

## CAPÍTULO 7

# Aparatos de maniobra de circuitos

## Objetivos del capítulo

En este capítulo se describen los dispositivos que se emplean para la maniobra y la protección de los circuitos eléctricos, comparando sus características y utilidades. Se estudian en detalle los interruptores automáticos y los fusibles, analizando los principios de funcionamiento y las curvas características, con la finalidad de determinar si cumplen con los criterios de protección frente a cortocircuitos en una instalación eléctrica de baja tensión.

Los objetivos específicos de aprendizaje son:

- Conocer la diferente aparente eléctrica, su función en los circuitos y las magnitudes normalizadas que la definen.
- Describir los principales elementos que forman parte de los interruptores automáticos, estudiar las curvas que caracterizan su funcionamiento y obtener los valores de las magnitudes que los definen (poder de corte, intensidad de regulación del disparo electromagnético, etc.).
- Identificar los principales elementos que componen un fusible, conocer los diferentes tipos de fusibles y su nomenclatura, analizar las curvas características de estos dispositivos y determinar los valores de las magnitudes que los definen (poder de corte, intensidad convencional de fusión, etc.).
- Seleccionar las características de un interruptor automático, fusible o una combinación de ambos, para la adecuada protección frente a cortocircuitos de una determinada instalación eléctrica de baja tensión.

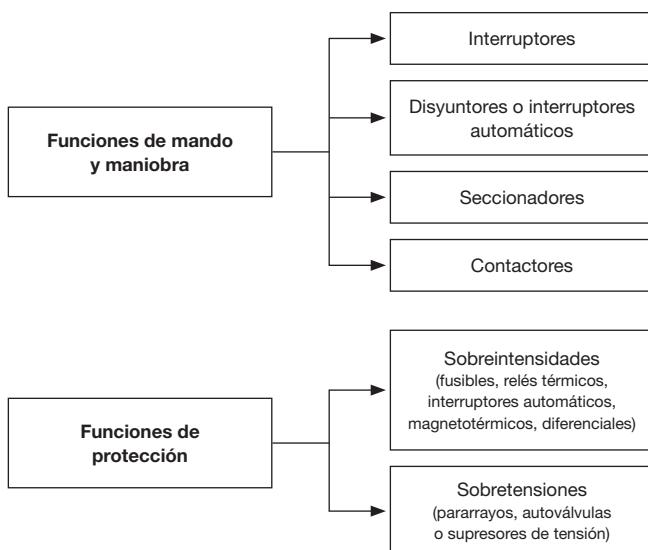
## 1. Introducción

El objeto de las instalaciones eléctricas es conectar los sistemas de generación y transformación de energía eléctrica con las cargas de consumo de los usuarios mediante las líneas y cables eléctricos. Para conseguir que el sistema funcione correctamente, se instalan además una serie de aparatos que permiten maniobrar en los circuitos, entendiendo esta maniobra en un sentido amplio que no solo facilita el mando sobre el estado de la instalación (conectada o no conectada), sino también su regulación, su control y la protección de las instalaciones y usuarios. El REBT define en su ITC-BT-01 el concepto de *aparmenta eléctrica* como el «equipo, aparato o material previsto para ser conectado a un circuito eléctrico con el fin de asegurar una o varias de las siguientes funciones: protección, control, seccionamiento, conexión». Estas funciones se pueden agrupar en dos:

- Funciones de maniobra y mando, que permiten la conexión o desconexión de la instalación, es decir, la puesta o no en servicio.
- Funciones de protección de la instalación frente a un funcionamiento no deseado: sobreintensidades (cortocircuitos o sobrecargas de las líneas), sobretensores o contactos directos e indirectos.

Dentro de la aparmanta eléctrica existen dispositivos específicos para realizar funciones de maniobra, dispositivos indicados para realizar funciones de protección y otros que pueden combinar ambas (figura 1 y tablas 1 y 2).

Figura 1. Clasificación de la aparmanta eléctrica



En general, un *interruptor* es un dispositivo que permite establecer, mantener o interrumpir las corrientes de servicio o nominales de la instalación e incluso sobrecargas. El *interruptor automático* es capaz de interrumpir, bajo determinadas condiciones predefinidas, intensidades circulantes muy elevadas, como pueden ser las corrientes de cortocircuito sin sufrir daños, por lo que, aunque su principal función es de protección, se clasifica dentro de los dispositivos de maniobra, al ser capaz de reestablecer el funcionamiento normal. A los pequeños interruptores automáticos se les denomina *interruptores magnetotérmicos* y protegen a la instalación frente a sobrecargas y cortocircuitos.

La función de los *seccionadores* es realizar la conexión y desconexión de partes de la instalación eléctrica cuando por esta no circula corriente, con el objeto de dejar una parte del circuito sin servicio para realizar trabajos de reparación o mantenimiento, no tienen funciones de protección, por lo que se instalan junto con otros equipos, como los disyuntores.

