

Instituto Schneider Electric de Formación

Diseño y utilización de fusibles limitadores MT

CT-128



La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:
<http://www.schneiderelectric.es>

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80
Fax: (93) 219 64 40
e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» de **Schneider Electric España S.A.**

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria:
«Reproducción del Cuaderno Técnico nº 128 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 128

Diseño y utilización de fusibles limitadores MT



Olivier BOUILLIEZ

Diplomado como ingeniero en la Ecole Centrale de Lyon en 1976, entra en Merlin Gerin en 1977.

Sucesivamente ocupó varios puestos de responsabilidad en el Servicio Técnico del Departamento de Aparamenta, y especialmente como Ingeniero de Estudios; fue jefe de grupo y después responsable de desarrollo de nuevos productos. Posteriormente se le propuso participar en la supervisión del desarrollo de la gama Flusarc de fusibles de MT de la marca Merlin Gerin.

Actualmente prosigue su carrera como Director de marketing de Edificios e Infraestructuras de Francia en Schneider Electric, después de haber sido director de programa de la tecnología de corte en vacío, director de actividad estratégica de MT y jefe del departamento de Equipos.



Juan Carlos PÉREZ QUESADA

Diplomado en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial en 1993. Desde 1994 trabaja en los servicios de Investigación y Desarrollo de MESA –Manufacturas Eléctricas, S.A.– filial española de Schneider Electric.

Ha participado en varios proyectos de desarrollo de productos y de investigación en el campo de los fusibles MT, trabajo del que es ahora el responsable técnico de Investigación y Desarrollo para Schneider Electric.

Trad.: J.M. Giró

Original francés: noviembre 2002

Versión española: enero 2006

Léxico

I_1	Poder de corte máximo
I_2	Corriente que desarrolla la máxima energía de arco
I_3	Corriente mínima de corte
I_{ef}	Valor eficaz de corriente prevista
I_N	Corriente asignada
I_p	Corriente cortada limitada
U_N	Tensión de servicio entre fases
U_p	Tensión de corte
U_{Res}	Tensión de red

Diseño y utilización de fusibles limitadores MT

En la protección de transformadores, motores o de otros receptores, el uso del fusible limitador MT está muy extendido.

Evidentemente, no es necesario enunciar aquí todas las ventajas que han proporcionado el éxito a este elemento. Entre sus cualidades más valoradas están su bajo coste y sus características de limitación, que reducen considerablemente la amplitud de la corriente y la energía liberada en caso de cortocircuito. Hasta la fecha, en media tensión (3,6 a 36 kV), ningún otro dispositivo puede pretender igualar al fusible en este aspecto, ni siquiera aproximársele.

También es cierto que este componente tiene límites que no hay que sobrepasar. Si ciertos usuarios rechazan la utilización de los fusibles, se debe a experiencias desgraciadas provocadas por no respetar ciertas reglas elementales de construcción o de utilización, lo que les ha originado defectos de explotación. Sólo después de haber revisado los puntos sensibles del diseño de un recambio o elemento de sustitución, será posible utilizarlo adecuadamente según sus especificaciones de uso, que si se respetan, asegurarán un servicio óptimo y sin fallos.

Índice

1 Las características asignadas	1.1 Repaso	p. 6
	1.2 U_N tensión asignada	p. 6
	1.3 I_N corriente asignada	p. 7
	1.4 I_3 corriente mínima de corte	p. 7
	1.5 I_2 corriente que da unas condiciones próximas a la energía máxima de arco	p. 8
	1.6 I_1 ó poder de corte máximo	p. 8
	1.7 Características tiempo-corriente	p. 9
	1.8 La corriente cortada limitada	p. 10
	1.9 La energía disipada	p. 10
	1.10 La potencia disipada	p. 10
2 Constitución de un elemento de sustitución	2.1 Los casquillos de los extremos	p. 11
	2.2 La envolvente cilíndrica	p. 12
	2.3 El núcleo	p. 13
	2.4 El elemento fusible	p. 13
	2.5 El polvo de extinción	p. 15
	2.6 El percutor	p. 16
3 Utilización	3.1 Generalidades	p. 17
	3.2 Protección de transformadores	p. 17
	3.3 Protección de motores	p. 20
	3.4 Protección de baterías de condensadores	p. 22
	3.5 Síntesis	p. 25
4 Anexos	4.1 Anexo 1: Resistencia en frío de los fusibles Fusarc-CF	p. 27
	4.2 Anexo 2: Característica tiempo-corriente de la gama de fusibles Fusarc-CF	p. 28
	4.3 Anexo 3: Utilización de fusibles en paralelo	p. 30

1 Las características asignadas

1.1 Repaso

La norma CEEI 60282-1 define tres clases de fusibles limitadores de corriente según su utilización:

Fusible asociado

Para aplicaciones en las que se puede demostrar, por cálculo o por experiencia en servicio, que son improbables bajos valores de corriente de defecto. Pero, hay que tener la seguridad de que la corriente mínima de corte asignada del elemento de sustitución es inferior a la mínima corriente de cortocircuito susceptible de aparecer aguas arriba del dispositivo de protección de BT.

Fusible de uso general

Cuando la experiencia o el cálculo indican que puede haber muy bajas sobreintensidades en la red (es decir, inferiores a cerca de cuatro veces la corriente asignada del fusible).

Fusible de corte integral

Especialmente recomendado para las aplicaciones en las que las sobreintensidades pueden ser tan débiles como la corriente mínima de fusión del fusible y cuando el elemento debe ser desclasificado para utilizarlo dentro de una envolvente.

Este Cuaderno Técnico, referido principalmente a los fusibles asociados, trata de conceptos que son aplicables a todas las clases de fusibles. Algunas de las definiciones básicas que siguen, pueden constituir las bases de un diccionario del fusible y, por tanto, facilitar los cambios entre los fabricantes de fusibles, los diseñadores de instalaciones y los usuarios.

1.2 U_N tensión asignada

Es la tensión de servicio entre fases (expresada en kV), la más elevada de la red, en la que podrá instalarse el fusible.

Los prescriptores de normas han fijado una lista de valores preferentes para las tensiones asignadas. Los ensayos normalizados garantizan el funcionamiento correcto de un fusible de tensión asignada U_N en una red de tensión U_{Res} , si su valor de U_N seleccionado en esta lista (**figura 1**), es inmediatamente superior a U_{Res} .

Por razones de corte, es imposible utilizar un fusible de tensión U_N en una red en la que U_{Res} sea superior a U_N . Al contrario ($U_N > U_{Res}$) es obligatorio, y a veces hasta es posible

encontrarse con valores de U_N muy superiores a los de la red. Esto es así por ciertas particularidades de diseño que limitan el valor de sobretensión de corte U_p y que permiten al constructor (y a él únicamente) garantizar un comportamiento correcto del fusible.

Por ejemplo, en el caso de una red en la que U_{Res} es de 10 kV, conviene seleccionar un fusible de tensión $U_N = 12$ kV.

En el caso de la gama de los fusibles Fusarc-CF, es posible, por eventuales razones de estandarización, instalar un fusible de $U_N = 17,5$ kV y hasta de 24 kV.

Caso de utilización en una red monofásica

Los fusibles se diseñan normalmente para ser utilizados en una red trifásica. En este caso, la tensión de restablecimiento que se les aplica después del corte por cortocircuito, es igual a:

$$\frac{U_{Res}}{\sqrt{3}} \times 1,5$$

$U_N = 3,6 - 7,2 - 12 - 17,5 - 24 - 36$

Fig. 1: Relación de valores preferenciales (kV) fijada por los prescriptores.

El coeficiente 1,5 se debe al defasaje de los ceros de corriente, en una red trifásica, lo que origina un desplazamiento del punto neutro al producirse el corte del primer fusible.

Por tanto, en monofásica (**figura 2**), un fusible de tensión asignada U_N se prueba a:

$$U_N \times \frac{1,5}{\sqrt{3}} = 0,87 U_N$$

Así pues, en caso de utilización en una red monofásica de tensión U_{Res} , conviene seleccionar un fusible:

$$U_N \geq \frac{U_{Res}}{0,87}$$

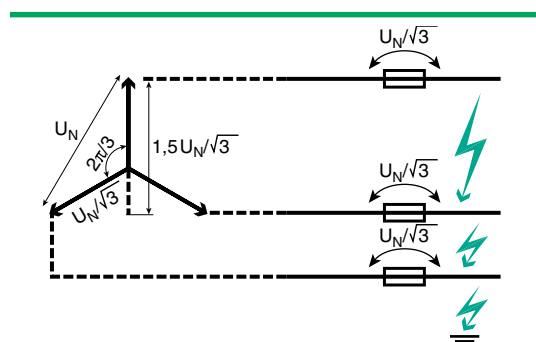


Fig. 2: Tensión en los bornes de un cortacircuitos en caso de defecto trifásico en una red con neutro aislado.

1.3 I_N corriente asignada

La corriente asignada, también seleccionada de una lista preferencial, es la que, circulando por un elemento de sustitución (cortacircuitos) instalado en una base dada, provoca calentamientos que no sobrepasan los valores normalizados (variables según la naturaleza de los materiales; alrededor de 65 K para los contactos). Hay que comprobar también que el conjunto del cortacircuitos sea capaz de soportar permanentemente esta corriente sin deteriorarse. Esta segunda exigencia es normalmente menos severa que la primera.

Conviene tener en cuenta que esta consideración, puramente térmica, se modifica en cuanto el elemento de sustitución se instala en condiciones diferentes. Es el caso de los fusibles instalados dentro de una envolvente y, en menor medida, cuando el cortacircuitos se monta en una base diferente de la utilizada para los ensayos. Según el montaje y el entorno del elemento de sustitución, a la corriente asignada, característica verificada por los constructores de fusibles, debe aplicársele un coeficiente corrector, y siempre cuando la temperatura de su entorno pase de 40 °C.

1.4 I_3 corriente mínima de corte

La corriente I_3 es un valor límite a respetar para que la fusión de un fusible provoque con toda certeza la apertura del circuito eléctrico.

Contrariamente a una opinión muy extendida, no basta, para un cortocircuito MT, que un fusible funda para que se interrumpa la corriente. Para valores de corriente inferiores a

I_3 el fusible funda, pero no puede cortar: el arco se mantiene hasta que una intervención exterior interrumpe la corriente. Por tanto está absolutamente contraindicado solicitar un cortacircuitos en la zona comprendida entre I_N e I_3 . Los valores usuales de I_3 están comprendidos entre 2 y 6 I_N .

1.5 I_2 corriente que da unas condiciones próximas a la energía máxima de arco

Este valor de corriente, determinado a partir de las características de fusión del cortacircuitos, da un tiempo de prearco de unos 5 ms. Permite, tanto en los procesos de ensayo como de fabricación, garantizar el corte para toda la zona de corriente comprendida entre I_3 e I_1 .

El valor de I_2 , que depende del diseño de los elementos fusibles, se sitúa aproximadamente entre 50 y 100 I_N .

1.6 I_1 ó poder de corte máximo

■ Es la corriente de defecto máxima prevista que el fusible puede interrumpir. Este valor es el valor máximo con el que se ha probado el elemento de sustitución. Por tanto, es necesario asegurar que la corriente de cortocircuito de la red sea como máximo igual a la corriente I_1 del fusible seleccionado. La corriente I_1 es muy elevada: de 20 kA a 50 kA, e incluso más.

■ Cuando se produce una corriente de cortocircuito, el elemento fusible funde en algunos milisegundos. Inmediatamente, aparece una tensión de arco que, opuesta a la del generador y superior a ésta, tiende a reducir el valor de la corriente. El fusible se comporta como una resistencia variable que, de casi nula antes de la fusión, aumenta hasta el cero de corriente, provocando una modificación simultánea del valor de la corriente y el desfase entre esta última y la tensión del generador (figura 3).

De este proceso se deducen dos nociones:

- la tensión de arco máxima U_p o tensión de corte, que es importante minimizar,
- la corriente I_p , que es el valor instantáneo de la corriente de cortocircuito que atraviesa realmente el cortacircuitos.

I_p , llamada corriente cortada limitada es frecuentemente menor que I_1 , que se llama corriente presunta, porque nunca llega a observarse aguas abajo del fusible. U_p e I_p son dos parámetros asociados porque se obtiene fácilmente una I_p pequeña con una U_p grande.

La coexistencia de una I_p baja (limitación de los sobreesfuerzos aguas abajo de los fusibles) y de una U_p también baja (a costa de utilizar una tensión U_{Res} baja respecto a U_N) son pues signos de un buen hacer en el diseño de los fusibles MT.

