aquest valor trobem que el temps de dispar del magnetotèrmic és aproximadament entre 50 i 1000 s.

Problema PT11

Un motor trifàsic té com a corrent nominal 32 A, està protegit per un interruptor automàtic magnetotèrmic de 8 kA de poder de tall i corba U de 32 A. Sabent que en una arrencada directa consumeix 8 vegades el corrent nominal, és correcta la selecció de l'interruptor?. I si el motor s'arrenqués per un mètode estrella-triangle si en aquest cas el transitori d'arrencada no dura més de 2 segons.

Corrent nominal motor $I_M = 32 \text{ A}$
 Corrent nominal magnetotèrmic $I_N = 32 \text{ A}$
 Corrents d'arrencada:

$$I_D = 8 I_M = 256 \text{ A}$$

$$I_Y = \frac{I_D}{3} = 85.3 \text{ A}$$

Els corrents relatius són

$$i_D = \frac{I_D}{I_N} = 8$$

$$i_Y = \frac{I_Y}{I_N} = 2.7$$

En triangle està en la zona de desconnexió instantània, per tant no està ben seleccionat. En estrella el temps de desconnexió per aquest corrent està d'aproximadament entre 3 i 20 s; per tant no dispara.

Problema PT12

Un transformador trifàsic té les següents característiques

$$S_N = 8 \text{ kVA}$$

$$U_N = 8000/380 \text{ V}$$

$$\epsilon_{cc} = 7\%$$

$$\cos \varphi_{cc} = 0.4$$

$$P_0 = 600 \text{ W}$$

$$\cos \varphi_0 = 0.3$$

S'alimenta amb una font ideal de 8000 V pel costat primari. Al secundari del transformador s'instal·la un magnetotèrmic de 6 kA corba U per tal de protegir-lo. Sabent que els possibles valors de I_N del magnetotèrmic són 5, 10, 15, 20, 25, 32, 40 A; determineu quin és el magnetotèrmic a instal·lar per tal que respongui adequadament en càrrega i en curt circuit.

Calculem el corrent nominal

$$S_N = 8 \text{ kVA} = \sqrt{3} \cdot 380 I_{2N}$$

$$I_{2N} = \frac{8000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 12.2 \text{ A}$$

Cal un magnetotèrmic de 15 A.

Calculem el corrent de curt circuit

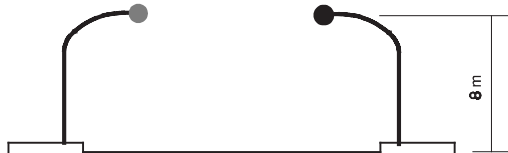
$$I_{2cc} = \frac{I_{2N}}{\epsilon_{cc}} = \frac{12.2}{0.07} = 173.6 \text{ A}$$

$$\frac{I_{2cc}}{15} = 11.6$$

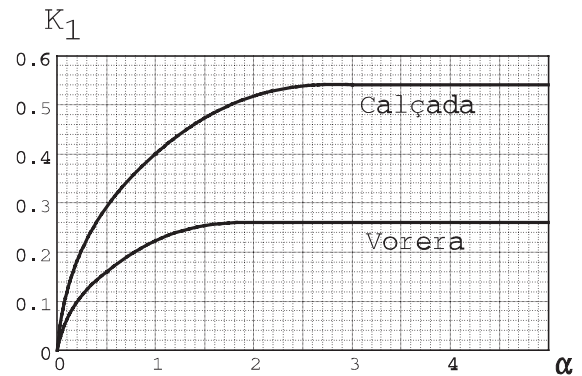
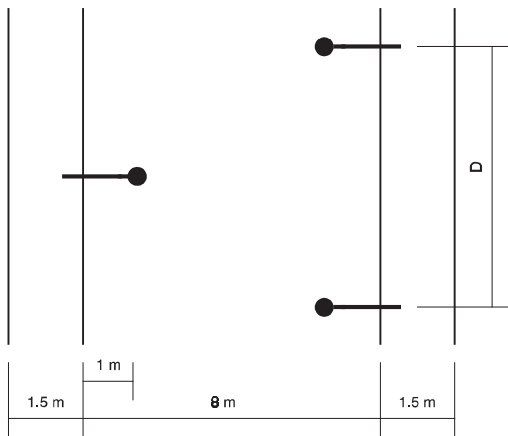
En cas de curt circuit el magnetotèrmic indicat dispararà instantàniament; per tant és correcte.

Problemes d'enllumenat viari

Problema EM1



Trobeu el valor de D' per tal que $E_{\text{mig}} = 25$ lux sabent que $\phi = 12000$ lm per lluminària i el factor de depreciació és $F = 0.8$. El fabricant ens facilita la gràfica de la lluminària.



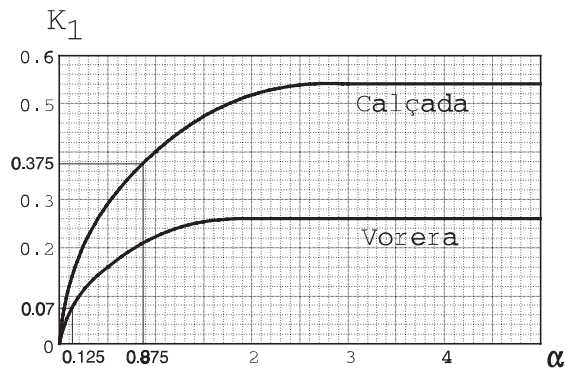
$$d = 1\text{ m} \quad B = 8\text{ m} \quad H = 8\text{ m}$$

Atès que hi ha fanals a ambdós costats, calcularem sobre la superfície de mitja calçada.

$$B' = \frac{B}{2} = 4 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{d}{H} = \frac{1}{8} = 0.125$$

$$\beta = \frac{B-d}{H} = \frac{8-1}{8} = 0.875$$



$$U = K_a + K_c = 0.07 + 0.375 = 0.445$$

$$E_{mig} = \frac{\phi_{nom} N F U}{D B'}$$

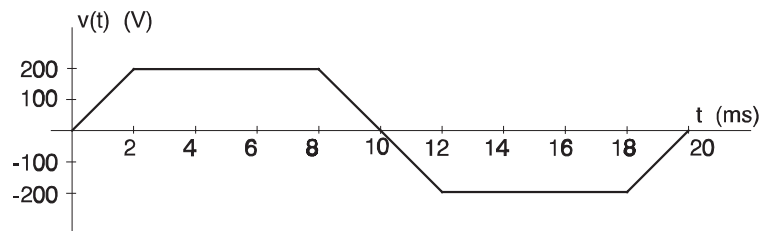
$$E_{mig} = \frac{12000 \cdot 1 \cdot 0.8 \cdot 0.445}{D \cdot 4} = 25 \text{ lux}$$

$$D = 42.72 \text{ m}$$

Problemes de càrregues no lineals

Problema HM1

Trobeu el valor mig rectificat i el valor eficaç de l'ona de la figura.



$$V_{mr} = \frac{1}{10} \int_0^{10} v(t) dt \quad V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{20} \int_0^{20} v^2(t) dt}$$

$$0 < t < 2 \quad v(t) = \frac{200}{2} t = 100t \quad v^2(t) = 10 \cdot 10^3 t^2$$

$$2 < t < 8 \quad v(t) = 200 \quad v^2(t) = 40 \cdot 10^3$$

$$8 < t < 12 \quad v(t) = \frac{-200}{2} t + 1000 = -100t + 1000 \quad v^2(t) = 10 \cdot 10^3 t^2 - 200 \cdot 10^3 t + 10^6$$

$$12 < t < 18 \quad v(t) = -200 \quad v^2(t) = 40 \cdot 10^3$$

$$18 < t < 20 \quad v(t) = 100t - 2000 \quad v^2(t) = 10 \cdot 10^3 t^2 - 400 \cdot 10^3 t + 4 \cdot 10^6$$

$$V_{mr} = \frac{1}{10} \left[\int_0^2 100t \, dt + \int_2^8 200 \, dt + \int_8^{10} (-100t + 1000) \, dt \right]$$

$$V_{mr} = \frac{1}{10} \left[100 \left[\frac{t^2}{2} \right]_0^2 + 200 [t]_2^8 + \left[-100 \frac{t^2}{2} + 1000t \right]_8^{10} \right] = \frac{1}{10} [200 + 1200 + 200] = 160 \, V$$

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{20} \left[\int_0^2 10 \cdot 10^3 t^2 \, dt + \int_2^8 40 \cdot 10^3 \, dt + \int_8^{12} [10 \cdot 10^3 t^2 - 200 \cdot 10^3 t + 10^6] \, dt + \right. \\ \left. + \int_{12}^{18} 40 \cdot 10^3 \, dt + \int_{18}^{20} [10 \cdot 10^3 t^2 - 400 \cdot 10^3 t + 4 \cdot 10^6] \, dt \right]$$

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{20} \left[10 \cdot 10^3 \left[\frac{t^3}{3} \right]_0^2 + 40 \cdot 10^3 [t]_2^8 + \left[10 \cdot 10^3 \frac{t^3}{3} - 200 \cdot 10^3 \frac{t^2}{2} + 10^6 t \right]_8^{12} + \right. \\ \left. + 40 \cdot 10^3 [t]_{12}^{18} + \left[10 \cdot 10^3 \frac{t^3}{3} - 400 \cdot 10^3 \frac{t^2}{2} + 4 \cdot 10^6 t \right]_{18}^{20} \right]$$

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{20} [26666.66 + 240 \cdot 10^3 + 53333.33 + 240 \cdot 10^3 + 26666.66]$$

$$V_{rms}^2 = 29333.333$$

$$V_{rms} = \sqrt{29333.333} = 171.27 \, V$$

Problema HM2

Una ona té la següent descomposició harmònica

$$V_1 = 203.26 \, V \quad V_3 = 67.75 \, V \quad V_5 = 40.65 \, V \quad V_7 = 29.04 \, V$$

determineu el seu valor eficaç i el seu THD

$$V = \sqrt{\sum V_i^2} = \sqrt{203.26^2 + 67.75^2 + 40.65^2 + 29.04^2} = 220 V$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{67.75^2 + 40.65^2 + 29.04^2}}{203.26} = 0.41$$

Problema HM3

Tenim un transformador trifàsic Dyn11 amb les següents característiques nominals

$$S_N=2500 \text{ kVA}$$

$$V_1=25 \text{ kV}$$

$$V_2=380 \text{ V}$$

del qual sabem que el seu esquema equivalent per fase presenta, mesurades en corrent continu,

$$R_p=1.44637 \ \Omega$$

$$R_s=0.33417 \text{ m}\Omega$$

i que les seves pèrdues en càrrega en condicions nominals són de 31232 W.