Los *contactores* son equipos que no se pueden accionar manualmente, tienen dos estados en reposo (abierto o cerrado) y se emplean especialmente como elementos de mando de los motores eléctricos industriales, ya que admiten un elevado número de maniobras bajo unas condiciones de carga y sobrecarga habituales.

En cuanto a los equipos que tienen funciones únicamente de protección, destacan los *fusibles*, que permiten la desconexión del circuito cuando circulan intensidades superiores a la nominal, pero que una vez han actuado, deben sustituirse.

Los *relés térmicos* son dispositivos que se activan con el incremento de la temperatura, por lo que se emplean para proteger a los motores y otro equipamiento frente a sobrecargas. Sin embargo, no protegen a la instalación frente a cortocircuitos, debiéndose utilizar junto con otro dispositivo, como los interruptores automáticos para este fin.

Los *interruptores diferenciales* son dispositivos que detectan corrientes de fuga desde los conductores activos hasta la instalación de tierra, provocando la apertura del circuito cuando la corriente diferencial supera un determinado valor, protegen por tanto frente a contactos directos e indirectos, como se estudiará en el capítulo 8.

Los elementos de protección frente a sobretensiones (pararrayos, autoválvulas o supresores de tensión) se analizarán en el capítulo 10.

La mayor parte de estos elementos tienen aplicación, tanto en instalaciones de transporte y distribución en alta y media tensión como en instalaciones de usuario de baja tensión, aunque en este capítulo nos centraremos en los diseñados para instalaciones de baja tensión. Según la ITC-BT-17, «Dispositivos generales de mando y protección. Interruptor de control de potencia» del REBT, los dispositivos generales e individuales de mando y de protección serán, como mínimo, los siguientes:

- Un interruptor general automático, independiente del interruptor de control de potencia de la instalación, que proteja frente a sobrecargas y cortocircuitos y que pueda ser accionado manualmente.
- Un interruptor diferencial general para la protección frente a contactos indirectos, siguiendo las indicaciones de la ITC-BT-24, protección contra los contactos directos e indirectos.

- Dispositivos destinados a la protección frente a las sobrecargas y cortocircuitos en cada uno de los circuitos interiores, según la ITC-BT-22, protección contra sobreintensidades.
- Si es necesario, un dispositivo de protección frente a sobretensiones, de acuerdo con la ITC-BT-23, protección contra sobretensiones.

Tabla 1. Principal aparamenta eléctrica de mando y maniobra

	Esquema unifilar	Función
Seccionador		Desconexión de la instalación para realizar trabajos (maniobrando en vacío)
Interruptor		Marcha y paro de la instalación
Contactor		Maniobra de equipos como motores

Tabla 2. Principal aparamenta eléctrica de protección

	Esquema unifilar	Función
Interruptor automático (magnetotérmico)		Protección sobreintensidades (cortocircuitos y sobrecargas)
Fusible		Protección sobreintensidades (cortocircuitos y sobrecargas)
Interruptor diferencial		Protección contactos directos e indirectos

En este capítulo vamos a analizar en detalle las características de los interruptores automáticos y los fusibles, así como las características que deben cumplir para proteger frente a las corrientes de cortocircuito en una determinada instalación.

## 2. Magnitudes que definen la aparamenta eléctrica en baja tensión

Para la correcta selección y uso en las instalaciones de la aparamenta eléctrica en baja tensión es necesario conocer una serie de definiciones que caracterizan a estos equipos, permiten seleccionar los más adecuados a partir de los valores indicados en los catálogos comerciales y realizar una comparativa entre ellos. Las magnitudes más empleadas para definir los dispositivos de maniobra y protección son las siguientes:

- Tensión nominal. Es el valor máximo de la tensión indicado por el fabricante que permite el funcionamiento normal del dispositivo, de acuerdo con sus características y materiales de fabricación.
- Intensidad nominal. Es el valor máximo de la intensidad indicado por el fabricante que puede circular por el dispositivo de forma indefinida sin que se deteriore ni se supere la máxima temperatura establecida por la normativa.
- Nivel de aislamiento. Indica la capacidad del dispositivo para soportar las sobretensiones empleadas en los ensayos denominados ensayo a la frecuencia industrial y ensayo a la onda del rayo.
- Valor asignado. Es el valor de una magnitud (tensión o intensidad) fijado para un funcionamiento específico del dispositivo, esto es, para unas condiciones de temperatura, factor de potencia, frecuencia de maniobra, vida útil, etc. definidas.
- Poder de corte. Valor máximo de la intensidad que un dispositivo es capaz de interrumpir bajo una determinada tensión y en las condiciones previstas de funcionamiento.

Los interruptores automáticos y los fusibles son los dispositivos con el poder de corte necesario para la protección de las instalaciones frente a las corrientes de cortocircuito, como se analiza en los siguientes epígrafes. Es importante resaltar que el poder de corte debe estar referido a las mismas condiciones de ensayo normalizadas para poder comparar diferentes dispositivos en función de esta magnitud.