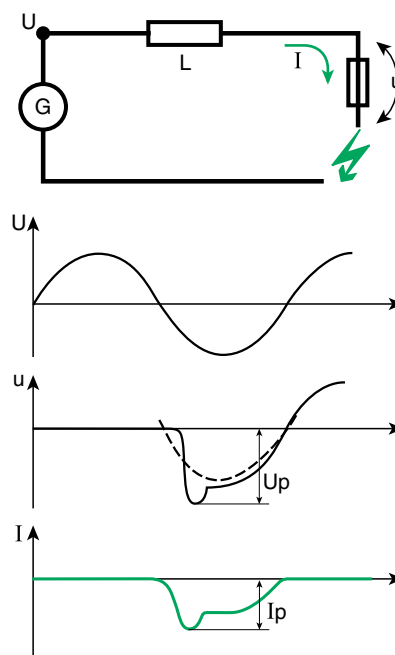


Fig. 3: Diagramas de un corte con I_1 .

1.7 Características tiempo-corriente

Para cada valor eficaz de corriente corresponde, para cada tipo de elemento de sustitución, un tiempo de fusión o de prearco.

Una curva trazada en una escala logarítmica normalizada, permite encontrar el tiempo de prearco para cada valor de corriente (**figura 4**).

Esta curva sólo se refiere al prearco. Por tanto, es necesario añadir el tiempo de arco (de 5 a 50 ms típicamente) para obtener el tiempo de funcionamiento total. Por otra parte, hay que mencionar los tiempos de prearco para corrientes inferiores a I_3 . En este caso, la curva se dibuja con trazo discontinuo. Así es posible encontrar en este diagrama el valor de I_3 (límite de trazo continuo).

Esta curva, que se prolonga hasta alcanzar un tiempo de prearco de 600 s, se da con una tolerancia de $\pm 10\%$ del valor de la corriente.

De manera convencional, esta curva representa una duración virtual de prearco dada por el valor de la integral de Joule dividido por el cuadrado del valor eficaz de la corriente presunta I_{ef} .

$$t_v = \frac{I^2 dt}{I_{ef\text{ prevista}}^2}$$

Esta duración es próxima al tiempo de prearco que se obtendría con una corriente continua de valor I_{ef} (**figura 5**).

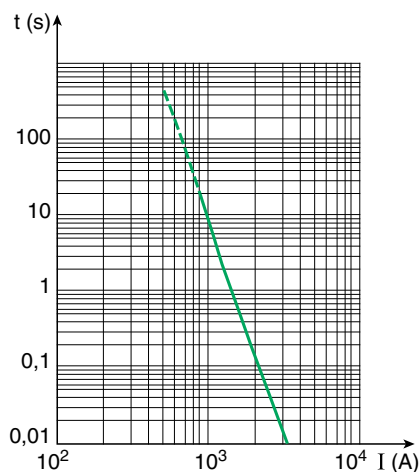


Fig. 4: Duración de prearco en función del valor eficaz de la corriente.

En corriente alterna, estas curvas hay que utilizarlas con precaución. En una zona comprendida entre 0 y 0,1 s, para una corriente dada, los tiempos de prearco pueden variar en una razón de 1 a 3, según la frecuencia, el $\cos \varphi$ del circuito y el instante de establecimiento del cortocircuito.

Como ejemplo, la **figura 6** representa los tiempos real (a) y virtual (b) de prearco de un Fusarc-CF-25 A en un circuito de $\cos \varphi = 0,1$ para diversos ángulos de establecimiento de un cortocircuito de 500 A.

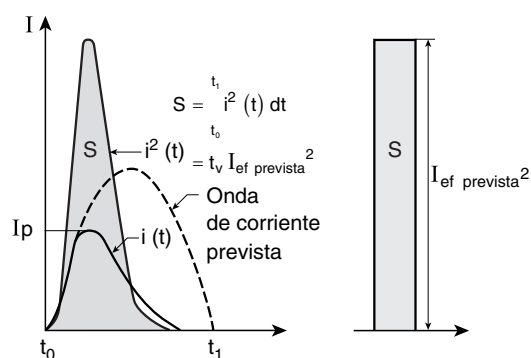


Fig. 5: Curva que representa la duración virtual de prearco.

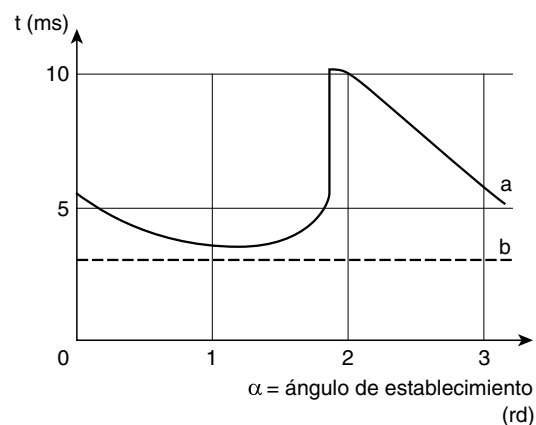


Fig. 6: Duración (a) real y (b) virtual de prearco de un Fusarc-CF - 25 A (Merlin Gerin).

1.8 La corriente cortada limitada

Esta curva, que es un complemento indispensable de la característica tiempo-corriente, permite, para valores de corriente próximos a I_1 en los que la corriente de

cortocircuito está limitada, determinar el valor I_p de corriente limitada en función de la corriente presunta (figura 7).

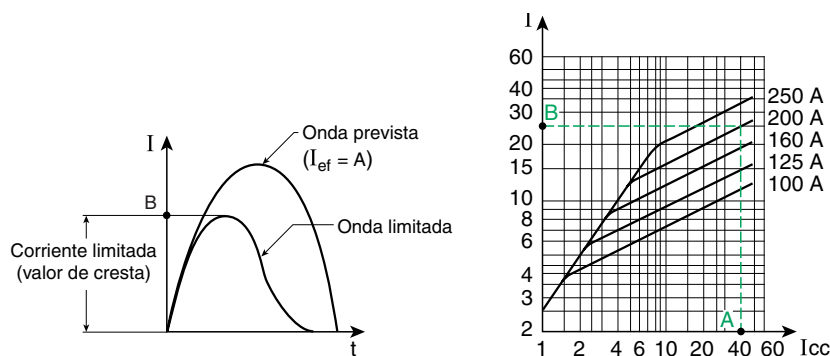


Fig. 7: Valor I_p de la corriente limitada en función de la corriente presunta.

1.9 La energía disipada

En el caso de cortocircuito, la amplitud de la corriente limitada depende de las características constructivas del cortacircuitos,

y el valor de la integral $\int I^2 dt$ permite determinar la energía disipada en el circuito aguas abajo, y también calcular su dimensionamiento.

1.10 La potencia disipada

Cuando un elemento de sustitución es recorrido por su corriente asignada, disipa una cierta potencia.

Este dato se utiliza frecuentemente para dimensionar las envolventes destinadas a contener la aparatura. Pero este valor, desgraciadamente, depende mucho de la envolvente misma y de su ventilación. En efecto, la potencia disipada por el fusible es función de la resistencia de los elementos fusibles, resistencia que a su vez depende de su temperatura, temperatura que a su vez depende de las condiciones de refrigeración de la envolvente.

La potencia disipada por un cortacircuitos, como la corriente asignada I_N , se dan para una determinada configuración térmica.

A título de ejemplo, la potencia disipada en condiciones normalizadas (elemento de sustitución vertical al aire libre) para los Fusarc-CF es del orden de $1,7 \times R \times I_N^2$ siendo:

R = resistencia en frío (ver anexo 1),

1,7 = coeficiente que depende de la refrigeración; puede llegar a 2 ó a 3, ó incluso más para un fusible instalado en un armario cerrado.

2 Constitución de un elemento de sustitución

A partir del ejemplo de un elemento Fusarc-CF, un examen de las diferentes piezas que lo constituyen (**figura 8**) y de los esfuerzos que se

le aplican, permitirá ver los criterios de elección que se ofrecen al constructor.

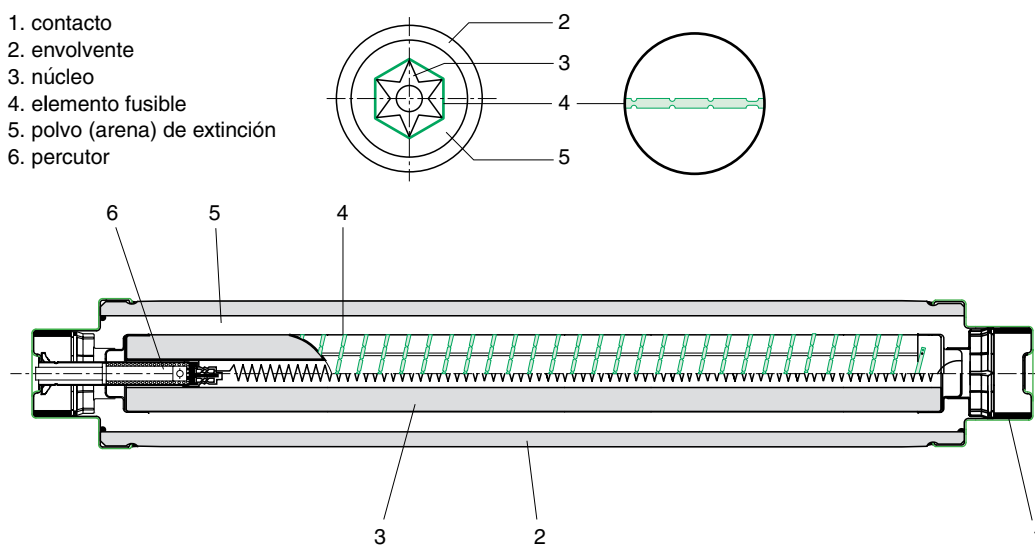


Fig. 8: Cortes esquemáticos de un elemento de sustitución.

2.1 Los casquillos de los extremos

Cumplen dos funciones:

- obturador,
- contacto eléctrico con el soporte.

Obturador

Unidos a la envoltente, forman una unidad que debe de dar cabida a los elementos fusibles del cortacircuitos antes, durante y después del corte.

Esto supone un doble esfuerzo, mecánico y de estanqueidad, que se aplica a la envoltente, a los casquillos, y a la substancia de sellado que los une:

- mecánico, al cortar las corrientes I_1 e I_2 , que es cuando se genera una energía considerable al desarrollarse el arco, produciéndose sobrepresiones que pueden valorarse en decenas de bares,

- de estanqueidad, supuestas unas determinadas condiciones de pureza de la arena y ausencia de humedad.

Contacto

Los casquillos aseguran también el paso de la corriente, tanto la corriente asignada en servicio continuo como la corriente de defecto, entre el elemento de sustitución y su base.

Tradicionalmente, en la fabricación de equipos eléctricos, los tratamientos de superficie que se aplican a las piezas conductoras, como los casquillos, se escogen para minimizar las resistencias de contacto, principales fuentes de calentamiento.

Así, se ha generalizado el uso de estaño o de plata. El níquel se ha utilizado a veces, pero teniendo en cuenta su resistencia de contacto, muchos fabricantes lo han abandonado.

El caso de los cortacircuitos es un caso extremo en este aspecto. En efecto, el elemento generador de calor no es el contacto, sino el propio elemento fusible. El conjunto de curvas de la **figura 9** indica la influencia de las dos resistencias de contacto en la resistencia total. Se ve claramente que para pequeños calibres, la parte correspondiente a estas resistencias es extremadamente baja. Esta última se podría doblar y hasta multiplicar por diez sin por ello modificar el comportamiento térmico del conjunto.

En este caso resulta aconsejable recubrir los casquillos con níquel, porque así puede uno beneficiarse de las especiales características de este metal (estabilidad química frente a la corrosión) sin empeorar el sistema eléctrico.

La utilización de un revestimiento de plata es un compromiso aceptable para grandes calibres, destinados a utilizarse en instalaciones más sofisticadas cuyo ambiente está protegido de los agentes externos.

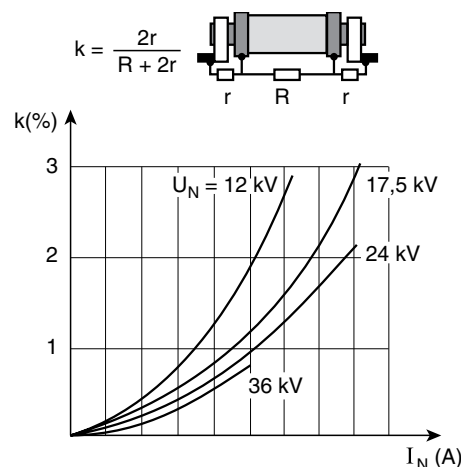


Fig. 9: Resistencias de contacto.

2.2 La envolvente cilíndrica

La envolvente cilíndrica debe de soportar, además de los sobreesfuerzos de presión y estanqueidad citados, otras exigencias específicas de orden térmico, dieléctrico y mecánico.