Aquest transformador ha d'alimentar tres càrregues iguals en estrella, cada una d'elles amb el següent espectre harmònic

h	$\frac{I_h}{I_1} (\%)$	h	$\frac{I_h}{I_1} (\%)$	h	$\frac{I_h}{I_1} (\%)$
3	82.8	11	22.8	19	9.1
5	55.3	13	22.8	21	8.4
7	27.8	15	16.6	23	5.9
9	17.5	17	10.3	25	3.4

que correspon a un rectificador monofàsic amb filtre capacitiu (font d'alimentació).

A quin percentatge del corrent nominal s'ha de limitar el corrent del transformador?.

Calculem els corrents nominals

$$I_{1n} = \frac{2500}{\sqrt{3} \cdot 25} = 57.74 \text{ A} \quad I_{2n} = \frac{2500}{\sqrt{3} \cdot 0.38} = 3798 \text{ A}$$

llavors

$$P_{ec-r}(pu) = \frac{31232}{3 \cdot 1.44637 \cdot 57.74^2 + 3 \cdot 0.33417 \cdot 10^{-3} \cdot 3798^2} - 1 = 0.0797$$

Fem una taula per realitzar els càlculs

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	$\left(h \frac{I_h}{I_1}\right)^2$
3	0.828	0.6856	6.170
5	0.553	0.3058	7.645
7	0.278	0.0773	3.787
9	0.175	0.0306	2.481
11	0.228	0.0520	6.290
13	0.228	0.0520	8.785
15	0.166	0.0276	6.200
17	0.103	0.0106	3.066
19	0.091	0.0083	2.989
21	0.084	0.0071	3.112
23	0.059	0.0035	1.841
25	0.034	0.0012	0.723

Sumes 1.2616 53.09

$$I_{m\grave{a}x}(pu) = \sqrt{\frac{1 + 0.0797}{1 + \frac{53.09}{1.2616} \cdot 0.0797}} = 0.498$$

Així, doncs, s'hauria de limitar la intensitat al 49.8% del nominal, és a dir, a 1890 A per fase en el secundari.

Productes de baixa tensió:

Cables aïllats amb PVC

Fusibles cilíndrics i de ganivetes

Interruptors automàtics magnetotèrmics

Productes de mitja tensió:

Cables aïllats amb EPR

Fusibles cilíndrics

Apèndix: Catàlegs

Cables de coure aïllats amb PVC per a baixa tensió

Instal·lació a l'aire

Secció (mm ²)	Corrent màxim admissible a 40°C					Resistència a 20°C (Ω/km)
	1 unipolar	2 unipolars (1)	3 unipolars (2)	1 bipolar (3)	1 tripolar (4)	
1.5	17	15	12	14	11	12.6
2.5	24	21	16	18	15	7.55
4	32	28	22	24	21	4.72
6	40	35	28	31	27	3.15
10	56	49	39	45	37	1.89
16	76	66	53	59	48	1.18
25	100	87	72	80	65	0.755
35	124	108	86	98	78	0.539
50	148	129	108	115	97	0.378
70	184	161	138	143	123	0.270
95	228	199	178	178	153	0.199
120	264	231	206	206	180	0.157
150	300	262	236	238	206	0.126
185	344	301	273	273	236	0.102
240	404	353	326	322	277	0.0787
300	464	406	375	374	318	0.0629
400	532	465	438			0.0472
500	608	532	498			0.0378

(1) també dos unipolars i terra

(2) també tres unipolars i neutre o tres unipolars i terra o tres unipolars, neutre i terra

(3) també dos fils i terra

(4) també tres fils i neutre o tres fils i terra o tres fils, neutre i terra

Cables de coure aïllats amb PVC per a baixa tensió

Instal·lació a l'aire

Correcció per agrupació de cables multipolars o ternes d'unipolars en safata perforada separats una distància superior al quart de diàmetre i inferior al diàmetre

Nombre de cables o ternes verticalment	Nombre de cables o ternes horitzontalment			
	1	2	3	més de 3
1	1.00	0.93	0.87	0.83
2	0.89	0.83	0.79	0.75
3	0.80	0.76	0.72	0.69
més de 3	0.75	0.70	0.66	0.64

Correcció per cables multipolars o ternes d'unipolars agrupats d'altres formes

Agrupació	Nombre de cables o ternes		
	2	3	més de 3
Cables en contacte	0.85	0.80	0.75
Separats un diàmetre en safata contínua	0.90	0.85	0.80
Separats un diàmetre en safata perforada	0.95	0.90	0.85

Correcció per agrupació de cables unipolars agrupats sota tub

El factor de correcció serà de 0.8

Correcció en funció de la temperatura ambient

Temperatura (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Factor de correcció	1.33	1.28	1.23	1.18	1.12	1.06	1.00	0.93	0.86

Cables de coure aïllats amb PVC per a baixa tensió

Instal.lació enterrada

Secció (mm ²)	Corrent màxim admissible a 25°C en terreny de 100 °C cm/W					Resistència a 20°C (Ω/km)
	1 unipolar	2 unipolars (1)	3 unipolars (2)	1 bipolar (3)	1 tripolar (4)	
10	96	84	63	68	56	1.89
16	128	112	82	87	72	1.18
25	164	143	105	115	93	0.755
35	196	171	127	136	112	0.539
50	228	199	150	161	135	0.378
70	284	248	183	196	165	0.270
95	340	297	217	238	198	0.199
120	388	339	251	269	228	0.157
150	436	381	277	301	255	0.126
185	488	427	315	336	288	0.102
240	568	497	363	388	333	0.0787
300	640	560	412	441	378	0.0629
400	728	637	461			0.0472
500	812	710	513			0.0378

(1) també dos unipolars i terra

(2) també tres unipolars i neutre o tres unipolars i terra o tres unipolars, neutre i terra

(3) també dos fils i terra

(4) també tres fils i neutre o tres fils i terra o tres fils, neutre i terra

Cables de coure aïllats amb PVC per a baixa tensió

Instal.lació enterrada

Correcció per agrupació de cables multipolars o ternes d'unipolars en la mateixa rasa

Nombre de cables o ternes	2	3	4	5
Factor de correcció	0.85	0.75	0.70	0.60

Correcció segons la resistivitat tèrmica del sòl

Resistivitat $\left(\frac{^{\circ}C \cdot cm}{W}\right)$	85	100	120	140	165	200	230	280
Factor de correcció	1.06	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70

Correcció en funció de la temperatura del sòl

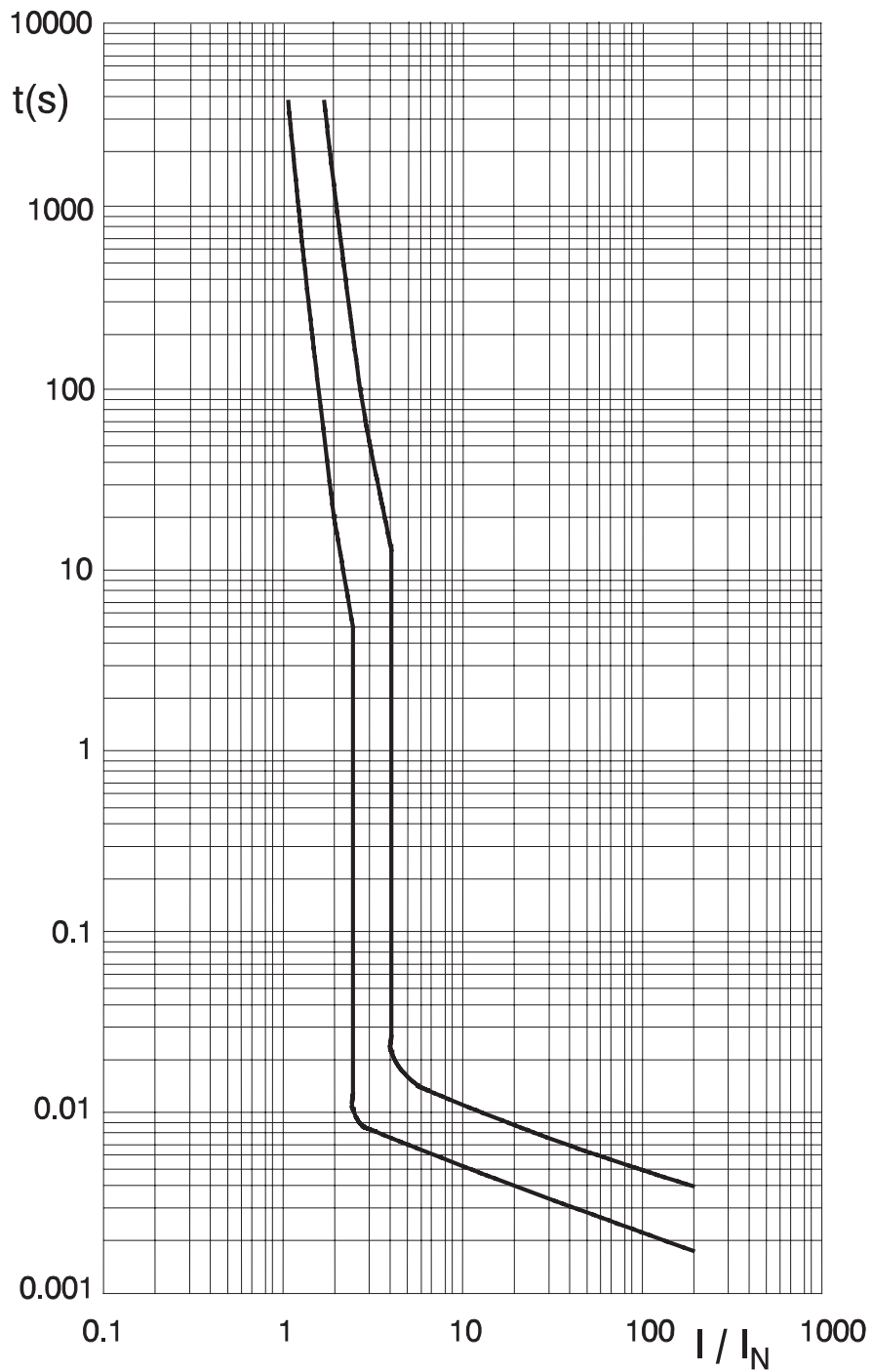
Temperatura ($^{\circ}C$)	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Factor de correcció	1.13	1.09	1.04	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.74