- Poder de cierre. Es el valor máximo de la intensidad que un dispositivo es capaz de establecer en un circuito en las condiciones de funcionamiento previstas en el diseño de la instalación.

## 3. Interruptores automáticos

### 3.1. Descripción y clasificación

Como se ha analizado en la introducción de este capítulo, los interruptores automáticos tienen tanto funciones de protección como de mando. Su elevado poder de corte les permite

desconectar de manera automática la instalación cuando por ella circulan elevadas corrientes de sobrecargas o de cortocircuito, además, la posibilidad de emplearlos para conectar y desconectar circuitos de manera manual o mediante accionamientos les otorga función de mando. De acuerdo con la normativa<sup>1</sup>, los interruptores automáticos adecuados para las instalaciones de baja tensión se clasifican en dos grupos:

- Interruptores automáticos (IA). Tienen aplicación industrial y pueden trabajar con tensiones de hasta 1.000 V y rango de intensidades entre 0,5 A y 6,3 kA.
- Pequeños interruptores automáticos (PIA) o interruptores magnetotérmicos. Se usan principalmente en instalaciones domésticas y pueden trabajar con tensiones máximas de 400 V y rango de intensidades entre 6 y 125 A.

Los principales elementos que componen un interruptor automático son los siguientes:

- Cámara de extinción. Es la zona del interior del interruptor en la que se apaga el arco eléctrico producido al cortar o establecer la corriente. El arco eléctrico se genera cuando se ponen en contacto dos partes conductoras con diferente nivel de aislamiento separadas por un medio aislante, apareciendo en el momento en que el valor del campo eléctrico creado supera la rigidez dieléctrica del aislante. Esto produce una elevada disipación de energía que puede deteriorar la instalación; la cámara de extinción evita estos daños, favoreciendo el rápido apagado del arco eléctrico. En la mayoría de los interruptores automáticos de baja tensión el medio de corte es el aire, pero en interruptores de mayor intensidad nominal se puede emplear otro medio distinto, como el hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ ) o el vacío.
- Dispositivo térmico (réle térmico). El dispositivo térmico permite el disparo del interruptor automático, es decir, la interrupción de la corriente mediante medios mecánicos. Se le denomina también disparador retardado por su tiempo de actuación lento. Consiste en una lámina formada por la unión de dos metales que se calienta y deforma con el paso de la corriente, accionando el mecanismo de protección cuando esta deformación es lo suficientemente grande debido al paso de una intensidad elevada. El dispositivo térmico es adecuado para la protección frente a sobrecargas que no tienen valores de intensidad tan elevados como las corrientes de cortocircuito por su elevado tiempo de respuesta.
- Dispositivo magnético (réle magnético). El dispositivo magnético, denominado también disparador rápido, está formado por un electroimán (bobina arrollada en un núcleo magnético) y se instala en serie con el dispositivo térmico. La corriente circulante produce un campo magnético que desplaza al electroimán cuando se alcanzan corrientes elevadas, accionando el mecanismo de protección. Debido a la rapidez de respuesta al alcanzar la intensidad límite, este dispositivo es adecuado para la protección frente a cortocircuitos.

<sup>1</sup> UNE-EN 60898, UNE-EN 60947-2

- Mecanismo de protección. Es el conjunto de elementos mecánicos (palancas, levas, muelles) que permite la apertura o el cierre de los contactos del interruptor con el resto del circuito. Este cierre puede ser manual o automático a través de los dispositivos térmico o magnético.

### 3.2. Curvas características

Las principales magnitudes características que definen a los interruptores automáticos son las siguientes:

- Calibre o intensidad nominal (A).
- Tensión nominal (V).
- Poder de corte (kA).
- Número de polos (1P, 1P+N, 2P, 3P + N y 4P), es decir, los conductores que involucra en su actuación. El REBT indica que en la protección de los circuitos interiores el interruptor automático debe ser omnipolar, lo que implica que puede interrumpir la corriente en todos los conductores activos (fases y neutro).

Además de estas magnitudes, para la selección del interruptor automático adecuado para la protección del circuito es necesario conocer sus curvas características. La primera de estas curvas es la *curva característica de disparo*, que grafía los valores del tiempo de disparo en función de la intensidad (figura 2). Generalmente, estos valores se representan para una temperatura de referencia de 30 °C, debiendo indicar el fabricante cómo varían los valores de la curva para otras temperaturas de trabajo.

En la curva de la figura 2 se pueden observar dos zonas de disparo, la zona de disparo térmico y la zona de disparo electromagnético, estas zonas de disparo pueden ser fijas, como se muestra en esta figura, o ajustables, es decir, con un rango de operación variable (figura 3). En la parte del disparo térmico se definen las siguientes intensidades:

- Intensidad convencional de no intervención o de no desconexión ( $I_1$ ). Es la máxima intensidad para la que, partiendo del interruptor cerrado a temperatura ambiente, se garantiza que no se producirá el disparo en un tiempo determinado, denominado *tiempo convencional* ( $t_c$ ).
- Intensidad convencional de intervención o de desconexión ( $I_2$ ). Es la mínima intensidad que provoca el disparo dentro del tiempo convencional ( $t_c$ ) cuando el interruptor trabaja en caliente (por el paso de  $I_1$  durante  $t_c$ ).