Tensiones térmicas

Además de la resistencia en régimen continuo con I_N , es necesario que la envolvente soporte calentamientos muy rápidos al producirse un corte con I_2 ó muy lentos cuando se produce una fusión con valores próximos a I_3 .

Tensiones dieléctricas

La envolvente cilíndrica, una vez el fusible ha cortado la corriente, debe de soportar la tensión de restablecimiento. Todos los materiales utilizados en la construcción de los fusibles, soportan con facilidad esta tensión, no muy severa, debido a las dimensiones de los fusibles y al lapso de tiempo durante el que se aplica la tensión.

Este lapso de tiempo, generalmente muy corto, de algunas decenas de milisegundos, cuando

la apertura de un aparato de corte está originada por el percutor del fusible; en ciertas configuraciones, excede rara vez algunas horas. Por ejemplo, cuando se utiliza un fusible en una red de distribución pública sin estar asociado a un aparato de corte: en este caso es necesaria una intervención exterior para interrumpir la alimentación de las fases que quedan en servicio.

Tensiones mecánicas

Un elemento de sustitución debe resistir a la vez:

- a la presión interna, brutal, provocada por el gas después del corte a I_2 ,
- a la subida lenta de presión provocada por la dilatación de la arena, durante el corte de I_3 ,
- y a los posibles golpes aplicados a su envolvente durante el transporte y distribución logística.

Actualmente los constructores utilizan dos tipos de envolventes: de porcelana y, más recientemente, de resina con fibra de vidrio.

■ La porcelana posee excelentes características térmicas y dieléctricas que han influido decisivamente en su elección inicial por parte de todos los constructores. Los problemas debidos a su fragilidad frente a los golpes o a su fragmentación después de soportar largas fusiones a I_3 han forzado a los constructores a buscar otros materiales de sustitución.

■ La resina cargada con fibra de vidrio es otro compromiso entre las diversas exigencias. Cabe destacar su resistencia a los choques, así como a las ondas de presión gracias a su elasticidad. Sus características térmicas, diferentes de las de la porcelana, pueden también explotarse y optimizarse. Su resistencia dieléctrica es más que suficiente.

□ a I_N , su pequeño espesor y su conductibilidad térmica permiten enfriar mejor el fusible, garantizando con ello un funcionamiento de los fusibles, a relativamente baja temperatura, lo que favorece la longevidad.

□ por encima de I_N , una sobreexigencia excesiva del cortocircuito produce un oscurecimiento del cuerpo, por oxidación superficial de la resina en contacto con el aire.

Este fenómeno, que no altera en nada las características mecánicas o eléctricas del cuerpo, está considerado como una cualidad. Es, en efecto, un revelador de defectos propios de la instalación (transformador demasiado cargado, o calibre de cortocircuito mal adaptado) que evita, a veces, graves accidentes.

La crítica más generalizada a este tipo de envolvente fue su inflamabilidad. Aunque justificada en parte al principio de su evolución, los ensayos han demostrado su excelente comportamiento, tanto durante la aplicación de los elementos calentados a 960 °C, como durante pruebas con llama (CEI 60695 y ASTM D 635-68).

2.3 El núcleo

Sirve de soporte sobre el que se bobina el elemento fusible, y la única utilidad es la de ser su soporte. Existen diferentes modelos de fusibles sin núcleo.

Con cerámica o materiales similares, el núcleo debe de asemejarse al máximo a la naturaleza del polvo o arena de extinción. Su forma es generalmente la de un cilindro rodeado de aletas (**figura 10**).

Colocado normalmente en el centro, el percutor, con su hilo de mando, queda así aislado de los elementos fusibles.

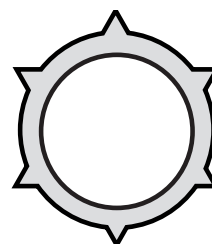


Fig. 10: Corte típico de un núcleo.

2.4 El elemento fusible

El corazón del cortacircuitos.

Los elementos fusibles pueden estar constituidos por hilos o por cintas con muescas puestas en paralelo, o incluso, una única lámina larga con muescas.

■ Los hilos, utilizados originariamente, tienen dos «defectos»:

□ producen sobretensiones de corte U_p extremadamente elevadas,

□ sus corrientes mínimas de corte I_3 son muy importantes.

De hecho, sólo se emplean en productos de muy baja calidad (algunos hasta podrían hasta no ser conformes con las normas internacionales).

■ Para resolver el problema de la sobretensión, se han utilizado zonas con estrechamientos o reducciones de sección, provocando así una fusión progresiva del elemento fusible. Tecnológicamente, se realiza con muescas o recortes de una cinta plana.

Las dos gráficas $I(t)$ presentadas en la **figura 11** muestran la influencia del paso y de la profundidad del dentado de las muescas. Esta curva puede predefinirse por cálculo en función de las características de la cinta y de las muescas. Algunos constructores fabrican también hilos de sección variable (**figura 12**). Puesto que los fenómenos que rigen su funcionamiento son similares, esta solución se asemeja a una cinta con muescas. Lo mismo sucede con láminas anchas (**figura 12c**) que se asemejan a varias cintas juntas.

El material

Para la construcción de estos elementos, la plata es el material preferido.

- Por un cierto número de razones físico-químicas, es el que asegura el corte más limpio.

- Su baja resistividad unida a su relativa estabilidad química lo han convertido en el material ideal para el tránsito de una corriente elevada sin riesgo de envejecimiento (temperatura de funcionamiento de una cinta: 180 a 250 °C).

Se han realizado numerosos estudios para sustituir la plata por ser demasiado costosa. Industrialmente han variado poco y parece difícil poder suprimir completamente la plata.

Las muescas

Son de una importancia capital para las características del fusible. Teniendo en cuenta la sección y la longitud de la cinta escogida:

- U_N dependerá del número de hendidura y de su penetración; hasta cierto límite, cuantas más haya, mayor será U_N ;

- para I_N , el efecto es rigurosamente inverso porque su resistencia crece;

- con I_1 e I_2 la profundidad y el paso o separación entre hendiduras tiene diversos efectos:

- Unas muescas profundas permitirán una fusión más rápida, por lo tanto, un efecto de limitación más pronunciada. En consecuencia, la envolvente tendrá que soportar un sobreesfuerzo de presión menor.

- Una disminución del paso entre muescas, lo que permite un aumento de U_N , aumentará también las sobretensiones U_s de corte. Al contrario, se tiende a disminuir la duración del arco.

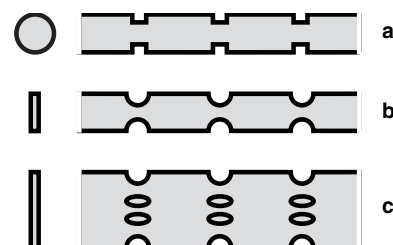


Fig. 12: Elementos fusibles de sección variable.

a. hilo

b. cinta

c. lámina.

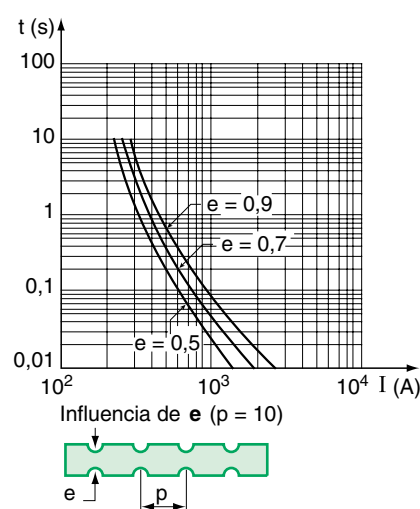
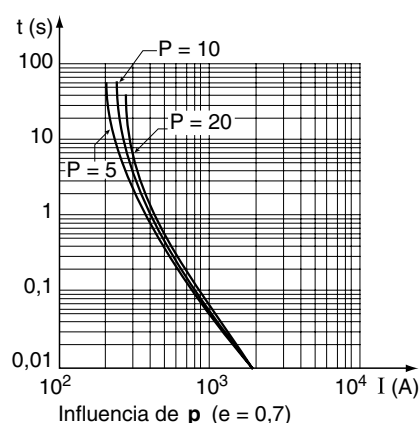


Fig. 11: Influencias del dentado de un elemento fusible.

■ con I_3 , pueden utilizarse diferentes tipos de muescas (**figura 13**):

□ Las muescas regularmente espaciadas permiten una fusión simultánea de todas las muescas, lo que origina un corte más rápido. En este caso, si una longitud total L de cinta con muescas sirve para interrumpir una corriente I_3 con una tensión U , una longitud total $2L$, de esta misma cinta, hará fundir simultáneamente el doble de muescas (y de ahí la duplicación de la tensión de arco) y permitirá interrumpir este mismo I_3 bajo $2U$.

Una gama en la que la longitud de la cinta diferencie los elementos de sustitución de la misma I_N y de U_N diferente, tendrá pues una corriente I_3 idéntica para todos los fusibles.

Por tanto, aplicando este principio básico se pueden hacer cortacircuitos de U_N elevada (36, e incluso 72 kV) conservando una I_3 baja.

□ Una zona central con muchas más hendiduras que el resto del elemento. En este caso la fusión queda localizada, y la longitud (por lo tanto, la tensión) de arco aumenta progresivamente hasta el corte. Cuando la duración de arco resulta demasiado larga, el aumento de la tensión de arco por alargamiento del mismo se compensa por la disminución de tensión de arco en medio de la cinta (zona en la que el arco se establece desde su inicio) aumentando el canal de arco. Pero esto afecta al límite de tipo de corte.

Con este principio, es fácil obtener una I_3 muy baja para U_N de 3,6 y 7,2 kV, pero este último se vuelve muy importante cuando U_N sobrepasa 12 kV, y la U_N máxima de esta gama no excede jamás los 24 kV.

□ Un sistema mixto con el que ciertos constructores han encontrado un óptimo.

Schneider Electric ha aplicado la tecnología de cinta con hendiduras, cuyo enfriamiento, mejor que el del hilo, permite obtener una corriente mínima de corte, I_3 , inferior.

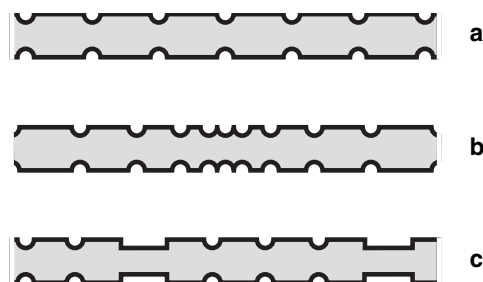


Fig. 13: Diferentes tipos de dentados:

- a.** regular
- b.** progresivo
- c.** mixto.

2.5 El polvo de extinción

Generalmente es de arena (de cuarzo) que, por su vitrificación, absorbe la gran energía que desarrolla el arco y forma con la plata un compuesto aislante, llamado «fulgurita». Para obtener unos buenos cortes en todas sus aplicaciones, es imprescindible una gran pureza, así como la ausencia de compuestos metálicos y de humedad.

Por otra parte, su cantidad inicial garantiza el mantenimiento de la presión (por tanto, de la tensión) del canal de arco.

Su granulometría se escoge en función de los siguientes datos, dictados por la experiencia:

■ un polvo demasiado fino ($<20 \mu$) es muy malo, puesto que los intersticios son muy pequeños, lo que frena la difusión del metal fundido entre los granos de arena, dificultando el alargamiento progresivo durante la extinción del arco;

■ un grano fino facilita el corte con I_1 e I_2 , pero en cambio, favorece la aparición de sobretensiones;

■ un grano grueso permite rebajar I_3 ;

Modificando la granulometría, es también posible aumentar la característica tiempo-corriente en la zona 10 ms, 500 ms.

2.6 El percutor

Se trata de un órgano mecánico que indica la fusión del cortacircuitos, y que es capaz de suministrar una cierta energía almacenada en un resorte para accionar un aparato de corte. Los fusibles así equipados se destinan a equipos con aparamenta combinada con los fusibles.

El órgano de mando del percutor es siempre un hilo resistente (tungsteno, Ni-Cr, etc.) puesto en paralelo con los elementos fusibles. Por debajo de I_N , es recorrido por una corriente despreciable. Pero, cuando atraviesa el cortacircuitos una sobreintensidad, esta corriente aumenta mucho, hasta hacer fundir el hilo y liberar el percutor que es empujado por un resorte. Hay que tener particular esmero en el diseño de los hilos que no deben provocar

un disparo intempestivo, pero que han de asegurarlo sin interferir con el proceso de corte.

Los tipos de percutores se clasifican, en función de la energía que pueden liberar, en varias categorías normalizadas (ligera, media y fuerte).