Interruptors magnetotèrmics per a baixa tensió

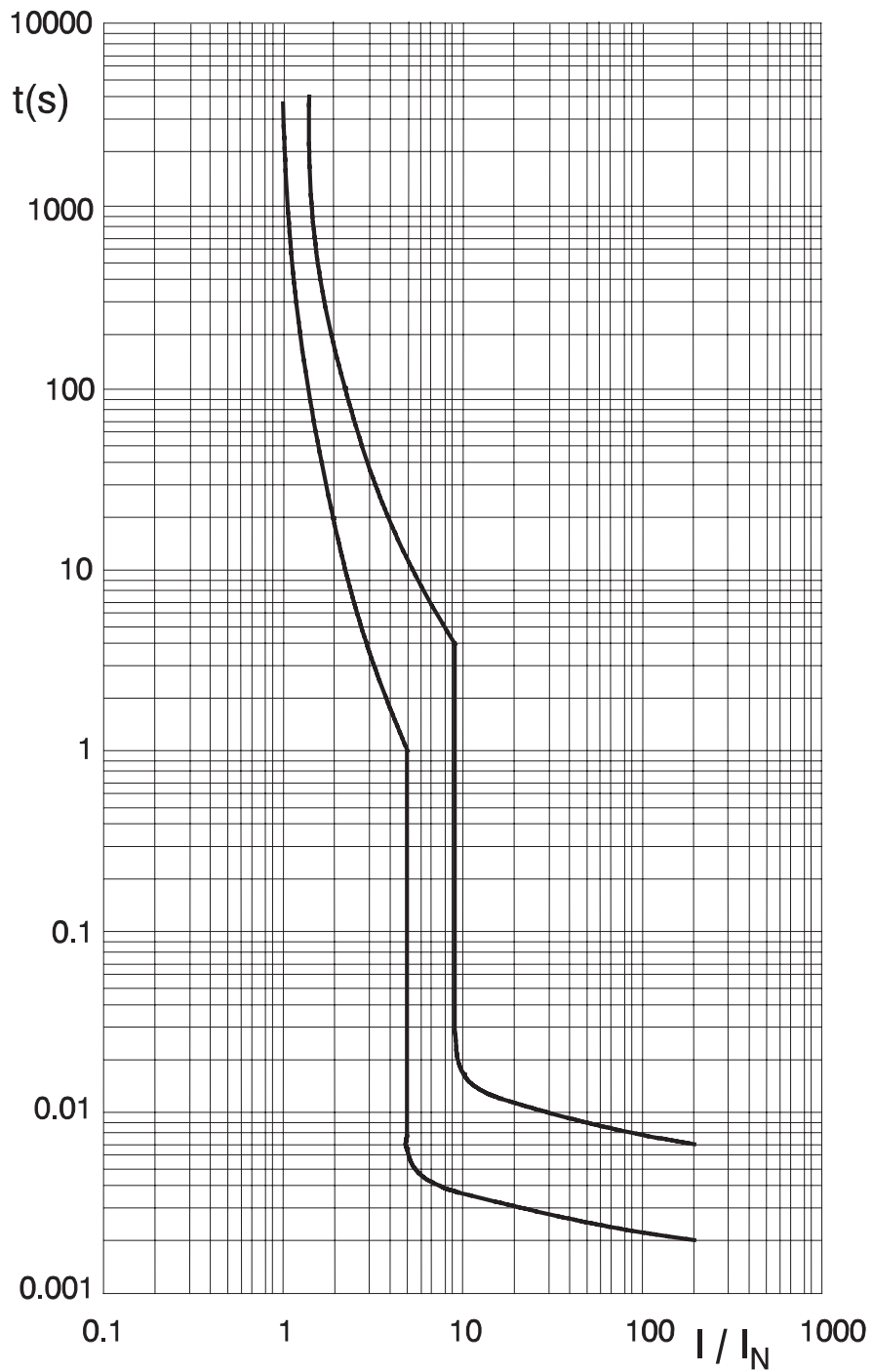
Poder de tall	6 kA	8 kA	10 kA
Tensió nominal	380 V c.a.	380 V c.a.	400 V c.a.
Tipus	1P 1P+N 2P 3P 3P+N	1P 2P 3P 4P	1P 2P 3P 4P
Corbes disponibles	L U D	L U	L U D
Calibres disponibles	1 2 3 5 10 15 20 25 32 40	1 2 3 5 10 15 20 25 32 40	32 40 50 63 80 100

Corbes de desconexió en les pàgines següents

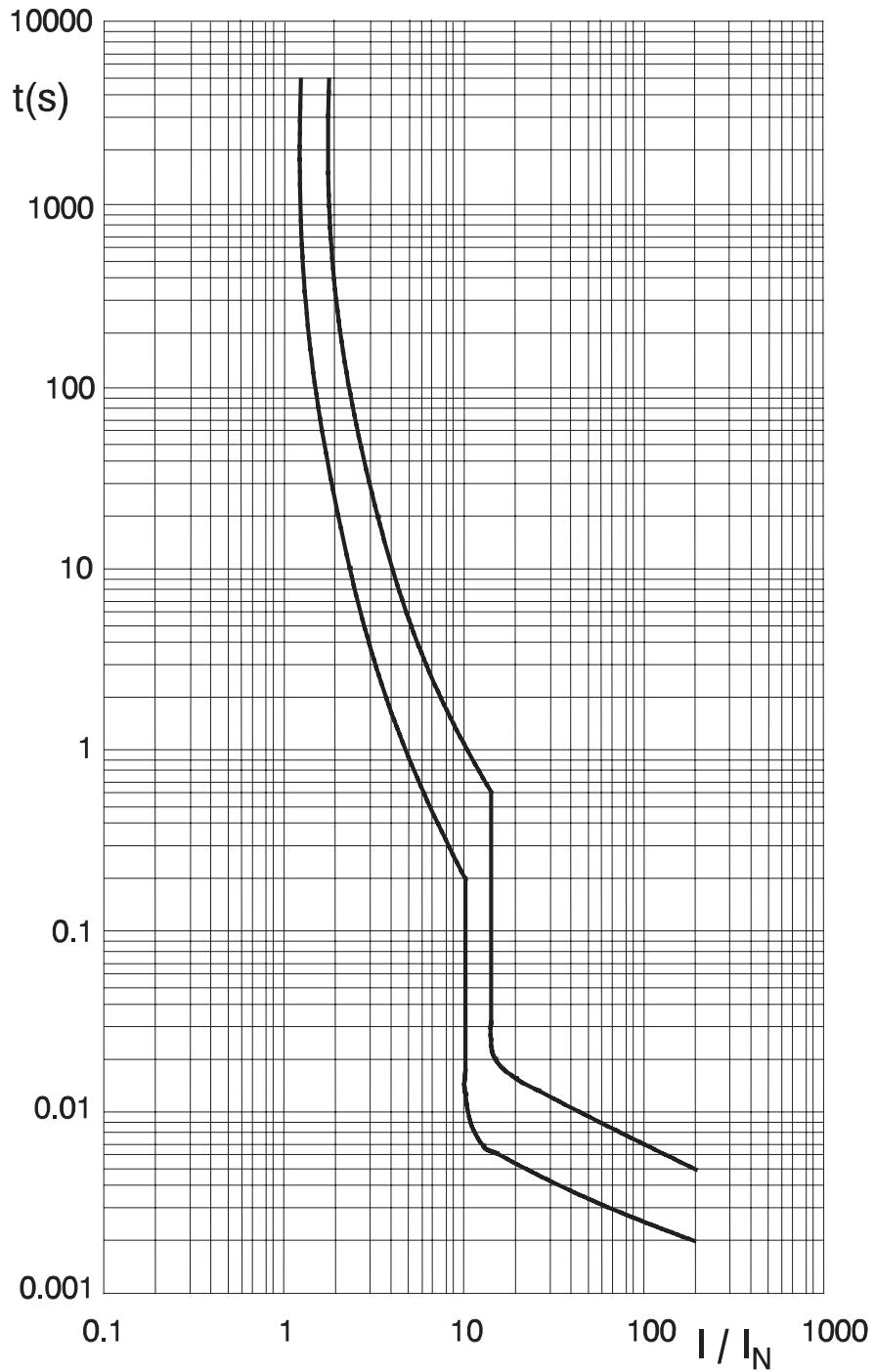
Interruptors magnetotèrmics de 6 kA corba L



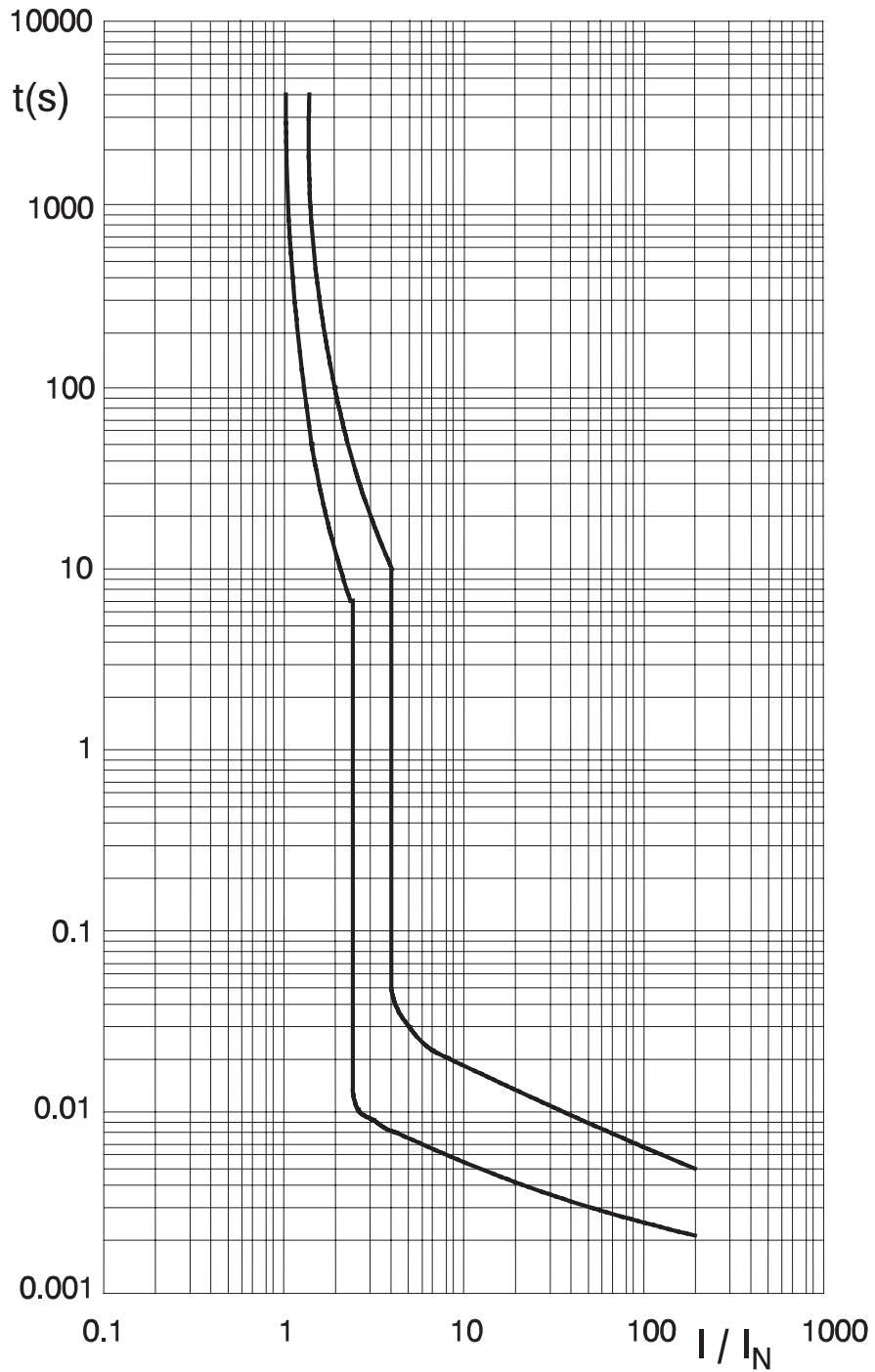
Interruptors magnetotèrmics de 6 kA corba U