En los interruptores normalizados, estos valores de intensidad tienen un valor dado en función de la intensidad nominal ( $I_n$ ) (tabla 3).

El tiempo convencional normalizado tiene una duración de una hora para los interruptores automáticos de calibre menor o igual a 63 A y de dos horas para interruptores con un calibre superior.

Figura 2. Curva característica de disparo del interruptor automático

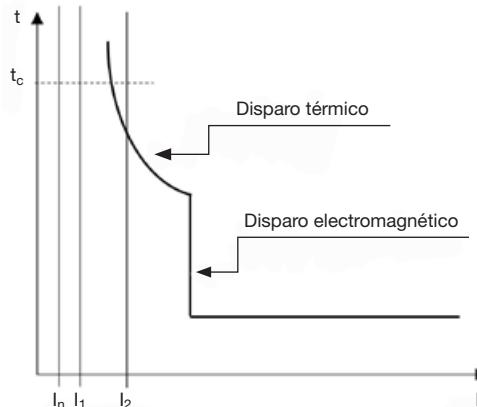
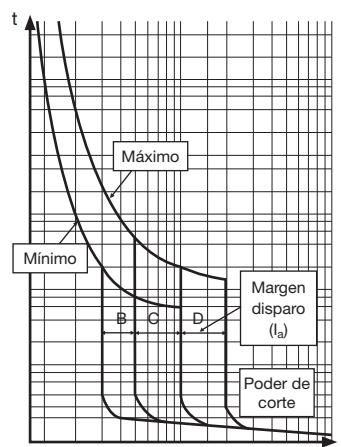


Tabla 3. Valores normalizados de las intensidades convencionales de intervención y no intervención

	$I_1$	$I_2$
Interruptores automáticos modulares (domésticos) .....	$1,13I_n$	$1,45I_n$
Interruptores automáticos industriales .....	$1,05I_n$	$1,30I_n$

Analizando más detalladamente la figura 3, se observa cómo el disparo térmico permite seleccionar la intensidad de regulación del disparo entre un valor máximo y un valor mínimo. También se puede elegir la intensidad de regulación del disparo electromagnético ( $I_a$ , de intensidad de actuación o  $I_{mr}$ , de disparo magnético, según la bibliografía, en este manual la denotaremos  $I_a$ ), el margen de regulación en función del tiempo de disparo. Por ejemplo, en los interruptores magnetotérmicos normalizados (curvas B, C y D), el margen inferior de regulación para cada franja corresponde a un tiempo límite de disparo mayor o igual a 0,1 s, mientras que el margen superior a un tiempo límite de disparo menor de 0,1 s.

Figura 3. Curva característica de disparo del pequeño interruptor automático con regulación



Otra curva característica de los in-interruptores automáticos es la *curva  $I^2t$*  (figura 4), que representa la energía disipada en una resistencia de  $1\Omega$  cuando circula la corriente de cortocircuito durante el tiempo de duración de este. Esta curva valora la cantidad de energía que el interruptor automático deja pasar durante el cortocircuito, medida en  $A^2s$ , y que se disipa en la instalación protegida, lo que permite realizar una estimación de la temperatura que podrían alcanzar los cables instalados aguas abajo del interruptor, si no se produjera el corte.

Por último, la *curva de limitación de corriente* de un interruptor automático caracteriza el comportamiento del interruptor frente a la corriente de cresta de cortocircuito, indicando el valor máximo de la corriente limitada (figura 5).

Figura 4. Curva  $I^2t$  del interruptor automático

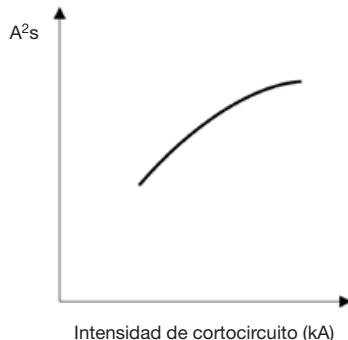
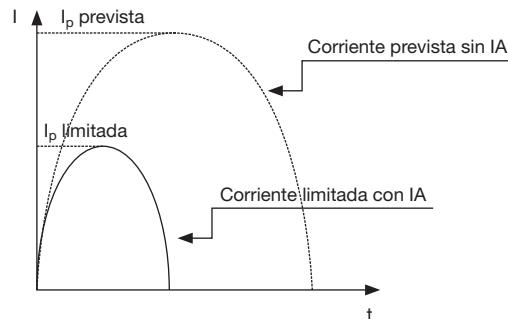