Las sobreintensidades de mucha duración pueden originar temperaturas peligrosas ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$ en los contactos) en los aparatos combinados y/o en los propios fusibles. Para suprimir este riesgo, recientes desarrollos han permitido incorporar en el sistema de un percutor tradicional (con resorte de tipo medio) un disparador térmico (figura 14). Este disparador trabaja también en el percutor que provoca el disparo del aparato.

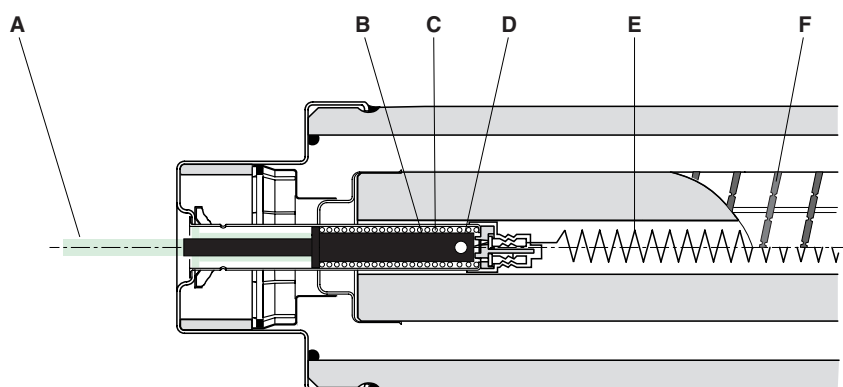


Fig. 14: Ejemplo de un disparador térmico incorporado al sistema de percutor de todos los fusibles de la marca Merlin Gerin.

- A. percutor salido
- B. percutor en reposo
- C. resorte
- D. disparador térmico del percutor
- E. disparador eléctrico del percutor
- F. elemento fusible principal

3 Utilización

En este capítulo se describen las reglas que fijan la elección del calibre del elemento de sustitución para un fusible utilizado en buenas condiciones de ventilación, reglas éstas que permiten establecer las tablas de utilización de una gama de fusibles.

El fusible puede utilizarse también, asociado o combinado con un aparato de conexión, para la protección de diversos receptores,

particularmente de transformadores, motores y condensadores. En estos conjuntos, el fusible y la aparamenta deben adaptarse el uno al otro. Para la elección del calibre del elemento de sustitución también hay que tener en cuenta, además de las condiciones de ventilación, las recomendaciones del fabricante del aparato combinado o asociado.

3.1 Generalidades

En el primer capítulo ya se han mencionado las reglas que hay que respetar, en lo que se refiere a U_N e I_1 . Estas características, propias de un fusible, deben ser respectivamente superiores o iguales a la tensión U_{Res} de la red y a su corriente de cortocircuito I_{cc} . Estas consideraciones elementales fijan las características de la instalación y descartan a veces ciertos tipos de fusibles.

Pero también hay que respetar otras reglas ligadas a las características propias del receptor

protegido. Éste es el objeto de los siguientes capítulos, en los que las reglas se refieren a fusibles que normalmente están al aire. Si los fusibles están encerrados en envoltentes con muy poca ventilación, conviene asegurarse de que, además de cumplir las reglas que se citarán más abajo, los calentamientos en régimen permanente no sobrepasen los valores normalizados y, si no es posible, desclasificar los elementos de sustitución.

3.2 Protección de transformadores

La norma CEI 60787 trata especialmente sobre los fusibles destinados a este uso. Este tipo de receptor obliga a que el elemento de sustitución cumpla con tres exigencias principales:

- soportar, sin fundirse intempestivamente, la cresta de corriente que acompaña la conexión de este receptor,
- soportar la corriente en servicio continuo y las eventuales sobrecargas,
- cortar las corrientes de defecto en los bornes del secundario del transformador.

Cresta de conexión

La conexión de un transformador provoca siempre un régimen transitorio, más o menos importante, según el instante de aplicación de la tensión y la inducción remanente del circuito magnético.

La asimetría y el valor de la corriente son máximas cuando la conexión se produce en un cero de tensión y cuando la inducción remanente en la misma fase es máxima.

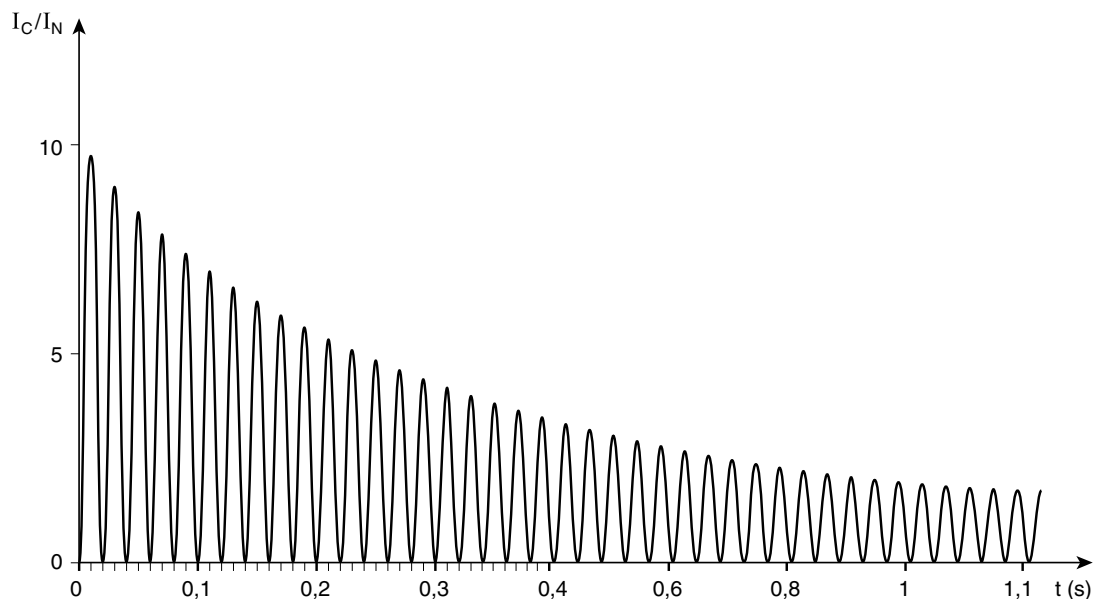


Fig. 15: Corriente de conexión o pico máximo de un transformador de 1000 kVA.

El registro de la **figura 15** muestra la gráfica de establecimiento de esta corriente.

Para la elección del cortacircuitos, hay que conocer el valor eficaz de la corriente de conexión y su duración. El valor eficaz de la corriente de régimen transitorio se expresa con la ecuación:

$$I_{ef}^2 = 0,125 I_C^2 \frac{\tau_a}{t} \left(1 - e^{-\frac{2t}{\tau_a}} \right)$$

con:

I_C = corriente máxima de cresta.

τ_a = constante de tiempo de la amortiguación de la corriente, en segundos (duración hasta que la corriente cae 37% de su valor inicial).

t = duración (en segundos) hasta que se estima que la corriente ha alcanzado su valor normal de explotación. Generalmente, se toma $t = 3 \tau_a$.

La tabla de la **figura 16** da los valores indicativos de I_C/I_N y de τ_a en función de la potencia de los transformadores para aparatos que cumplen las normas UTE C 52-100, C 52-112 y C 52-113.

Una regla práctica, simple y probada, que tiene en cuenta estas exigencias y que evita el envejecimiento del fusible durante su repetición, es verificar que la corriente que hace fundir el fusible en 0,1 s sea siempre superior o igual a 12 veces la corriente I_N del transformador.

Régimen permanente y de sobrecarga

Para no provocar un envejecimiento demasiado rápido de los elementos fusibles y teniendo en cuenta la instalación en celda (temperatura de aire ambiente más elevada), el calibre mínimo del fusible debe ser superior o igual a $1,4 I_N$ del transformador.

Este valor es aceptable con las condiciones normales de temperatura definidas por las recomendaciones CEI, o sea, con una temperatura ambiente que no exceda de $+ 40^\circ \text{C}$, y una media de un período de 24 horas, de $+ 35^\circ \text{C}$, como máximo.

P (kVA)	I_C/I_N	τ_a (s)
50	15	0,1
100	14	0,15
160	12	0,20
400	12	0,25
630	11	0,30
800	10	0,30
1000	10	0,35
1250	9	0,35
1600	9	0,40
2000	8	0,45

Fig. 16: Razón de la corriente de cresta máxima respecto a la corriente nominal de un transformador y valores de τ_a .

Si el transformador está previsto para poder funcionar con una sobrecarga permanente, la elección del calibre de los cortacircuitos debe también tenerlo en cuenta; de ahí la regla a aplicar:

$$1,4 I_{\text{sobrecarga}} \leq \text{calibre del cortacircuitos.}$$

Corriente de defecto en el secundario del transformador

En cualquier caso es conveniente asegurarse de que la corriente a interrumpir sea superior o igual a I_3 , corriente mínima de corte del fusible. Cuando no se ha previsto ningún relé de protección en el lado MT para detectar un cortocircuito en el secundario (lado BT) del transformador protegido, esta función debe de cumplirla el fusible.

La corriente de cortocircuito secundario, referida al primario, tiene estos valores:

$$I_N \text{ del transformador} / U_{cc} \%,$$

siendo $U_{cc} \% =$ tensión de cortocircuito (en %); la regla es:

$$I_N / U_{cc} \% \geq I_3$$

Las tres reglas que siguen permiten definir, para un fusible dado, la horquilla de los valores de I_N de los transformadores que el fusible puede proteger:

- $I_{\text{fusión}} (0,1 \text{ s}) > 12 I_N$ del transformador,
- $1,4 I_{\text{sobrecarga}} < \text{calibre del cortacircuitos},$
- $I_N / U_{cc} \% > I_3.$

La tabla de la **figura 17** deja muy claro que no existe relación directa entre la corriente asignada y la corriente de utilización. Este fenómeno es desconocido por muchos usuarios que no conocen del fusible más que su corriente asignada. En la práctica, ésta última, la corriente asignada, podría ignorarse y el elemento de sustitución caracterizarse sólo por I_A e I_B , aunque sabiendo que el límite I_A puede atravesarse si existe un relé de protección adaptado.

Calibre (A)	$I_{\text{mín}} \text{ fusión (A)} / 0,1 \text{ s}$	$I_{N\text{máx}} = I_{\text{mín}} (0,1) / 12$	$I_{N\text{máx}} = I_N \text{ fusión} / 1,4$	I_3	$I_{N\text{mín}} = I_3 \times 5\%$	I_N del transformador debe estar comprendida entre I_A e I_B	
4	14,3	1,1	2,8	20	1	1	1,1
6,3	29,9	2,4	4,5	36	1,8	1,8	2,4
10	59,2	4,9	7,1	34	1,7	1,7	4,9
16	84,7	7	11,4	46	2,3	2,3	7
20	103,8	8,6	14,2	55	2,7	2,7	8,6
25	155,5	12,9	17,8	79	3,9	3,9	12,9
31,5	207,5	17,2	22,5	101	5	5	17,2
40	278,5	23,2	28,5	135	6,7	6,7	23,2
50	401,7	33,4	35,7	180	9	9	33,4
50 (36 kV)	385	32	35,7	200	10	10	32
63	499,8	41,6	45	215	10,7	10,7	41,6
63 (36 kV)	489,6	40,8	45	250	12,5	12,5	40,8
80 (7,2-12 kV)	680	56,6	57,1	280	14	14	56,6
80 (17,5-24 kV)	694,6	57,8	57,1	330	16,5	16,5	57,1
100 (7,2-12 kV)	862	71,8	71,4	380	19	19	71,4
100 (17,5-24 kV)	862	71,8	71,4	450	22,5	22,5	71,4
125	1 666,1	138,8	89,2	650	32,5	32,5	89,2
160	2 453,4	204,4	114,2	1 000	50	50	114,8
200	3 256,3	271,3	142,8	1 400	70	70	142,8
250 (3,6 kV)	4 942,4	411,8	178,5	2 000	100	100	178,5
250 (7,2 kV)	4 942,4	411,8	178,5	2 200	110	110	178,5

Fig. 17: Tabla resumen de las posibilidades de la gama Fusarc-CF (Merlin Gerin), con una tensión de cortocircuito del 5%.

3.3 Protección de motores

Combinado con un contactor, el fusible permite realizar un dispositivo de protección particularmente eficaz para un motor MT.

Los esfuerzos específicos que deben de soportar los fusibles de protección de los motores vienen impuestos por el mismo motor o por la especificidad de la red sobre la que éste se encuentra. Por otra parte, un anexo específico para esta utilización (CEI 60644) completa la norma general de los fusibles limitadores MT (CEI 60282 -1).