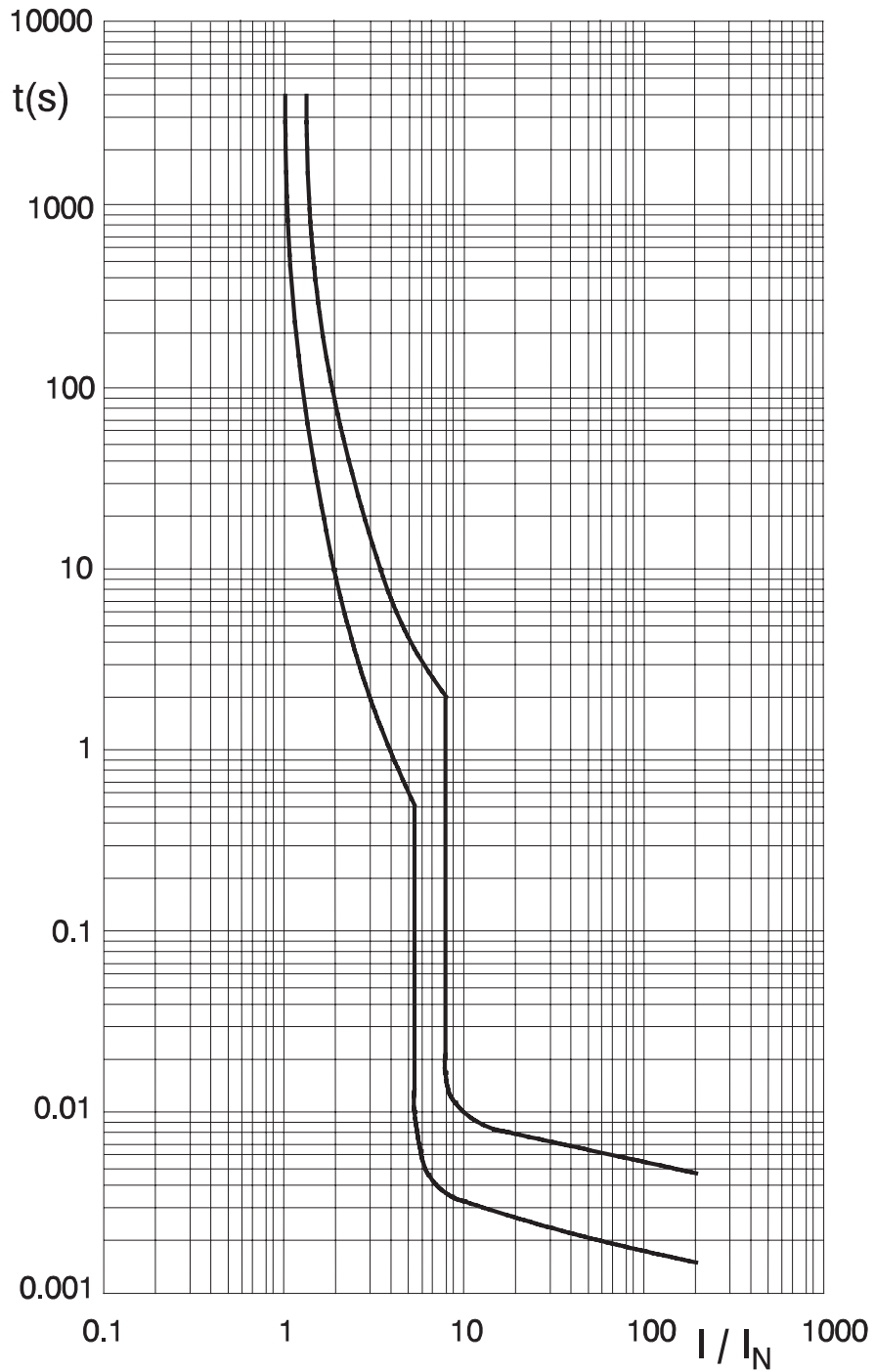
Interruptors magnetotèrmics de 6 kA corba D



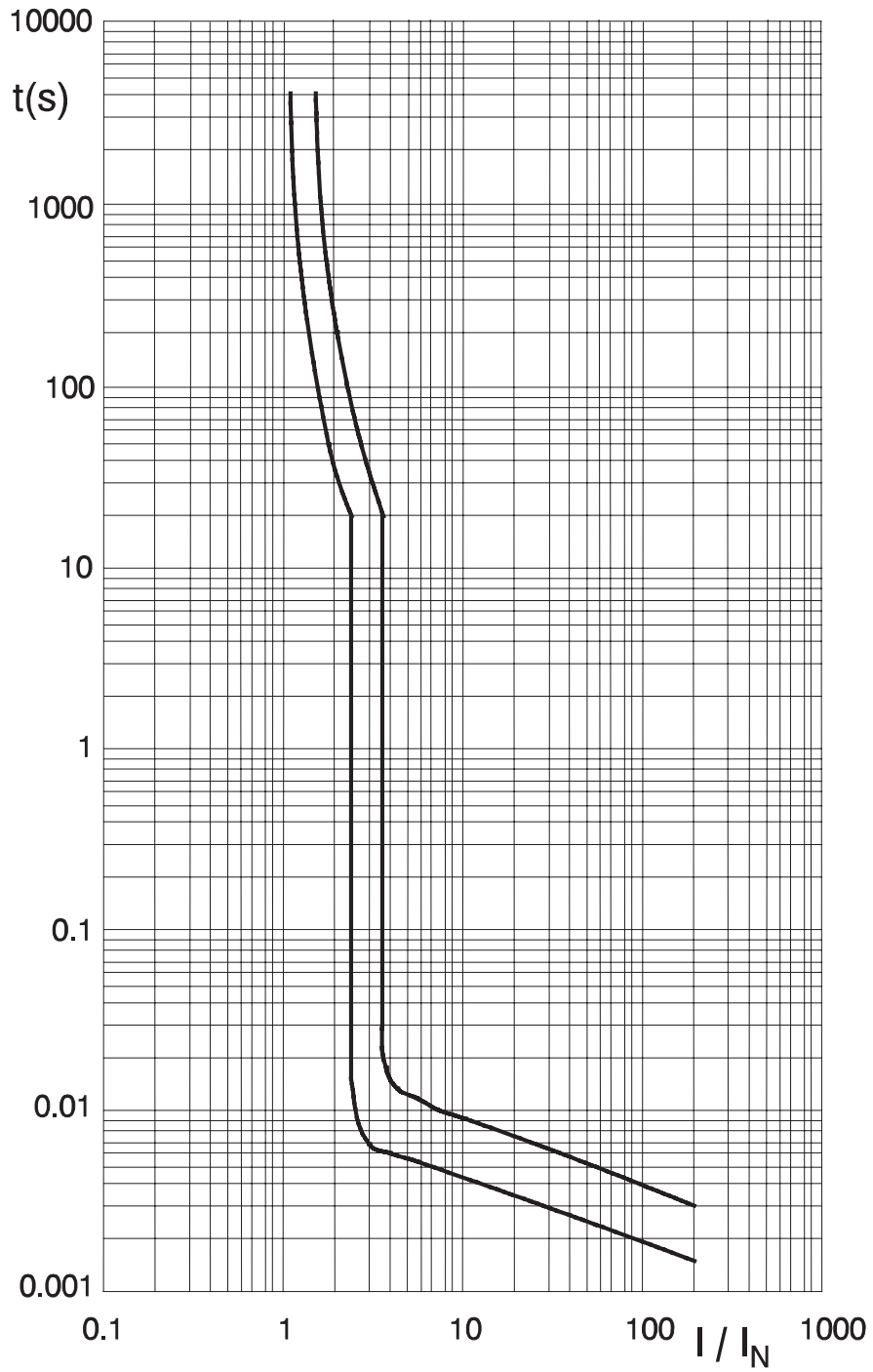
Interrupctors magnetotèrmics de 8 kA corba L



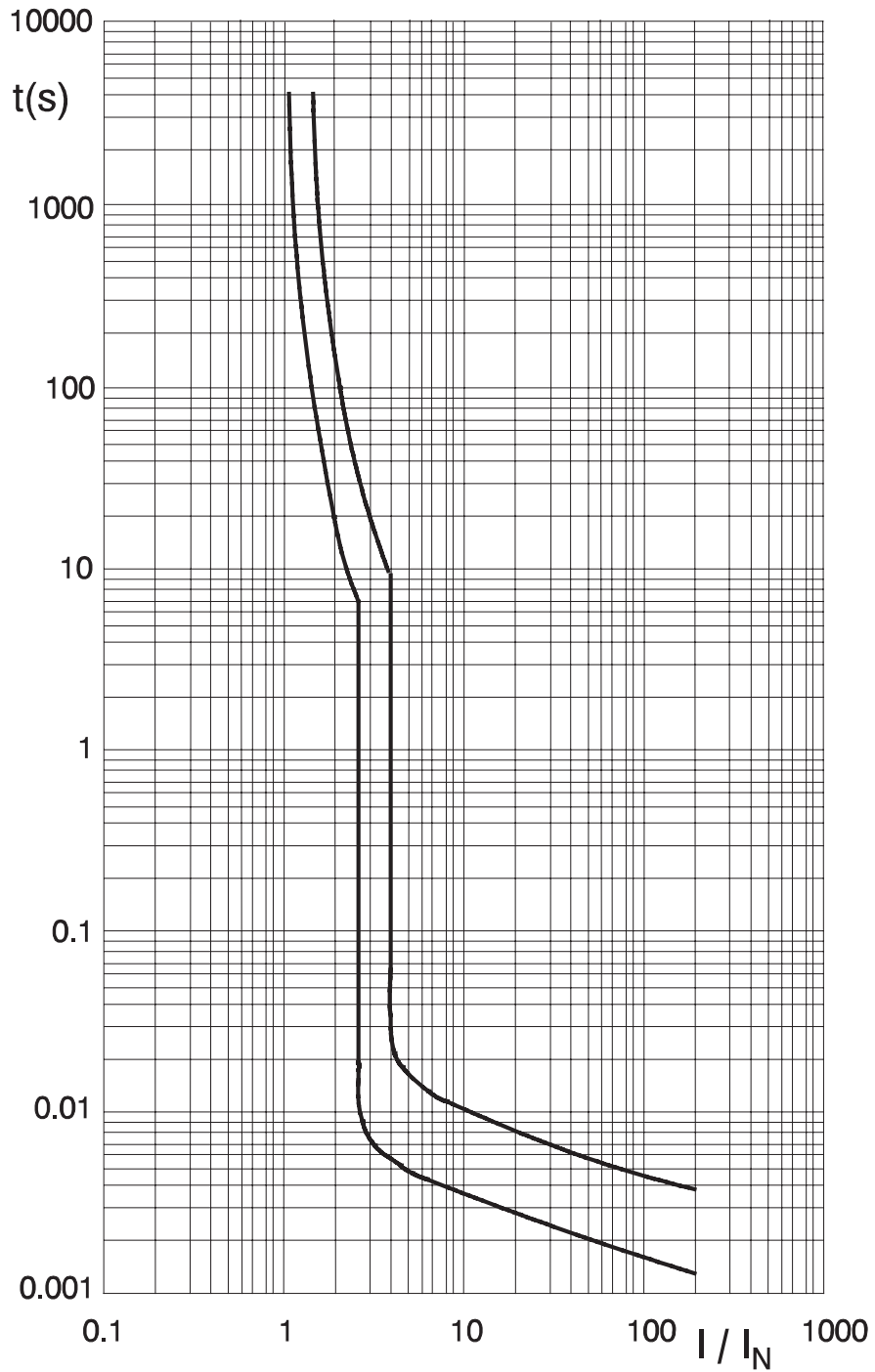
Interruptors magnetotèrmics de 8 kA corba U