Figura 5. Curva de limitación de corriente del interruptor automático



### 3.3. Selección para la protección frente a cortocircuitos

En la fase de diseño de una instalación eléctrica de baja tensión, se debe verificar el cumplimiento de las siguientes condiciones para garantizar que el interruptor automático seleccionado protege correctamente frente a las corrientes de cortocircuito a la parte de la instalación analizada:

- El poder de corte del interruptor automático seleccionado debe ser superior a la máxima intensidad de cortocircuito prevista en la instalación analizada, corriente que se da en el origen de la línea al tener una impedancia menor aguas arriba de este punto:

$$\text{Poder de corte IA} > I_{cc,max} \quad (7.1)$$

- La mínima corriente de cortocircuito prevista en la instalación analizada, que se da en su punto más bajo, debe ser superior a la intensidad de regulación del disparo electromagnético o corriente de actuación ( $I_a$ ):

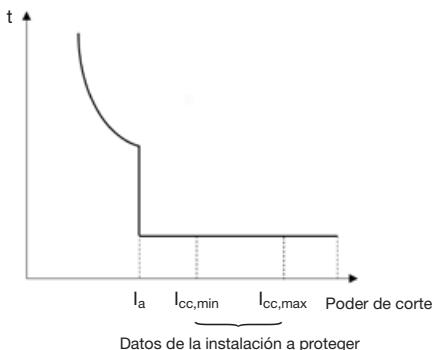
$$I_{cc,max} > I_a \quad (7.2)$$

- La máxima intensidad de cortocircuito prevista en la instalación analizada deberá ser inferior a la intensidad admisible del conductor para las condiciones de funcionamiento ( $I_b$ ):

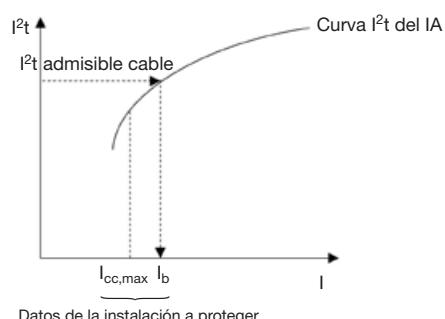
$$I_{cc,max} < I_b \quad (7.3)$$

En las figuras 6 y 7 se observa gráficamente las condiciones anteriores en las curvas características del interruptor automático, indicando las magnitudes que corresponden a las características de la instalación a proteger ( $I_{cc,min}$ ,  $I_{cc,max}$ ,  $I_b$ ,  $I^2t$  admisible del cable).

**Figura 6. Protección frente a cortocircuitos con el interruptor automático. Comprobaciones en la curva característica de disparo**



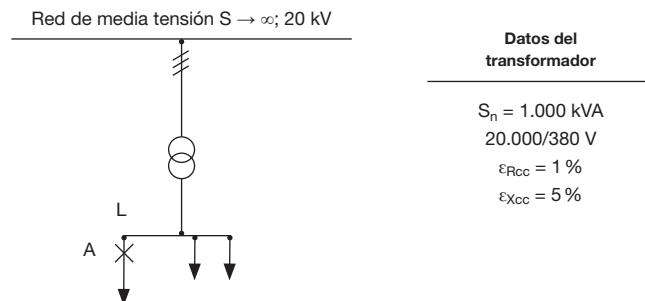
**Figura 7. Protección frente a cortocircuitos con el interruptor automático. Comprobaciones en la curva  $I^2t$**



### EJEMPLO 1

Determinar el poder de corte mínimo y el límite superior de la intensidad de regulación del disparo electromagnético para proteger frente a cortocircuitos la instalación de la actividad de autocomprobación 1, resuelta en el capítulo 6.

El esquema unifilar de la actividad de autocomprobación 1, resuelta en el capítulo 6 es el siguiente:



La impedancia de defecto al inicio de la instalación es la correspondiente a la del transformador, luego,

$$I_{cc,max} = \frac{U}{\sqrt{3}Z_{cc}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 7,36} = 29,8 \text{ kA}$$

Con:

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} = \sqrt{1,44^2 + 7,22^2} = 7,36 \text{ m}\Omega$$

La intensidad mínima es la del final de la línea a proteger, es decir, en el punto A, cuyo valor es el calculado en la actividad de autocomprobación 1 resuelta en el capítulo 6.

$$I_{cc,min} = \frac{U}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 147,36} = 1,49 \text{ kA}$$

Luego, el interruptor automático a seleccionar deberá tener un poder de corte superior a:

$$\text{Poder de corte IA} > 29,8 \text{ kA}$$

Y una intensidad de regulación del disparo electromagnético inferior a:

$$1,49 \text{ kA} > I_a$$

## 4. Fusibles

### 4.1. Descripción y clasificación

Los fusibles son dispositivos que protegen a la instalación frente a sobrecargas y cortocircuitos, produciendo la apertura del circuito cuando la corriente que los atraviesa provoca la fusión de su elemento conductor. El fusible está compuesto principalmente por dos elementos: una *carcasa*, que sostiene al cartucho fusible y que dispone de los bornes de conexión con la instalación y el *cartucho fusible*, que es el elemento recambiable. Dentro del cartucho fusible, que es de material aislante como, por ejemplo, vidrio o porcelana, se

encuentra un hilo conductor de cobre u otro metal o aleación destinado a fundirse cuando por él pasa una corriente suficientemente elevada, produciendo la ruptura de la circulación en el circuito. Este elemento se dispone en el cartucho, dentro de un material extintor (aire, sílice...) que facilita la extinción del arco eléctrico.