Sobresfuerzos debidos al motor

■ En el arranque

En la **figura 18** se representa el diagrama de carga de un motor MT. Esta curva indica que, en su conexión, durante todo el tiempo de arranque, la impedancia de un motor es tal que consume una I_D muy superior a la corriente nominal en carga I_N .

Esta corriente I_D , denominada corriente de arranque o corriente con el rotor bloqueado, se cuantifica mediante la razón I_D/I_N , que es típicamente igual a 6 en el caso de arranque directo.

La duración t_D del arranque, del orden de una decena de segundos, depende del tipo de carga que arrastra el motor.

Además, dado que la corriente nominal permanente del motor es bastante elevada, el fusible debe de ser capaz de soportar este pico de corriente sin fusión intempestiva y de forma repetitiva. También hay que tener en cuenta la posibilidad de varios arranques sucesivos.

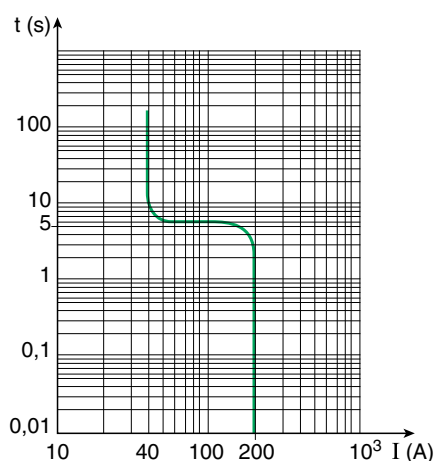


Fig. 18: Diagrama de carga de un motor MT.

■ En caso de sobrecarga

Un motor debe de estar siempre protegido por un relé que, en caso de sobrecarga excesiva, dé una orden de apertura al aparato de corte asociado. El fusible no está nunca destinado a interrumpir las corrientes bajas y el valor de su corriente I_3 tiene poca importancia.

Sobresfuerzos unidos a la red

■ Tensión asignada

Los motores MT tienen generalmente una tensión nominal igual, como mucho, a 11 kV. Por tanto, sólo nos referimos a los fusibles de $U_N \leq 12$ kV.

■ Corriente cortada limitada

Las redes con motores MT son generalmente redes industriales con gran potencia instalada. Por tanto, la corriente de cortocircuito es muy elevada (50 kA, por ejemplo).

Por otra parte, es frecuente que los motores se alimenten mediante cables de gran longitud. Su dimensionamiento no depende solamente de la corriente asignada, sino también de la corriente de cortocircuito que puede circular por ellos. Por tanto, se aprecia una gran limitación (baja I_p); es más, hasta se busca.

Determinación del elemento de sustitución

Aquí también, la característica tiempo-corriente determina el fusible a seleccionar. La utilización de ábacos permite escoger directamente el elemento de sustitución más adecuado.

■ Utilización de los ábacos

El ábaco presentado en la **figura 19** que permite escoger directamente un elemento Fusarc-CF consta de tres grupos de curvas.

□ El grupo **I** indica la corriente asignada del motor en función de su potencia, expresada en kW (1 CV = 0,7 kW), y de su tensión nominal.

Se suponen, con el motor cargado, un rendimiento η y un $\cos \varphi$ tales que:

$$\eta \times \cos \varphi = 0,86.$$

Cuando se conocen los valores exactos, es posible calcular I_N con ayuda de la fórmula siguiente:

$$I_N = \frac{P(\text{kW})}{U_N(\text{kV}) \times \sqrt{3} \times \eta \times \cos \varphi}$$

□ El grupo **II** da la corriente de arranque a partir de la corriente nominal y según la razón I_D/I_N .

Si no se tiene información, tomar $I_D/I_N = 6$.

□ El grupo **III** permite la determinación directa del calibre del elemento de sustitución a partir de la duración de arranque del motor (t_D) y de la corriente de arranque (I_D), en el caso de 6 arranques repartidos en 1 hora o de 2 arranques sucesivos.

Sin información, tomar $t_D = 10$ s.

■ Ejemplo práctico (figura 19)

Un motor de 1650 kW y de 16,6 kV (punto **A**) tiene una I_N de 167 A (punto **B**).

Con $I_D/I_N = 6$, I_D vale 1000 A (punto **C**).

Con $t_D = 10$ s, el resultado (punto **D**) se sitúa entre las curvas de los calibres es de 200 A y 250 A. El elemento de sustitución debe, pues, de tener un calibre de 250 A.

La duración de arranque debe ponderarse en los tres casos siguientes:

□ para **n** arranques repartidos en una hora, si $n \geq 6$: multiplicar t_D por $n/6$;

□ para **p** arranques sucesivos, si $p \geq 2$: multiplicar t_D por $p/2$;

□ para **n** arranques repartidos (con $n \geq 6$) y **p** arranques sucesivos (con $p \geq 2$) multiplicar t_D por $n/6$ y por $p/2$.

En el caso de que el arranque del motor no sea directo, es posible que el calibre determinado por los ábacos sea inferior a la corriente a plena

carga del motor. En este caso es necesario escoger un calibre superior a esta corriente.

En todos los casos, hay que tener en cuenta el emplazamiento del fusible y prever la desclasificación en función de la aireación de la celda (ejemplo: tomar un coeficiente de 1,2 para un emplazamiento normalmente aireado).

El rigor en la utilización de estos ábacos asegura la conformidad con las pruebas de envejecimiento de los fusibles según la norma CEI 60644.

■ Sin ábaco

Siempre es posible verificar la adecuación de un fusible a un motor. Para esto, es conveniente determinar los valores de corriente y de tiempo de arranque de motor. Aplicando a la corriente de arranque un factor multiplicador K , que varía de 1,8 a 2 según los constructores, se obtiene un punto (t_D , $K I_D$) que, trasladado a la característica tiempo-corriente, se debe situar a la izquierda de la curva del elemento de reemplazo a seleccionar.

El factor K cubre cierto número de sobreesfuerzos, entre los que están los arranques múltiples, incluidos los que se producen con los fusibles todavía calientes por un ciclo de trabajo anterior.

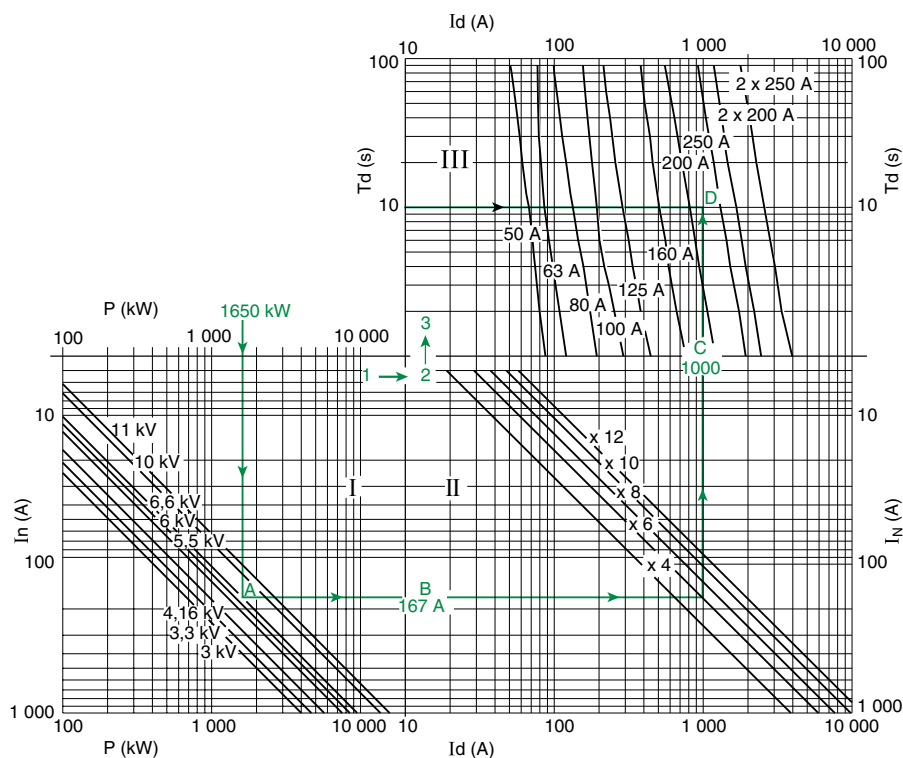


Fig. 19: Ábaco de las características tiempo-corriente de los fusibles de la gama Fusarc-CF (Merlin Gerin).

3.4 Protección de baterías de condensadores

Las precauciones especiales que se presentan en la protección de condensadores mediante fusibles, teniendo en cuenta la norma CEI 60549, son de dos tipos diferentes:

- al conectar una batería, la corriente de conexión es muy importante, y puede provocar el envejecimiento o la fusión de los fusibles,
- en situación de régimen, la existencia de armónicos puede provocar calentamientos excesivos.

Además, estos sobreesfuerzos varían según el tipo de configuración: batería única o batería fraccionada en escalones.

Calentamiento

En presencia de condensadores, debido a que los armónicos añaden un calentamiento suplementario, es regla general en toda la aparamenta la desclasificación, por reducción, en un 30 a 40% de la corriente asignada.

Los fusibles no escapan a esta regla que, acumulada con la desclasificación necesaria según la instalación, lleva a un 1,7 el coeficiente a aplicar a la corriente capacitativa para obtener el calibre apropiado del elemento de sustitución.

Pico de corriente de conexión

- Batería única de condensadores

Un circuito de este tipo puede representarse mediante el esquema de la **figura 20**, en el que:

L = autoinducción del generador,

R1 = resistencia del fusible (ver anexo 1),

R2 = resistencia del circuito aguas arriba, calculada en función de U_N , I_{cc} y $\cos \phi$.

En el momento de cerrar el arrancador D, la corriente transitoria I_T de la carga de C se establece, con $R = R1 + R2$, según la expresión:

$$I_T = \frac{V}{L \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} e^{-\frac{R}{2L}t} \times \sin \left(\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} t \right)$$

siendo V la tensión en A al instante del cierre.

Los órdenes de magnitud de L, R y C permiten despreciar los términos $R^2/4L^2$, de donde

$$I_T = V \sqrt{\frac{C}{L}} \times e^{-\frac{Rt}{2L}} \times \sin \frac{t}{\sqrt{LC}}$$

Esta corriente transitoria se superpone a la onda 50 Hz, lo que origina la forma de onda de corriente de la **figura 21**.

La corriente es máxima cuando V es igual a la cresta de tensión, o sea:

$$V = U \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Como con los transformadores, la elección de los fusibles puede ser validada considerando las razones entre la corriente de cresta y la nominal I_T/I_N , así como la constante de tiempo de disminución.

Así, con

$$U_N = \frac{U \times C\omega}{\sqrt{3}}, \text{ la razón } I_T/I_N \text{ se puede escribir:}$$

$$I_T / I_N = U \times \sqrt{\frac{2C}{3L}} \times \frac{\sqrt{3}}{UC\omega} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2}{LC}}$$

y

$$\tau_T = \frac{2L}{R}$$

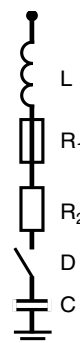


Fig. 20: Esquema de una batería única de condensadores.

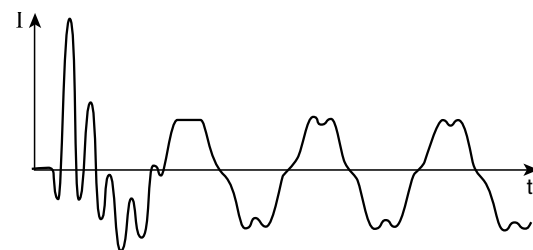


Fig. 21: Onda de corriente transitoria al conectar una batería de condensadores.

La experiencia ha probado que había que forzar la no-fusión del fusible para una corriente I_T durante τ_T .

Si éste no es el caso, hay que tomar el calibre superior, y calcular de nuevo I_T y τ_T para repetir la comprobación.

■ Ejemplo práctico para una batería única de condensadores:

$U_N = 10 \text{ kV}$

$I_N \text{ batería} = 35 \text{ A}$

$I_{cc} = 40 \text{ kA}$ ($\cos \varphi = 0,1$)

$C = 19,3 \times 10^{-6} \text{ F}$

Para el cálculo:

$L = 0,46 \times 10^{-3} \text{ H}$

$R_2 = 14,5 \times 10^{-3} \Omega$.

El calibre calculado según los criterios térmicos es:

$35 \times 1,7 = 60 \text{ A}$

de donde el calibre estándar seleccionado:

$I_N \text{ fusible} = 63 \text{ A}$.

En el anexo 1,

$R_1 = 13 \times 10^{-3} \Omega$ para un fusible 63 A / 12 kV, o sea, $R = 27,5 \times 10^{-3} \Omega$,

de donde $I = 1\,670 \text{ A}$ y $\tau_T = 33,5 \times 10^{-3} \text{ s}$.