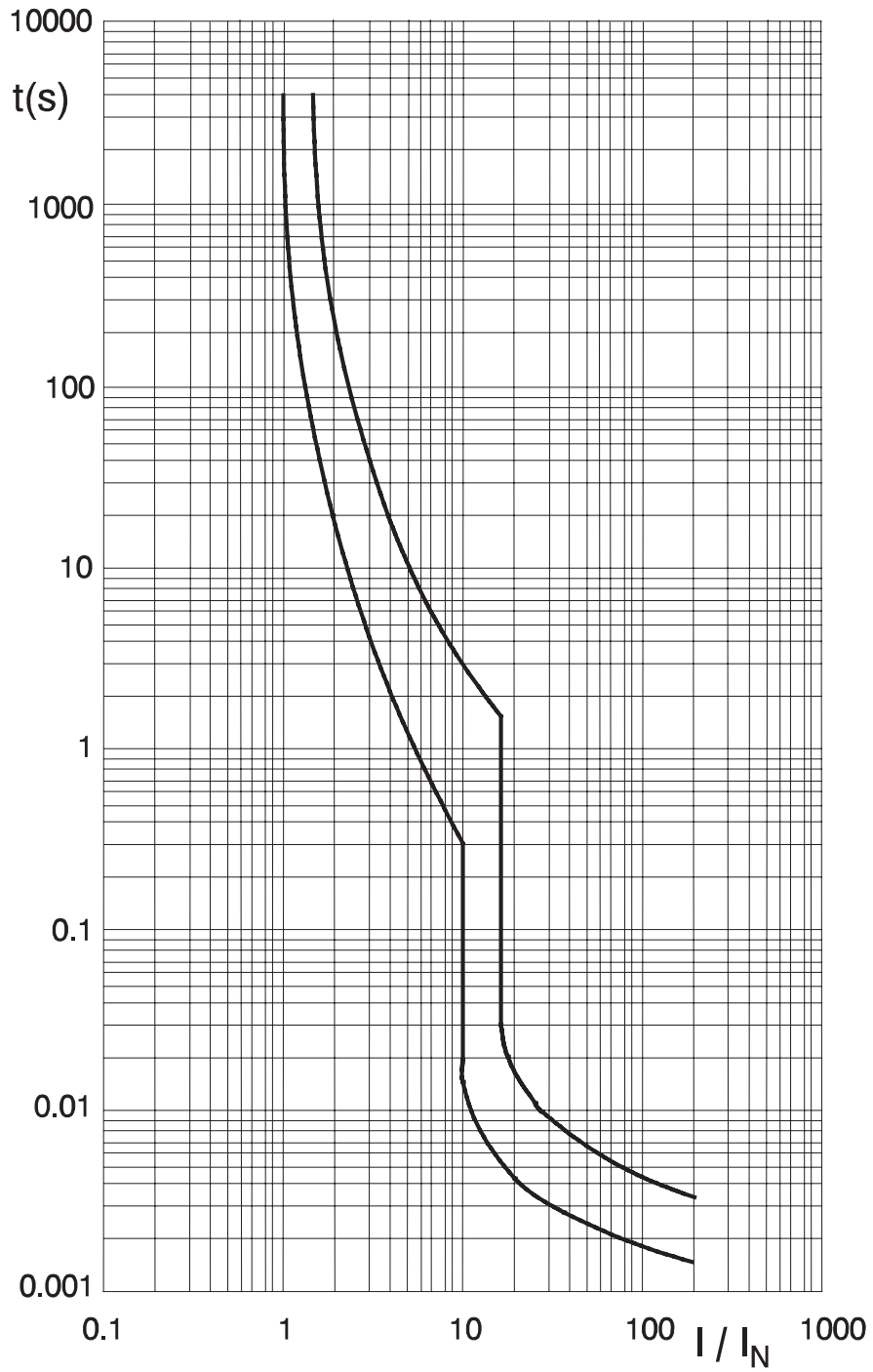
Interruptors magnetotèrmics de 10 kA corba L



Interruptors magnetotèrmics de 10 kA corba U



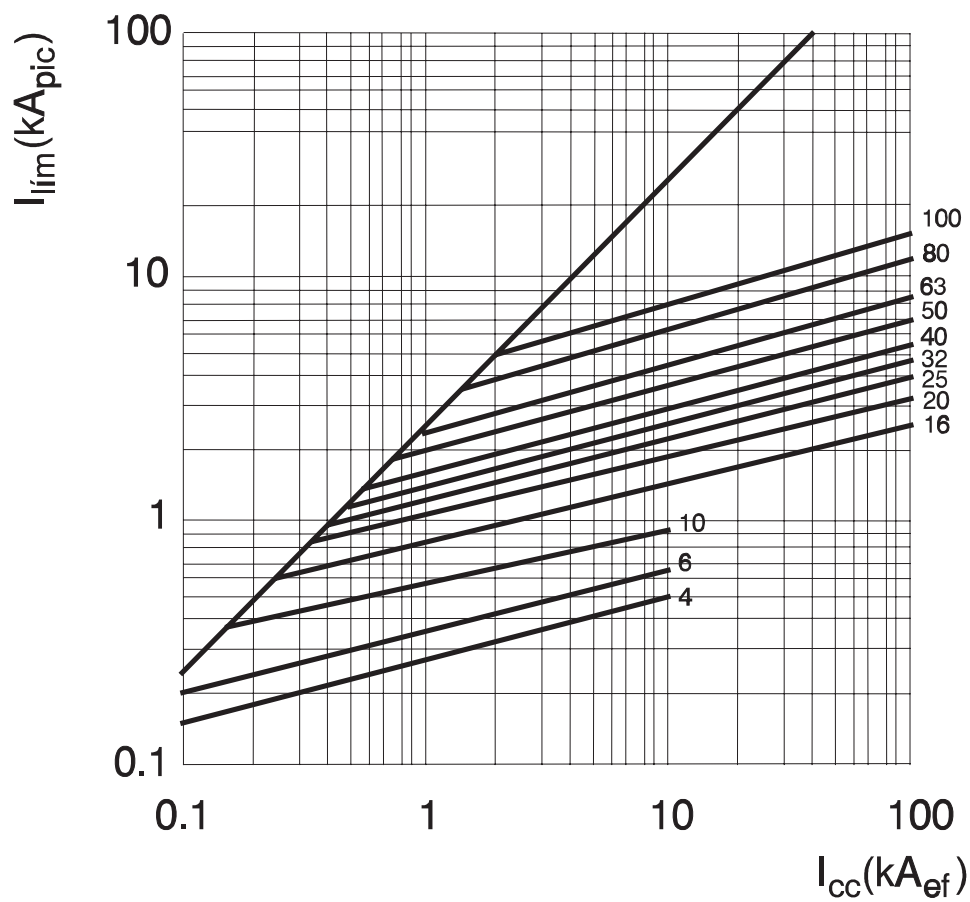
Interruptors magnetotèrmics de 10 kA corba D