Los fusibles se clasifican en función del rango de corrientes en las que el fusible actúa y en función del tipo de receptor para el que es adecuada su instalación. Esta clasificación se designa mediante dos letras del siguiente modo:

- Primera letra:
  - Fusible tipo «a». Designa a los fusibles denominados de acompañamiento, que cortan las corrientes comprendidas entre un valor mínimo de corriente superior a su intensidad asignada ( $K \cdot I_n$ ) y su poder de corte.
  - Fusible tipo «g». Designa a los fusibles denominados generales que cortan todas las corrientes comprendidas entre su intensidad asignada ( $I_n$ ) y su poder de corte.
- Segunda letra:
  - Tipo G. Para uso general (protección de cables).
  - Tipo M. Para protección de motores.
  - Tipo Tr. Para protección de transformadores.
  - Tipo B. Para protección de líneas de elevada longitud.
  - Tipo R. Para protección de circuitos con semiconductores.
  - Tipo D. Fusibles con tiempo de actuación retardado.

Por ejemplo, la nomenclatura gG designa a los cartuchos fusibles de uso general que pueden cortar todas las corrientes.

## 4.2. Curvas características

Las principales magnitudes características que definen a los fusibles para las instalaciones de baja tensión según la normativa<sup>2</sup> son las siguientes:

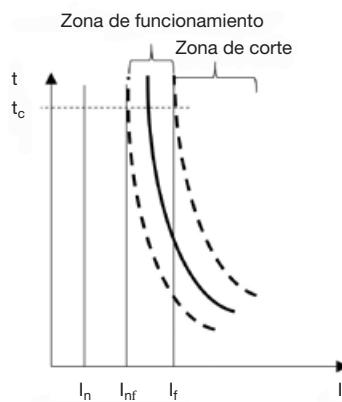
- Calibre, intensidad nominal o asignada (A).
- Tensión nominal o asignada (V).
- Corriente convencional de no fusión (A).
- Corriente convencional de fusión (A).
- Poder de corte (kA).

<sup>2</sup> UNE-EN 60269.

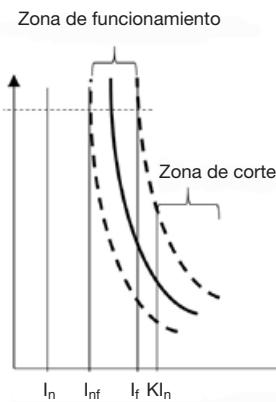
En la *curva característica tiempo-corriente* del fusible representada en la figura 8 se pueden ver gráficamente los valores de la intensidad convencional de no fusión ( $I_{nf}$ ) y de la intensidad convencional de fusión ( $I_f$ ). El primero, como su nombre indica, es el valor de la intensidad que el cartucho puede soportar sin fundir en un tiempo determinado, denominado *tiempo convencional* ( $t_c$ ), mientras que el segundo es lo contrario, es decir, el valor de la intensidad que provoca la fusión en el tiempo convencional.

Figura 8. Curva característica tiempo-corriente de los fusibles

a) Fusible tipo g



b) Fusible tipo a



Para finalizar con el análisis de la curva tiempo corriente, es necesario indicar que el tiempo de funcionamiento del fusible es el que discurre desde el inicio de la circulación de la corriente que provoca la fusión hasta su extinción. Se divide en dos períodos, el primero, denominado *tiempo de prearco o fusión* ( $t_f$ ), es el que transcurre desde el inicio de la circulación de corriente hasta la aparición del arco eléctrico. El segundo periodo, denominado *tiempo de arco* ( $t_a$ ), va desde la aparición del arco eléctrico hasta su extinción. Es decir, la zona de funcionamiento marcada en la figura 8 queda limitada entre la curva de intensidad de prearco y la curva de intensidad de arco.

En los catálogos de los fusibles se definen también las *curvas  $I^2t$*  para determinar la energía específica pasante, como se ha analizado en el caso de los interruptores automáticos. Para cada calibre de fusible se suele asignar un valor  $I^2t$  constante, que se corresponde con la integral de la curva característica tiempo-corriente para el poder de corte asignado, representando, por tanto, la condición más desfavorable. Este valor es válido siempre que el tiempo de actuación no sea superior a 5 s.