Una comparación con las características tiempo-corriente (anexo 2, punto A) indica que habría que seleccionar un calibre de 125 A.

Entonces, $R_1 = 5 \times 10^{-3} \Omega$ y $R = 19,5 \times 10^{-3}$, de donde: $I_T = 1\,670 \text{ A}$ y $\tau_T = 47,2 \times 10^{-3} \text{ s}$.

Trasladando esto a las curvas, este punto (B) confirma la necesidad del calibre 125 A.

■ Batería de condensadores fraccionada en escalones (esquema de la figura 22).

Para la conexión de la batería de rango n, suponiendo las (n-1) otras baterías ya conectadas, se produce también el fenómeno de carga oscilatoria. Pero, en este caso, las otras baterías conectadas en paralelo se comportan como las fuentes suplementarias de impedancia interna muy baja. Estas impedancias internas (inductancia L_i en la figura 22) están constituidas por las autoinducciones parásitas de las barras y de los cables (orden de magnitud $0,4 \mu\text{H}/\text{metro}$) y por una posible bobina de choque, destinada a la limitación de la corriente de conexión. En efecto, esto último no es solamente peligroso para los elementos fusibles, sino que afecta también a la endurance eléctrica de la aparamenta de mando, e incluso a la duración de los mismos condensadores.

Puesto que la absorción de corriente que viene a través de L puede despreciarse, la corriente de conexión viene dada por la fórmula siguiente:

$$I = U \sqrt{\frac{2}{3} \times \frac{C_E}{L_E}} \times e^{\frac{R_E t}{2L_E}} \times \sin \frac{t}{\sqrt{C_E \times L_E}}$$

donde

$$C_E = \frac{C_n C_s}{C_n + C_s}, \text{ siendo } C_s = \sum_{i=1}^{n-1} C_i$$

$$L_E = L_n + L_s, \text{ siendo } L_s = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{L_i}$$

$$R_E = R + R_s, \text{ siendo } R_s = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{R_i}$$

Aunque similar al caso de la batería única, el cálculo es, aquí, algo más complicado.

Conviene:

□ seleccionar un elemento de sustitución según los criterios térmicos,

□ calcular $I_T = U \sqrt{\frac{2}{3} \times \frac{C_E}{L_E}}$

□ calcular $\tau_T = 2 \times \frac{L_E}{C_E}$

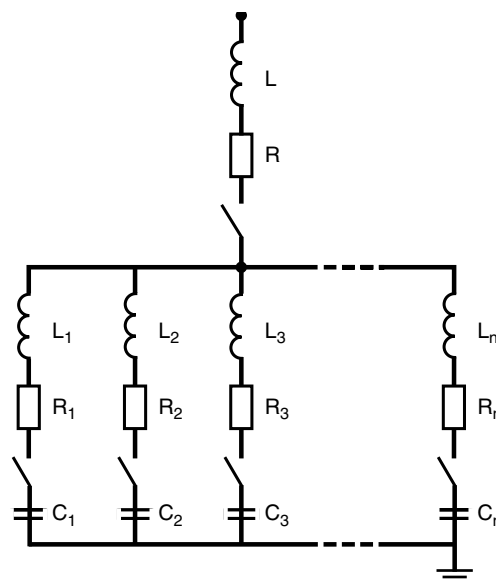


Fig. 22: Esquema de una batería de condensadores fraccionada en escalones.

- trasladar el punto (I_T , τ_T) sobre la característica tiempo-corriente,
- en caso de necesidad, seleccionar otro calibre, calcular el nuevo R_E y volver a empezar la verificación.

En el caso de que los escalones sean idénticos, basta un único cálculo. En caso contrario, conviene examinar varios tipos de esquemas, en función del modo de explotación de la batería.

- Ejemplo práctico para una batería de condensadores en escalones:

3 baterías:

$$U_N = 10 \text{ kV}$$

$$I_N \text{ batería} = 35 \text{ A}$$

$$I_{cc} = 40 \text{ kA} (\cos \varphi = 0,1)$$

$$\text{Cables} = 5 \text{ m, siendo } L_i = 2 \mu\text{H.}$$

Al cerrar el tercer escalón:

$$C_i = 19,3 \times 10^{-6} \text{ F y } L_s = 1 \mu\text{H}$$

$$R_i = 5 \times 10^{-3} \Omega \text{ y } R_s = 2,5 \times 10^{-3} \Omega.$$

De donde:

$$C_E = 12,9 \mu\text{F}$$

$$L_E = 3 \times 10^{-6} \text{ H}$$

$$R_E = 7,5 \times 10^{-3} \Omega$$

$$I_T = 16\,900 \text{ A}$$

$$\tau_T = 0,8 \times 10^{-3} \text{ s}$$

Las características tiempo-corriente no precisan nada para tiempos de prearco inferiores al milisegundo. Se puede pensar, en esta zona, con $I^2 t$ constante. Es lo que se obtiene tomando como valor mínimo de corriente de cortacircuitos 125 A (definida en el ejemplo precedente):

I_N fusible	$I^2 t$ fusión
125 A	$64 \times 10^3 \text{ A}^2 \text{ s}$
160 A	$76 \times 10^3 \text{ A}^2 \text{ s}$
200 A	$140 \times 10^3 \text{ A}^2 \text{ s}$

El sobrefuerzo aplicado al cortacircuitos de calibre 125 A es de:

$$0,8 \times 10^{-3} \times (16\,900)^2 = 228 \times 10^3 \text{ A}^2 \text{ s, lo que, incluso con el de 200 A, no es conveniente.}$$

Una batería de este tipo no puede estar protegida de esta manera con los Fusarc-CF.

En ciertos casos de imposibilidad, existe una solución que consiste en proteger el conjunto de las tres baterías mediante un único fusible común (**figura 23**).

Con un esquema de este tipo, hay que analizar dos casos:

- es imposible conectar las tres baterías simultáneamente.

En este caso, para el fusible, cada conexión es vista como la conexión de una batería única. Un fusible de calibre 125 A puede soportar la corriente de conexión (ver el ejemplo del caso precedente).

El sobrefuerzo principal es, por tanto, el sobrefuerzo térmico que produce una corriente asignada de $3 \times 35 \times 1,7 = 179 \text{ A}$, o sea, $I_N \text{ fusible} = 200 \text{ A}$.

- es posible conectar las tres baterías simultáneamente.

La red pasa a ser equivalente a una única batería de potencia triple, de donde:

$$L = 0,46 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$C = 57,9 \times 10^{-6} \text{ F}$$

$$I_T = 2\,900 \text{ A}$$

Tomando un fusible de calibre 200 A,

$$(R_1 = 2,5 \times 10^{-3} \Omega) \text{ siendo } R_2 = 14,5 \times 10^{-3} \Omega \text{ (caso precedente), } \tau_T = 54 \times 10^{-3} \text{ s.}$$

El punto **C**, anexo 2, indica que el de 200 A es completamente válido.

En este caso, es paradójicamente posible proteger globalmente las tres baterías mediante un único fusible cuando una protección individual resulta inviable.

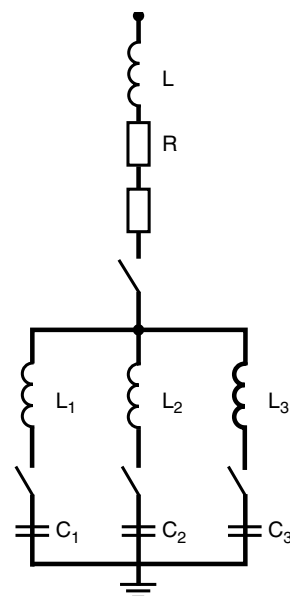


Fig. 23: Esquema de una batería de condensadores con tres escalones, protegidas por un único fusible.

3.5 Síntesis

El cuadro de la **figura 24**, presenta una síntesis de las necesidades de los distintos tipos de fusibles en función de los receptores.

Estas especificaciones permiten trazar la característica tiempo-corriente ideal de un fusible en función de su utilización (**figura 25**).

En esta figura aparecen claramente dos exigencias contradictorias según el tipo de receptor protegido. Muestra también, de manera evidente, la poca significación del valor I_N de un fusible, cuando sólo se tiene en cuenta este criterio de selección, lo que suele suceder, desgraciadamente, con mucha frecuencia.

■ Para los transformadores

La evolución de las normas, que tienden a normalizar el aspecto de la característica tiempo-corriente, permitirá probablemente en el futuro al usuario olvidar las reglas de selección en el caso de transformadores, para no aplicar como criterio más que la corriente asignada del transformador.

La publicación, por cada constructor, de los límites IA e IB de utilización de cada uno de los

elementos de sustitución de su gama de fusibles sería desde ahora un notable avance.

■ Para los motores

El caso es desgraciadamente diferente, puesto que la potencia del receptor no es la única característica necesaria para la determinación del elemento de reemplazo adecuado.

Aunque las normas indican los criterios a respetar y preguntan a los fabricantes las indicaciones precisas (factor K, característica tiempo-corriente), el usuario debe todavía hacer, él mismo, la selección de los fusibles en función del motor a proteger, consultando los datos (ábacos, tablas) proporcionados por los fabricantes de fusibles.

■ Para los condensadores

Está demostrado que la elección de los fusibles es todavía mucho más delicada, porque hay que asociar la geometría de la red y las características del fusible. Sin la resistencia del fusible, es muy difícil hacer una elección técnicamente correcta.

Tipo de receptor	Transformador	Motor	Condensadores	
			Batería única	Batería con escalones
Orden de magnitud del calibre de los fusibles	4 a 100 A	100 a 250 A	100 a 250 A	
Reglas de selección	$I_A < I_N \text{ trafo} < I_B$	Fijado por I_p e t_p $I_N \text{ motor} \times 1,2$	$I_N \text{ batería} \times 1,7 < I_N \text{ fusible}$ I_{NCC} fijada por i , t	
I_p	Sin especificación	Bajo		Elevada ($\tau \approx 1 \text{ ms}$)
I fusión 0,1 s	Elevada	Sin especificación	Elevada ($\tau \approx 0,1 \text{ s}$)	Sin especificación
I fusión 10 s	Baja con una protección próxima	Elevado	Baja para una protección próxima	
I_3		Sin especificación		
U_N	0 a 36 kV	0 a 12 kV	0 a 36 kV	

Fig. 24: Tipos de fusibles en función de los receptores a proteger.

En conclusión

La utilización de fusibles limitadores MT necesita un profundo conocimiento de los productos. Por esto los usuarios deben de consultar las indicaciones necesarias que proporcionan los fabricantes, como Schneider Electric.

Asimismo, durante el diseño de una gama de fusibles, es importante que el constructor tenga en cuenta los sobrefuerzos que deberán sufrir cada uno de los distintos elementos de

sustitución. Es lo que se ha hecho, por ejemplo, en la definición de los diferentes elementos de la gama Fusarc-CF: los sobrefuerzos esquematizados en la **figura 25** han llevado al reagrupamiento de los calibres; hasta 125 A, los fusibles son de tipo «transformador» o «condensador»; los fusibles de calibres superiores están más orientados hacia la protección de motores. Así una única gama cubre la casi totalidad de las necesidades con una protección, siempre óptima, del receptor.