Fusibles cilíndrics tipus gl de 500 V

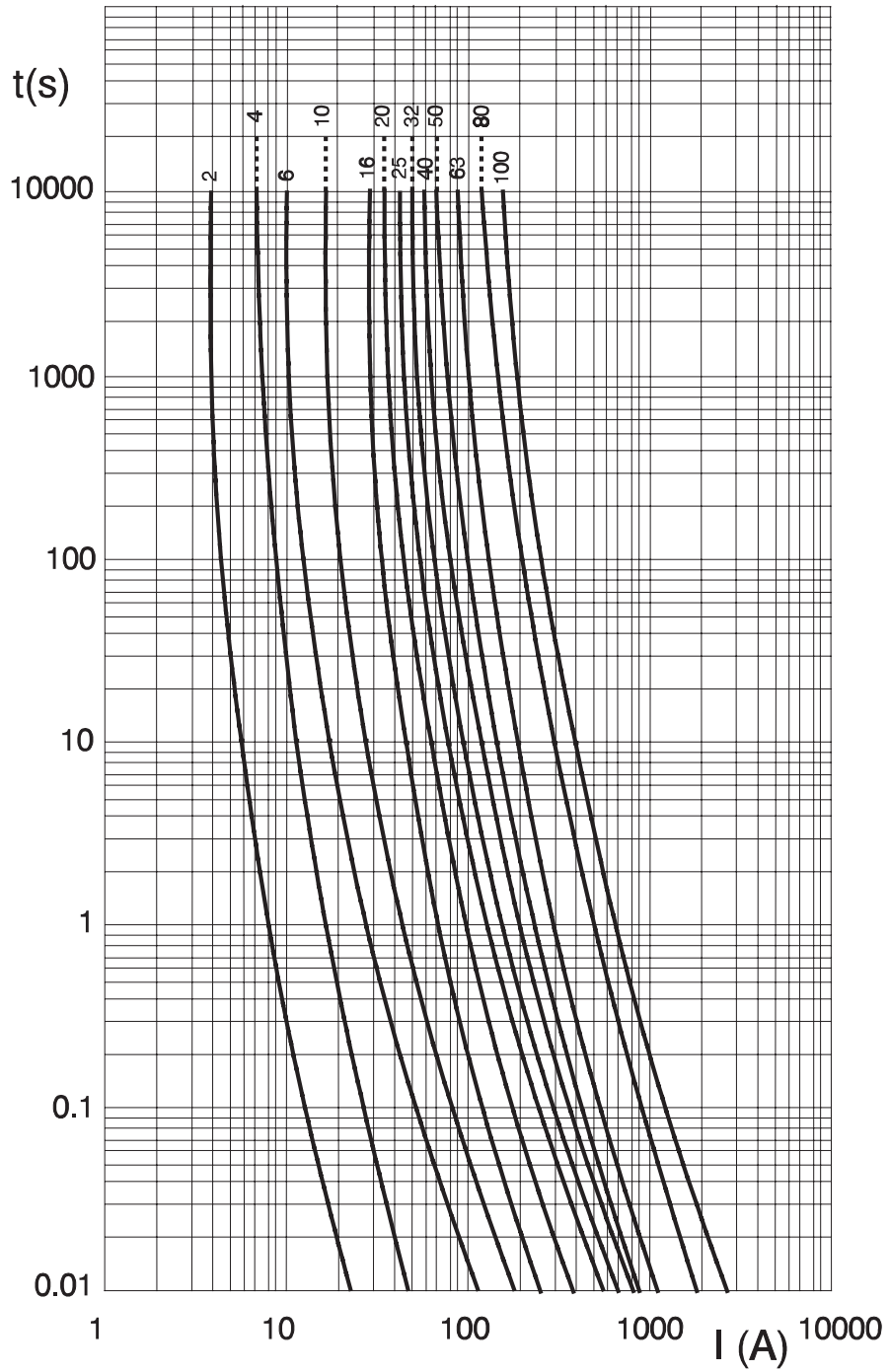
talla	00	0		1	2
dimensions	8.5 x 31.5	10.3 x 38		14 x 51	22 x 58
poder de tall	20 kA	20 kA	100 kA	100 kA	100 kA
calibres disponibles	2	16	2	4	16
	4	20	4	6	20
	6	25	6	10	25
	10	32	10	16	32
	16		16	20	40
				20	25
				32	63
				40	80
				50	100

Corba de limitació



Fusibles cilíndrics tipus gI de 500 V

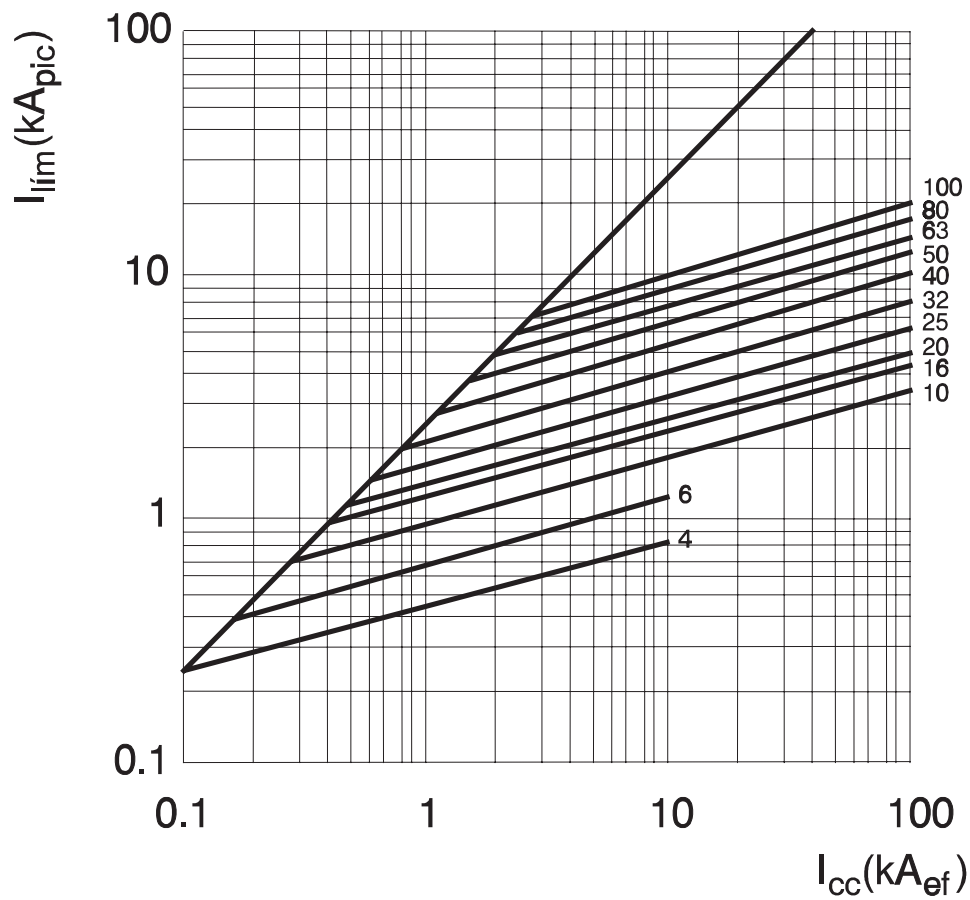
Corba de fusió



Fusibles cilíndrics tipus aM de 500 V

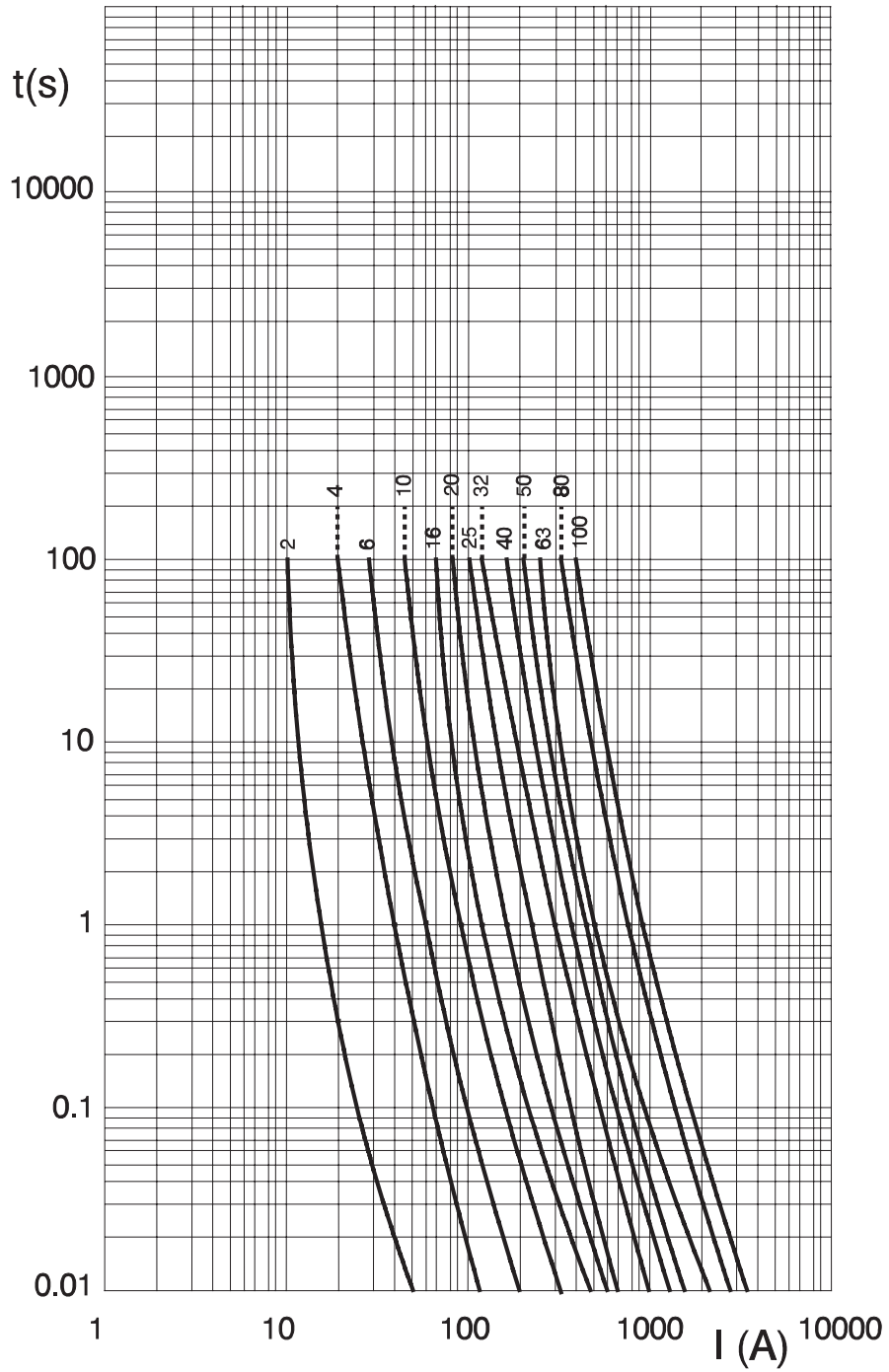
talla	00	0		1	2
dimensions	8.5 x 31.5	10.3 x 38		14 x 51	22 x 58
poder de tall	20 kA	20 kA	100 kA	100 kA	100 kA
calibres disponibles	2	16	2	4	16
	4	20	4	6	20
	6	25	6	10	25
	10	32	10	16	32
	16		16	20	40
				20	25
				32	63
				40	80
				50	100