Existe una tipología de fusibles limitadores que limitan la corriente de cresta prevista a un valor inferior, igual que en la gráfica de la figura 5 de los interruptores automáticos.

Esto se logra fundiendo el hilo conductor antes de que la corriente prevista de cortocircuito alcance su pico (valor de cresta) por primera vez.

#### 4.3. Selección para la protección frente a cortocircuitos

En las líneas protegidas mediante fusibles, la protección frente a cortocircuitos de la línea está garantizada, si se cumplen las siguientes condiciones:

1. El poder de corte del fusible debe ser superior a la máxima intensidad de cortocircuito prevista en la instalación analizada:

$$\text{Poder de corte } F > I_{cc,max} \quad (7.4)$$

Esta condición se cumple prácticamente siempre, ya que el poder de corte de los fusibles disponibles en el mercado es elevado, por ejemplo, los indicados para instalaciones industriales suelen tener un poder de corte mínimo 100 kA.

2. La mínima corriente de cortocircuito en la instalación analizada debe ser superior a la intensidad para la que se produce la intersección de las características tiempo-corriente admisibles del conductor y del funcionamiento del fusible ( $I_{ad}$ ) (figura 9):

$$I_{cc,min} > I_{ad} \quad (7.5)$$

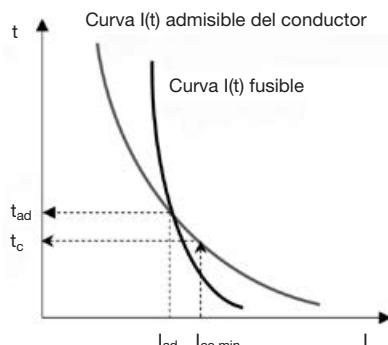
En resumen, para la protección de una instalación frente a cortocircuitos mediante interruptores automáticos o fusibles hay dos criterios generales a cumplir: el *criterio del poder de corte*, que debe ser superior a la intensidad máxima de cortocircuito y el *criterio del tiempo de corte*, que indica que el dispositivo debe cortar antes de que la temperatura alcanzada en los cables supere la máxima admisible. Esto se puede comprobar analizando la duración del cortocircuito.

Se distinguen dos casos:

- $0,1 \text{ s} < \text{duración cortocircuito} < 5 \text{ s}$ .

En ese caso, como se observa en la figura 9, se debe cumplir que el tiempo admisible correspondiente a la intensidad máxima admisible del conductor sea superior o igual al tiempo de corte ( $t_c \leq t_{ad}$ ). El tiempo admisible del con-

Figura 9. Intersección característica tiempo-corriente admisible del conductor y del fusible



ductor depende de las características del conductor y de la intensidad circulante, y se puede calcular con la siguiente expresión:

$$t_{ad} = \left[ K \cdot \left( \frac{S}{I} \right) \right]^2 \quad (7.6)$$

Donde  $I$  es el valor eficaz de la corriente de cortocircuito en amperios,  $S$ , la sección del cable en  $\text{mm}^2$  y  $K$ , una constante que depende del material del conductor y de su tipo de aislamiento (tabla 4).

El tiempo de corte  $t_c$  se obtiene entrando en la curva característica tiempo-corriente del dispositivo de protección con el valor de la intensidad de cortocircuito mínima  $I_{cc,min}$  (figura 9).

Tabla 4. Constante característica  $K$  del cable

Material conductor/aislamiento	K
Cobre/PVC .....	115
Cobre/materiales termoestables .....	135
Aluminio/PVC .....	74
Aluminio/materiales termoestables .....	87

- Duración cortocircuito  $< 0,1$  s. En ese caso no se puede despreciar la componente asimétrica de la corriente de cortocircuito cuyo valor es más elevado al inicio de este. Es necesario analizar la cantidad de energía que el dispositivo deja pasar empleando la curva  $I^2t$ , por lo que la condición que se debe cumplir para que el dispositivo proteja a la instalación es la siguiente:

$$(I^2t)_{disp} \leq (I^2t)_{adm} = [K \cdot S]^2 \quad (7.7)$$

Donde el valor  $(I^2t)_{adm}$  del cable se calcula en función de sus características (constante  $K$  y sección) mientras que el valor  $(I^2t)_{disp}$  se determina entrando en la curva  $I^2t$  del dispositivo de protección con el valor máximo de la intensidad inicial simétrica de la corriente de cortocircuito ( $I_{cc,max}$ ).