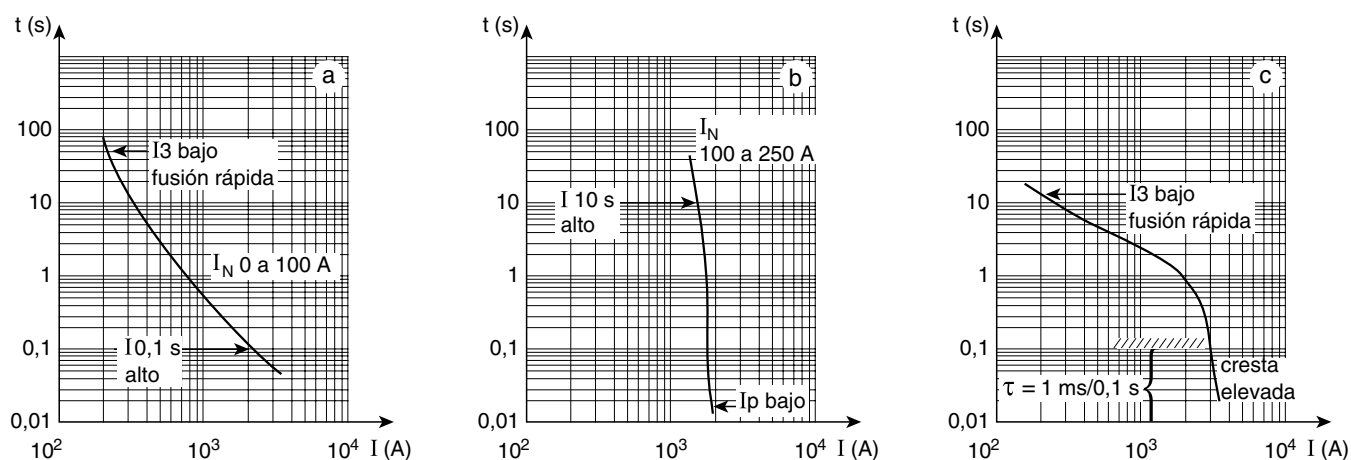


Fig. 25: Características tiempo-corriente ideales para proteger:

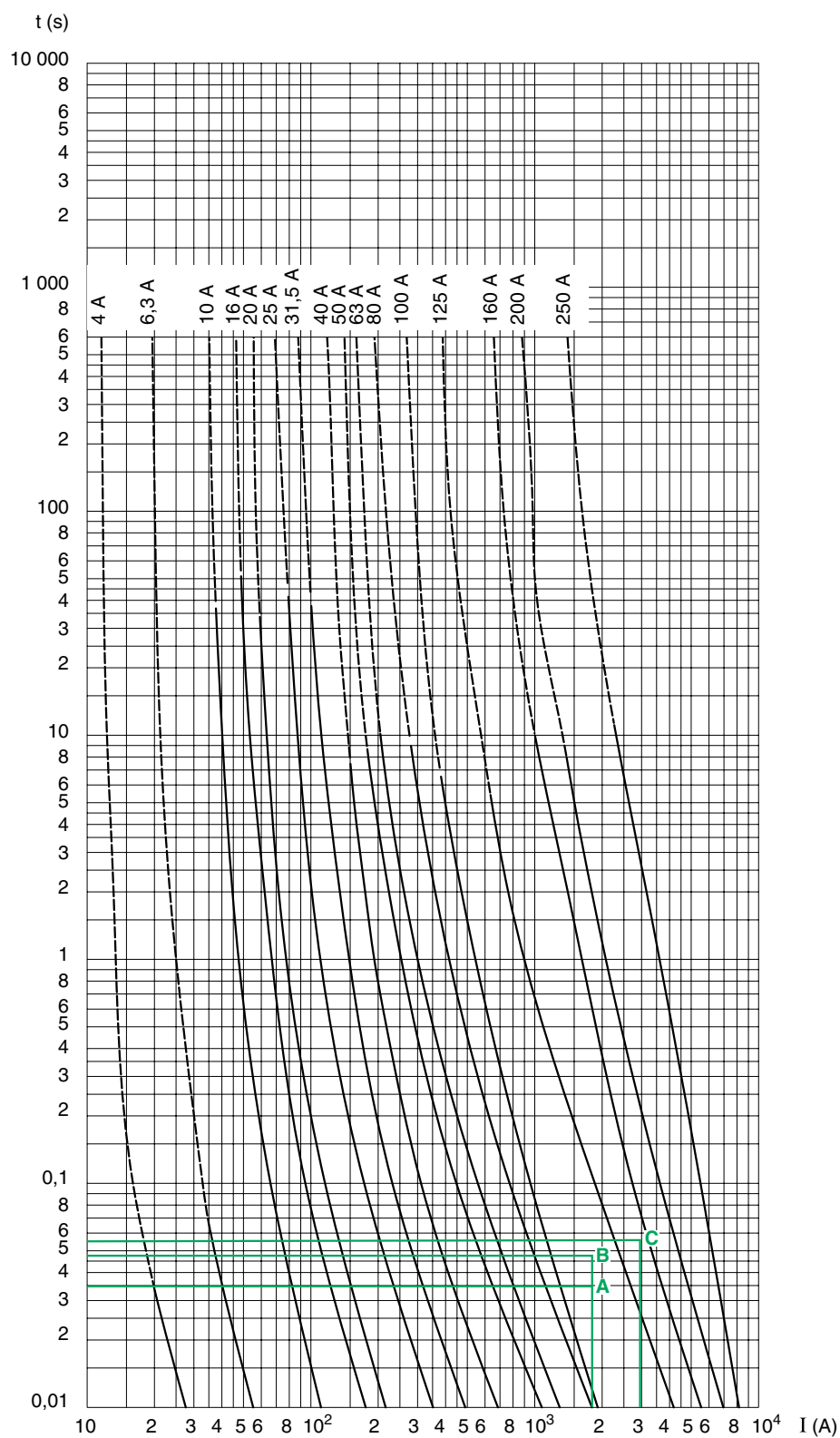
- a) un transformador,
- b) un motor,
- c) un condensador.

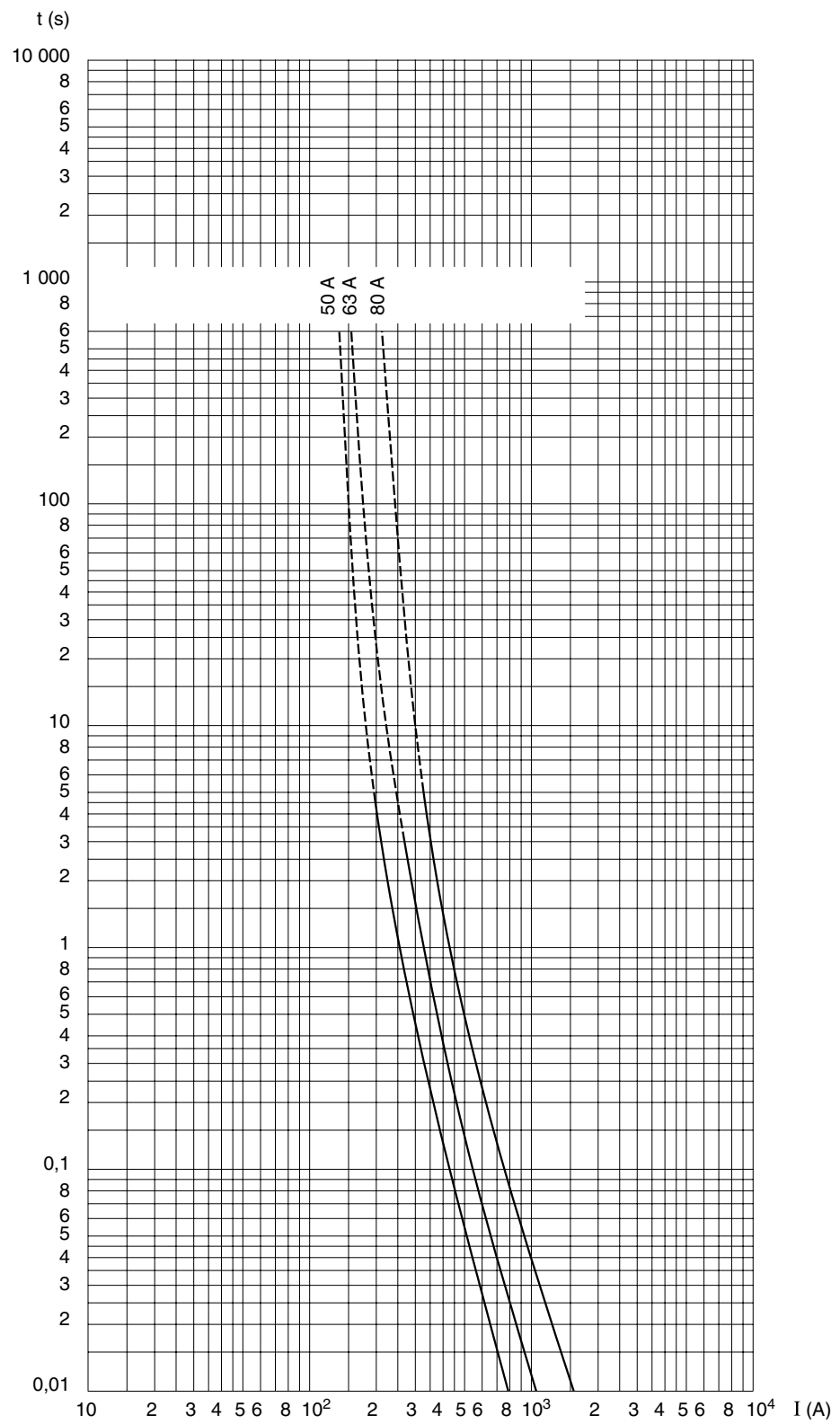
4 Anexos

4.1 Anexo 1: Resistencia en frío de los fusibles Fusarc-CF

Calibre	3,6 kV	7,2 kV	12 kV	17,5 kV	24 kV	36 kV
4 A		762	1 143	1 436	1 436	2 109
6,3 A		205	319	402	485	750
10 A		102	158	203	248	380
16 A		68,5	106	132	158	252
20 A		53,5	82	103	123	197
25 A		36,4	56	71	85	133
31,5 A		26	40	51	61	103
40 A		18	28	35	42	70
50 A		11,7	17,4	22	31,5	47
63 A		8,4	13,8	19,4	23,6	35
80 A		6,4	10	13,5	18	
100 A		5,5	8	11	13,5	
125 A		3,4	5,3			
160 A		2,2	3,5			
200 A		1,8	2,7			
250 A	0,6	0,9				

4.2 Anexo 2: Características tiempo-corriente de la gama de fusibles Fusarc-CF





4.3 Anexo 3: Utilización de fusibles en paralelo

■ El problema

En ciertos casos extremos, es necesario poner dos o varios elementos de sustitución en paralelo.

En este caso es obligatorio asegurar la simetría más perfecta posible, para que ningún efecto secundario comprometa la igualdad del reparto de la corriente entre los dos elementos.

Cuando esto es posible, para solucionar las diferencias entre elementos, se recomienda poner en serie, con cada uno de los fusibles, una impedancia (cable por ejemplo) de valor calibrado y superior a la del cortacircuito.

Otra técnica consiste en utilizar dos transformadores de corriente (cuya la precisión es poco importante puesto que no se utilizan para medida) conectando sus secundarios en serie, según el esquema de la **figura 26**.

El equilibrado de la corriente queda así asegurado para I_N . Más allá de este valor, ya no se considera por la saturación de los transformadores.

En todos los casos, este tipo de montaje sólo se puede hacer con elementos de sustitución del mismo calibre y con el acuerdo del constructor.

■ Las características eléctricas de un conjunto de n elementos de sustitución idénticos en paralelo.

□ U_N : la tensión asignada U_N del conjunto es la de cada uno de los elementos.

□ I_N : en teoría, la corriente nominal I_N del conjunto es la de los componentes multiplicada por n . En la práctica, teniendo en

cuenta la proximidad de los elementos y la imperfección del reparto de la corriente, se aplica una desclasificación de 20% a la corriente asignada del conjunto.

Por ejemplo, un montaje de dos elementos de 200 A, puestos en paralelo, tendrá una I_N de: $2 \times 200 \times 0,8 = 320$ A.

□ I_1 : si en teoría la puesta en paralelo de n elementos debería permitir multiplicar por n la I_1 del conjunto (cada elemento sólo estaría recorrido por I_N/n), en realidad el cálculo es extremadamente peligroso, porque la más mínima debilidad de un único elemento condiciona el funcionamiento del conjunto.

La seguridad obliga pues a conservar, para el conjunto, la I_1 de los elementos que la constituyen.

□ I_3 : para tiempos de fusión correspondientes a I_3 , es virtualmente imposible conseguir la simultaneidad de fusión de los elementos: ¡cada elemento corta a su gusto!

Por esto se suele decir que la I_3 del conjunto es la de cada uno de los elementos tomados individualmente. En este caso, no hay que perder de vista que los tiempos de prearco son mucho más largos que los de los elementos tomados separadamente. Las condiciones térmicas de inicio de arco son pues claramente diferentes. Sólo mediante ensayos se puede verificar que el corte será todavía efectivo.

■ En la práctica

En resumen, la I_3 de un conjunto formado por n elementos de sustitución en paralelo, cuya I_3 individual es de I_{30} , puede valer I_{30} . En ausencia de ensayos o de compromiso del constructor, se ha de tomar $n I_{30}$.

□ Características tiempo-corriente: si un elemento funde en 1 segundo para una corriente I , n elementos fundirán en 1 segundo para una corriente $n I$. La característica tiempo-corriente del conjunto será pues paralela a la de los elementos sueltos, decalada por un factor multiplicador en la escala de las corrientes.

La tolerancia en I de la característica $I(t)$ de un fusible es de $\pm 10\%$. Al conectarlos en paralelo, toda disimetría tenderá a disminuir la duración de prearco respecto a la curva teórica.

En efecto, cada elemento ya no está recorrido exactamente por I/n , sino que el que de entre ellos esté recorrido por $I/n + \epsilon$, fundirá antes. En consecuencia, los otros elementos de sustitución, fundirán muy poco tiempo después.