Corba de limitació



Fusibles cilíndrics tipus aM de 500 V

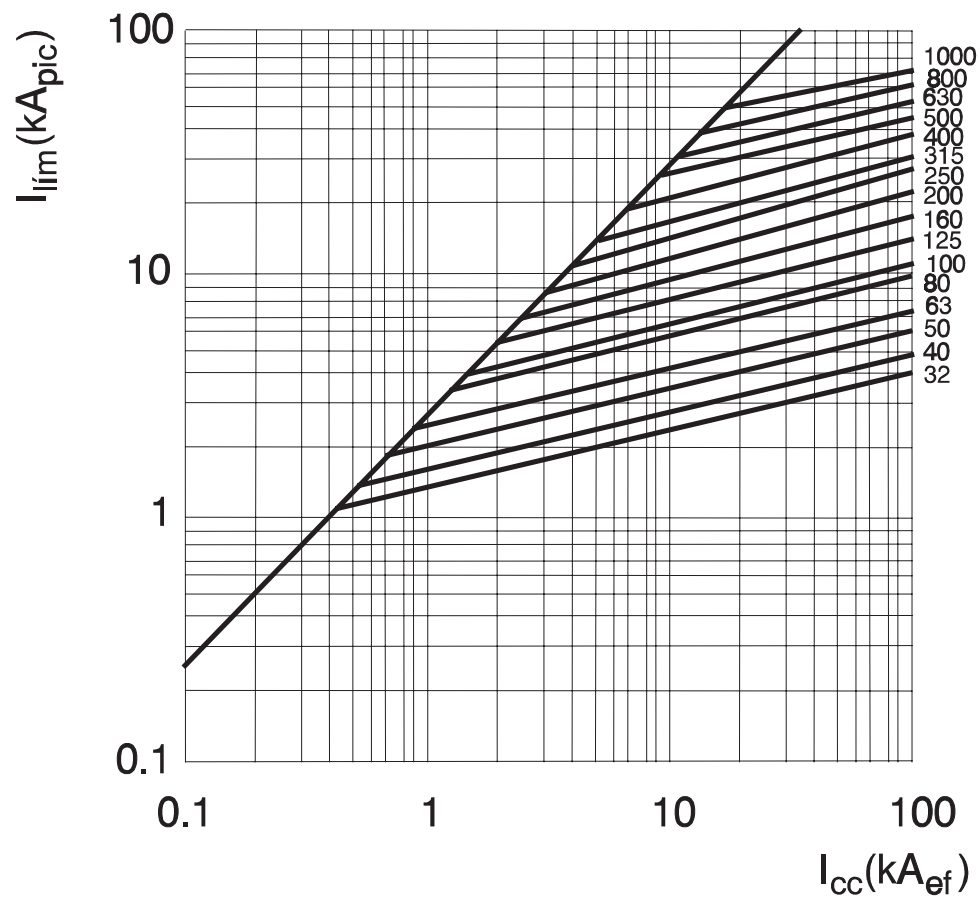
Corba de fusió



Fusibles de ganivetes tipus gl de 500 V

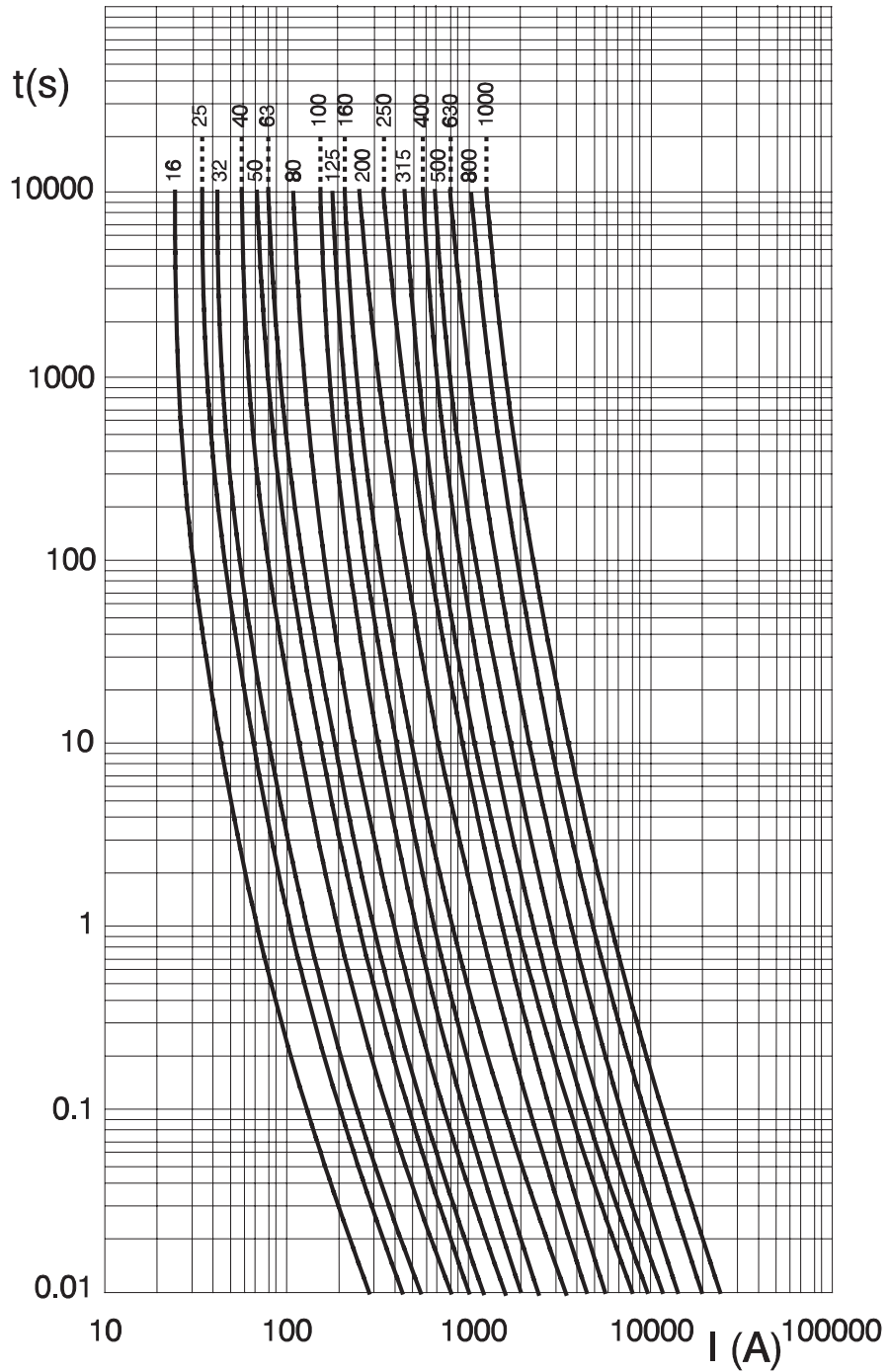
talla	00	0	1	2	3	4
poder de tall	20 kA	20 kA	100 kA	100 kA	100 kA	100 kA
calibres disponibles	16	50	80	160	400	630
	25	63	100	200	500	800
	32	80	125	250	630	1000
	40	100	160	315		
	50	125	200	400		
	63	160	250			
	80					
	100					