Es pues prudente añadir una tolerancia (+10%, -20 %), en la característica tiempo-corriente de semejante conjunto.

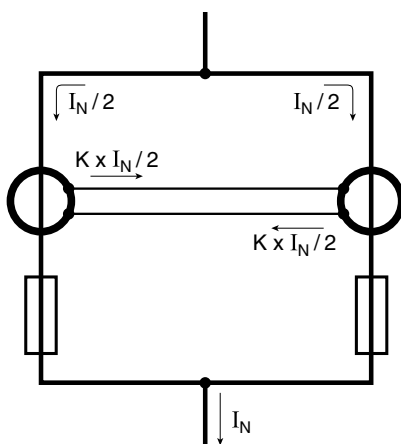


Fig. 26: Equilibrio con transformadores de corriente.

□ Amplitud de la corriente cortada limitada (figura 27).

Hay que considerar que cada elemento es recorrido por I_{cc}/n .

Si un elemento limita entonces a I_{po} , el conjunto limita a $n I_{po}$.

■ Ejemplo

Sean dos elementos de calibre 200 A, con una corriente de cortocircuito I_{cc} de 50 kA

$I_{po} = I$ limitada; si $I_{cc} = 25$ kA se tiene 22 kA de cresta (punto A).

El conjunto limita, por tanto, a $2 \times 22 = 44$ kA (punto B).

■ Utilización

Partiendo de las características tiempo-corriente, las reglas de utilización son las mismas que para los cortacircuitos individuales.

Conviene además:

□ no olvidar la desclasificación de I_N en un 20%.

□ no utilizar demasiado el conjunto en sus límites superiores, sobre todo si la simetría no es perfecta (respecto a la tolerancia -20% en la característica tiempo-corriente).

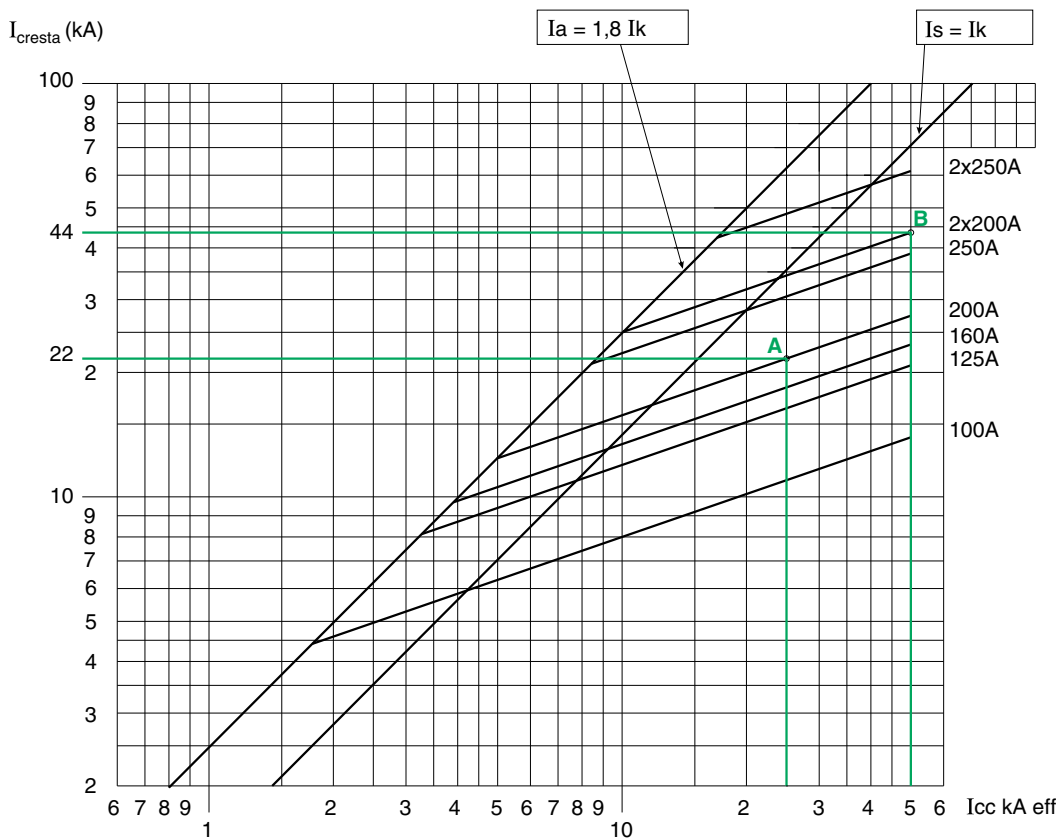


Fig. 27: Curvas de limitación de corriente según calibres (Fusarc-CF, marca Merlin Gerin).

DIRECCION REGIONAL NORDESTE

Delegación BARCELONA

Sicilia, 91-97, 6.º · Tel.: 93 484 31 01 · Fax: 93 484 31 57
08013 BARCELONA · del.barcelona@es.schneider-electric.com

Delegaciones:

BALEARES

Gremi de Teixidors, 35, 2.º · Tel.: 971 43 68 92 · Fax: 971 43 14 43
07009 PALMA DE MALLORCA

GIRONA

Pl. Josep Pla, 4, 1.º, 1.ª · Tel.: 972 22 70 65 · Fax: 972 22 69 15
17001 GIRONA

LLEIDA

Prat de la Riba, 18 · Tel.: 973 22 14 72 · Fax: 973 23 50 46
25004 LLEIDA

TARRAGONA

Carles Riba, 4 · Tel.: 977 29 15 45 · Fax: 977 19 53 05
43007 TARRAGONA

DIRECCION REGIONAL NOROESTE

Delegación A CORUÑA

Pol. Ind. Pocomaco, parcela D, 33 A · Tel.: 981 17 52 20 · Fax: 981 28 02 42
15190 A CORUÑA · del.coruna@es.schneider-electric.com

Delegaciones:

ASTURIAS

Parque Tecnológico de Asturias · Edif. Centro Elena, parcela 46, oficina 1.º F
Tel.: 98 526 90 30 · Fax: 98 526 75 23 · 33428 LLANERA (Asturias)
del.oviedo@es.schneider-electric.com

GALICIA SUR-VIGO

Ctra. Vella de Madrid, 33, bajos · Tel.: 986 27 10 17 · Fax: 986 27 70 64
36214 VIGO · del.vigo@es.schneider-electric.com

LEON

Moisés de León, bloque 43, bajos · Tel.: 987 21 88 61 · Fax: 987 21 88 49
24006 LEON · del.leon@es.schneider-electric.com

DIRECCION REGIONAL NORTE

Delegación VIZCAYA

Estartetxe, 5, 4.º · Tel.: 94 480 46 85 · Fax: 94 480 29 90
48940 LEIOA (Vizcaya) · del.bilbao@es.schneider-electric.com

Delegaciones:

ALAVA

Portal de Gamarra, 1.º · Edificio Deba, oficina 210
Tel.: 945 12 37 58 · Fax: 945 25 70 39 · 01013 VITORIA-GASTEIZ

CANTABRIA

Sainz y Trevilla, 62, bajos
Tel.: 942 54 60 68 · Fax: 942 54 60 46 · 39611 GUARNIZO (Santander)

GUIPUZCOA

Parque Empresarial Zuatzu · Edificio Urumea, planta baja, local 5
Tel.: 943 31 39 90 · Fax: 943 21 78 19 · 20018 DONOSTIA-SAN SEBASTIAN
del.donosti@es.schneider-electric.com

NAVARRA

Parque Empresarial La Muga, 9, planta 4, oficina 1
Tel.: 948 29 96 20 · Fax: 948 29 96 25 · 31160 ORCOYEN (Navarra)

DIRECCION REGIONAL CASTILLA-ARAGON-RIOJA

Delegación CASTILLA-BURGOS

Pol. Ind. Gamonal Villimar · 30 de Enero de 1964, s/n, 2.º
Tel.: 947 47 44 25 · Fax: 947 47 09 72
09007 BURGOS · del.burgos@es.schneider-electric.com

Delegaciones:

ARAGON-ZARAGOZA

Pol. Ind. Argualas, nave 34 · Tel.: 976 35 76 61 · Fax: 976 56 77 02
50012 ZARAGOZA · del.zaragoza@es.schneider-electric.com

CENTRO/NORTE-VALLADOLID

Topacio, 60, 2.º · Pol. Ind. San Cristóbal
Tel.: 983 21 46 46 · Fax: 983 21 46 75
47012 VALLADOLID · del.valladolid@es.schneider-electric.com

LA RIOJA

Avda. Pío XII, 14, 11.º F · Tel.: 941 25 70 19 · Fax: 941 27 09 38
26003 LOGROÑO

DIRECCION REGIONAL CENTRO

Delegación MADRID

Ctra. de Andalucía km 13 · Pol. Ind. Los Angeles
Tel.: 91 624 55 00 · Fax: 91 682 40 48 · 28906 GETAFE (Madrid)
del.madrid@es.schneider-electric.com

Delegaciones:

GUADALAJARA-CUENCA

Tel.: 91 624 55 00 · Fax: 91 682 40 47

TOLEDO

Tel.: 91 624 55 00 · Fax: 91 682 40 47

DIRECCION REGIONAL LEVANTE

Delegación VALENCIA

Calle General Urrutia nº 75 4º B · Tel.: 963 39 18 00 · Fax: 963 62 56 98
46013 VALENCIA · del.valencia@es.schneider-electric.com

Delegaciones:

ALBACETE

Paseo de la Cuba, 21, 1.º A · Tel.: 967 24 05 95 · Fax: 967 24 06 49
02005 ALBACETE

ALICANTE

Monegros, s/n · Edificio A-7, 1.º, locales 1-7 · Tel.: 965 10 83 35
Fax: 965 11 15 41 · 03006 ALICANTE · del.alicante@es.schneider-electric.com

CASTELLON

República Argentina, 12, bajos · Tel.: 964 24 30 15 · Fax: 964 24 26 17
12006 CASTELLON

MURCIA

Senda de Enmedio, 12, bajos · Tel.: 968 28 14 61 · Fax: 968 28 14 80
30009 MURCIA · del.murcia@es.schneider-electric.com

DIRECCION REGIONAL SUR

Delegación SEVILLA

Avda. de la Innovación, s/n · Edificio Arena 2, 2.º · Tel.: 95 499 92 10
Fax: 95 425 45 20 · 41020 SEVILLA · del.sevilla@es.schneider-electric.com

Delegaciones:

ALMERÍA

Calle Lentiscos/n · Edif. Celulosa III, oficina 6, local 1 · Pol. Ind. La Celulosa
Tel.: 950 15 18 56 · Fax: 950 15 18 52 · 04007 ALMERIA

CADIZ

Polar, 1, 4.º E · Tel.: 956 31 77 68 · Fax: 956 30 02 29
11405 JEREZ DE LA FRONTERA (Cádiz)

CORDOBA

Arfe, 16, bajos · Tel.: 957 23 20 56 · Fax: 957 45 67 57
14011 CORDOBA

GRANADA

Baza, s/n · Edificio ICR · Pol. Ind. Juncaril
Tel.: 958 46 76 99 · Fax: 958 46 84 36 · 18220 ALBOLOTE (Granada)

HUELVA

Tel.: 954 99 92 10 · Fax: 959 15 17 57

JAEN

Paseo de la Estación, 60 · Edificio Europa, 1.º A
Tel.: 953 25 55 68 · Fax: 953 26 45 75 · 23007 JAEN

MALAGA

Parque Industrial Trevenez · Escritora Carmen Martín Gaité, 2, 1.º, local 4
Tel.: 95 217 92 00 · Fax: 95 217 84 77 · 29196 MALAGA

EXTREMADURA-BADAJOS

Avda. Luis Movilla, 2, local B
Tel.: 924 22 45 13 · Fax: 924 22 47 98 · 06011 BADAJOZ

EXTREMADURA-CACERES

Avda. de Alemania · Edificio Descubrimiento, local TL 2
Tel.: 927 21 33 13 · Fax: 927 21 33 13 · 10001 CACERES

CANARIAS-LAS PALMAS

Ctra. del Cardón, 95-97, locales 2 y 3 · Edificio Jardines de Galicia
Tel.: 928 47 26 80 · Fax: 928 47 26 91 · 35010 LAS PALMAS DE G.C.
del.canarias@es.schneider-electric.com

CANARIAS-TENERIFE

Custodios, 6, 2.º · El Cardonal · Tel.: 922 62 50 50 · Fax: 922 62 50 60
38108 LA LAGUNA (Tenerife)

Make the most of your energy

www.schneiderelectric.es

Soporte y Servicio Técnico a clientes

es-sat@es.schneider-electric.com



902 10 18 13

Instituto Schneider Electric de Formación

93 433 70 03



www.isefonline.es