Corba de limitació



Fusibles de ganivetes tipus gl de 500 V

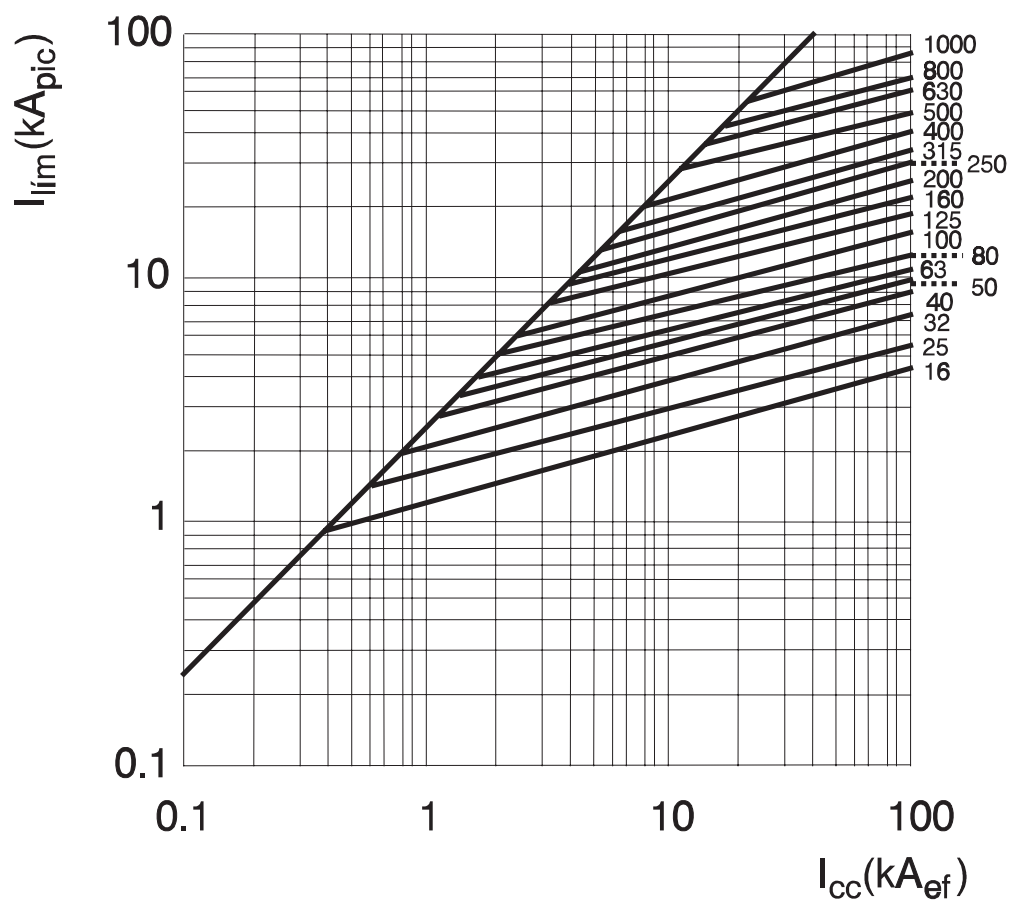
Corba de fusió



Fusibles de ganivetes tipus aM de 500 V

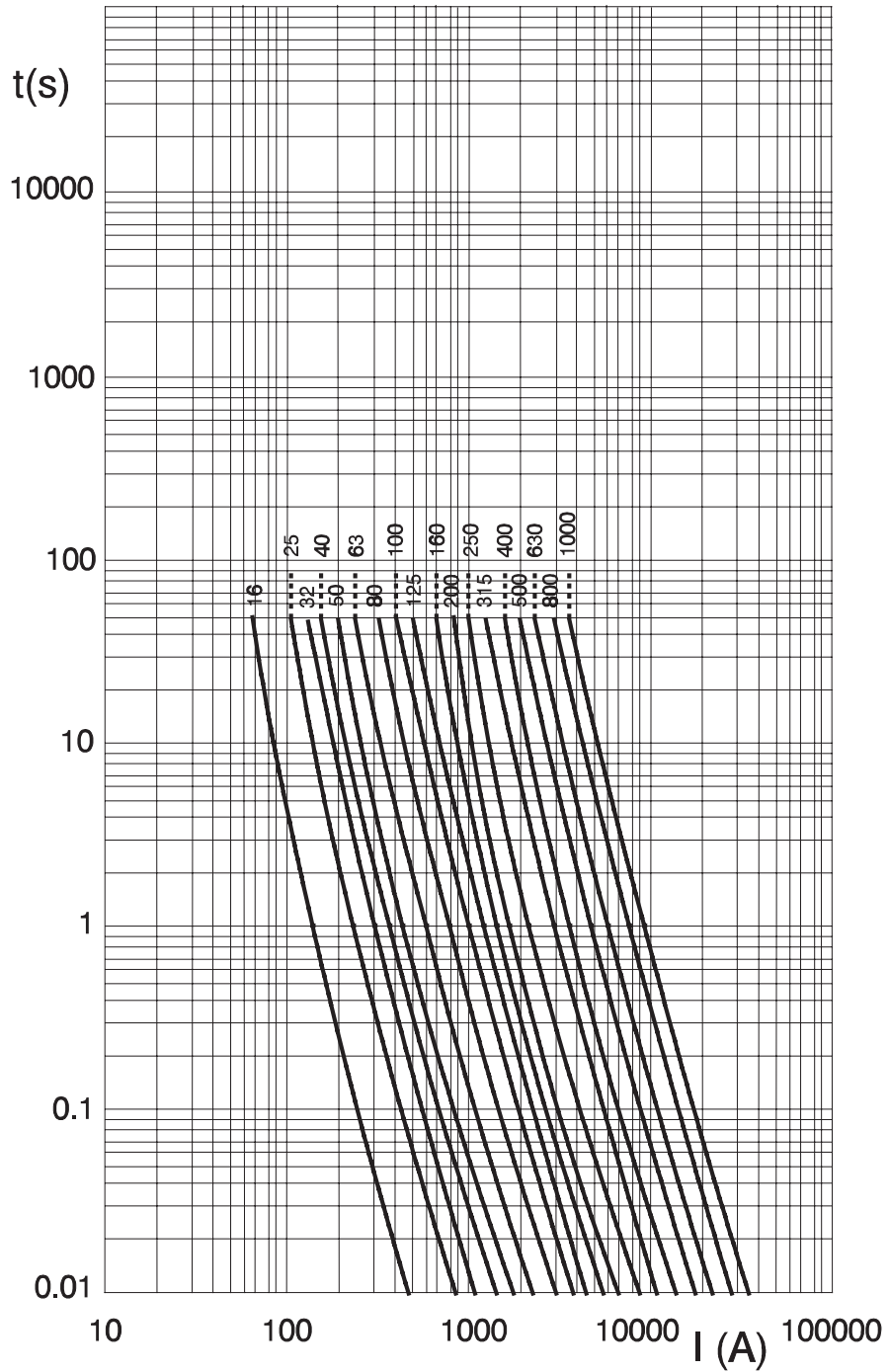
talla	00	0	1	2	3	4
poder de tall	20 kA	20 kA	100 kA	100 kA	100 kA	100 kA
calibres disponibles	16 25 32 40 50 63 80 100	50 63 80 100 125 160	80 100 125 160 200 250	160 200 250 315 400	400 500 630	630 800 1000

Corba de limitació



Fusibles de ganivetes tipus aM de 500 V

Corba de fusió



Cables de coure aïllats amb EPR per a mitja tensió

Instal·lació a l'aire o enterrada

Secció (mm ²)	tres cables unipolars			un cable tripolar		
	Corrent màxim (A)		Resistència a 80°C (Ω/km)	Corrent màxim (A)		Resistència a 80°C (Ω/km)
	a l'aire a 40 °C	enterrada a 25 °C		a l'aire a 40 °C	enterrada a 25 °C	
10	64	86	2.31	61	79	2.34
16	86	112	1.44	82	103	1.46
25	120	144	0.924	110	135	0.936
35	145	171	0.660	135	162	0.669
50	180	207	0.462	165	193	0.468
70	230	252	0.330	210	234	0.334
95	285	301	0.243	260	279	0.246
120	335	342	0.193	300	319	0.195
150	385	382	0.154	350	360	0.156
185	450	432	0.125	400	405	0.126
240	535	495	0.0963			
300	615	558	0.0770			
400	720	634	0.0578			
500	825	711	0.0462			

Cables de coure aïllats amb EPR per a mitja tensió

Cables unipolars

Secc. (mm ²)	Reactància a 50 Hz (Ω/km/fase) segons tensió en kV								
	1.8/3	3.6/6	6/10	8.7/15	12/20	15/25	18/30	26/45	36/66
10 16	0.158 0.148	0.166 0.156							
25 35	0.140 0.133	0.147 0.141	0.145 0.139	0.148 0.146					
50 70	0.129 0.124	0.135 0.130	0.131 0.125	0.140 0.130	0.146 0.135	0.151 0.143			
95 120	0.120 0.117	0.125 0.121	0.118 0.113	0.123 0.120	0.129 0.125	0.135 0.130	0.154 0.149	0.168 0.162	
150 185	0.113 0.111	0.118 0.114	0.109 0.105	0.116 0.111	0.121 0.117	0.126 0.122	0.145 0.141	0.158 0.153	0.172 0.165
240 300	0.109 0.107	0.111 0.109	0.102 0.099	0.107 0.103	0.111 0.108	0.117 0.112	0.137 0.132	0.148 0.143	0.158 0.152
400 500	0.104 0.103	0.106 0.104	0.095 0.092	0.100 0.097	0.104 0.101	0.109 0.105	0.128 0.126	0.138 0.133	

Cables tripolars

Secc. (mm ²)	Reactància a 50 Hz (Ω/km/fase) segons tensió en kV						
	1.8/3	3.6/6	6/10	8.7/15	12/20	15/25	18/30
10 16	0.128 0.123	0.141 0.134					
25 35	0.117 0.111	0.128 0.123	0.131 0.122	0.142 0.132			
50 70	0.109 0.107	0.118 0.113	0.117 0.110	0.126 0.119	0.135 0.125	0.140 0.132	
95 120	0.104 0.102	0.110 0.108	0.104 0.101	0.113 0.109	0.119 0.114	0.126 0.121	0.143 0.138
150 185	0.100 0.099	0.105 0.103	0.098 0.096	0.105 0.101	0.110 0.106	0.117 0.111	0.133 0.129

Cables de coure aïllats amb EPR per a mitja tensió

Instal·lació a l'aire

Correcció per agrupació de cables multipolars o ternes d'unipolars en safata perforada separats una distància superior al quart de diàmetre i inferior al diàmetre

Nombre de cables o ternes verticalment	Nombre de cables o ternes horitzontalment			
	1	2	3	més de 3
1	1.00	0.93	0.87	0.83
2	0.89	0.83	0.79	0.75
3	0.80	0.76	0.72	0.69
més de 3	0.75	0.70	0.66	0.64

Correcció per cables multipolars o ternes d'unipolars agrupats d'altres formes

Agrupació	Nombre de cables o ternes		
	2	3	més de 3
Cables en contacte	0.85	0.80	0.75
Separats un diàmetre en safata contínua	0.90	0.85	0.80
Separats un diàmetre en safata perforada	0.95	0.90	0.85

Correcció en funció de la temperatura ambient

Temperatura (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Factor de correcció	1.33	1.28	1.23	1.18	1.12	1.06	1.00	0.93	0.86

Cables de coure aïllats amb EPR per a mitja tensió

Instal.lació enterrada

Correcció per agrupació de cables multipolars o ternes d'unipolars en la mateixa rasa

Nombre de cables o ternes	2	3	4	5
Factor de correcció	0.85	0.75	0.70	0.60

Correcció segons la resistivitat tèrmica del sòl

Resistivitat $\left(\frac{^{\circ}C \cdot cm}{W}\right)$	85	100	120	140	165	200	230	280
Factor de correcció	1.06	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70

Correcció en funció de la temperatura del sòl

Temperatura ($^{\circ}C$)	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Factor de correcció	1.13	1.09	1.04	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.74

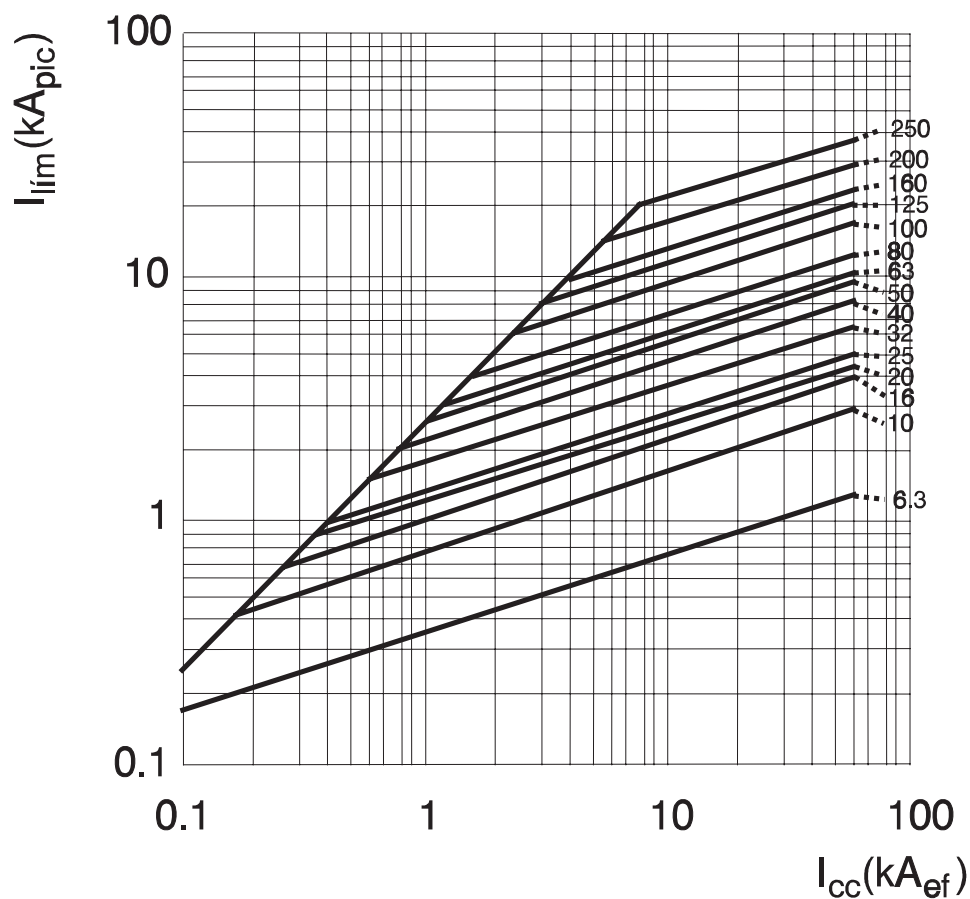
Correcció en funció de la profunditat d'enterrament

Profunditat (m)	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
Factor de correcció	1.03	1.02	1.00	0.99	0.97	0.96	0.95	0.93

Fusibles cilíndrics per a mitja tensió de 50 kA de poder de tall

3.6 - 7.2 i 12 kV		17.5 - 24 i 36 kV			
Corrent nominal	corrent mínim de tall	Corrent nominal	corrent mínim de tall	Corrent nominal	corrent mínim de tall
50	200	6.3	28	40	120
63	240	10	32	50	200
80	365	16	50	63	240
100	480	20	65	80	365
125	620	25	78	100	480
160	1000	32	99		
200	1400				
250	2000				

Corba de limitació



Fusibles cilíndrics per a mitja tensió de 50 kA de poder de tall

Corba de fusió