## 5. Coordinación de los sistemas de protección. Selectividad eléctrica

Cuando se diseñan las protecciones de una instalación con varios dispositivos en serie, es conveniente garantizar una adecuada selectividad eléctrica entre ellos, es decir, que cuando se produce un defecto, este sea eliminado únicamente por el dispositivo ubicado inmediatamente aguas arriba del punto de fallo y no produzca la actuación del resto de elementos de protección del circuito. La selectividad se dice que es *total* cuando se da independientemente del valor de la corriente de defecto, mientras que es *parcial* cuando se combina la actuación de dos dispositivos

en función del valor de la sobreintensidad circulante como, por ejemplo, cuando se protege frente a cortocircuitos con una combinación de fusible e interruptor automático. En este caso, se selecciona el interruptor automático para la protección frente a las sobreintensidades más bajas, sobrecargas y cortocircuitos moderados, inferiores a su poder de corte, y el fusible para la protección frente a los cortocircuitos de intensidad superior al poder de corte del interruptor automático, cumpliéndose las condiciones representadas en la gráfica de la figura 10. De este modo se abarata la instalación al seleccionar un interruptor automático de menor poder de corte.

Como se observa en la figura 10, para que la selectividad sea la adecuada, el punto de intersección de ambas curvas ( $I_i$ ) debe ser ligeramente inferior al poder de corte del interruptor automático. Se debe considerar por separado que ambos dispositivos cumplen con los requisitos para la protección frente a cortocircuitos analizados en los epígrafes anteriores, pero adaptados tal y como se muestra en la tabla 5.

Figura 10. Funcionamiento de la combinación fusible-interruptor automático para la protección frente a cortocircuitos

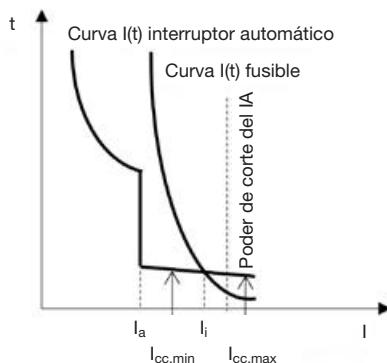


Tabla 5. Condiciones de protección frente a cortocircuitos de la combinación fusible interruptor automático

Comprobación interruptor automático	Comprobación fusible
Poder de corte IA > $I_i$	Poder de corte F > $I_{cc,max}$
$I_{cc,min} > I_a$	$I_i > I_{ad}$
$I_i < I_b$	

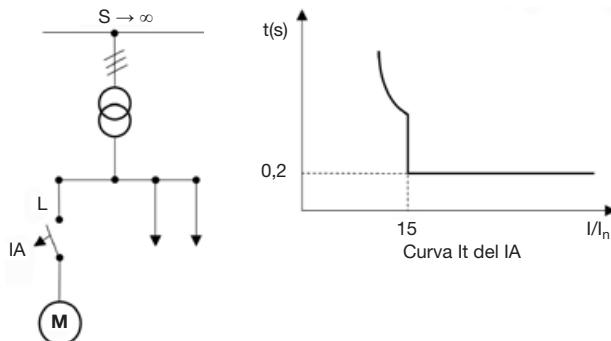
Además, se deberá comprobar que el interruptor automático está protegido por el fusible, verificando en la información del catálogo de los dispositivos que la corriente de cresta admisible por el interruptor automático es superior a la corriente de cresta limitada por el fusible, y que, para el valor de cortocircuito máximo, el valor  $I^2t$  admisible por el interruptor automático es superior al valor  $I^2t$  limitado por el fusible.

## Conceptos básicos

- En los circuitos eléctricos es necesario instalar una serie de dispositivos o aparenta eléctrica para garantizar su adecuado funcionamiento, facilitando su maniobra y garantizando la protección de las instalaciones y sus usuarios.
- En las instalaciones eléctricas de baja tensión, los principales dispositivos empleados para la protección frente a sobreintensidades (sobrecargas y cortocircuitos) son los interruptores automáticos y los fusibles. Los primeros se pueden rearmar, mientras que los segundos se deben sustituir tras su uso.
- La selección de la aparenta de protección frente a cortocircuitos debe cumplir dos criterios fundamentales: el criterio de poder de corte y el criterio del tiempo de corte.
- Para proteger la instalación con interruptores automáticos, se debe comprobar que los valores de intensidades mínima y máxima de cortocircuito de la línea a proteger se encuentren dentro del rango comprendido entre la intensidad de actuación del disparo electromagnético del interruptor automático y el poder de corte. Además, se debe comprobar que la instalación es capaz de admitir que circule la intensidad de cortocircuito máxima sin dañarse, es decir, sin superar la intensidad admisible del conductor.
- Para proteger la instalación con fusibles, se debe comprobar que la intensidad de cortocircuito máxima de la línea es inferior al poder de corte del fusible, y que la intensidad de cortocircuito mínima de la línea es superior a la intensidad admisible del conductor.
- Cuando se protege una instalación empleando dos o varios dispositivos es importante comprobar su selectividad para que cada uno actúe para el fin para el que está diseñado.

## Actividades de autocomprobación

- 1** Determinar las características del interruptor automático a instalar en el esquema unifilar de la figura para que la instalación esté protegida adecuadamente frente a cortocircuitos.



Datos del transformador

- 250 kVA
- 20 kV/400 V
- $\varepsilon_{Rcc} = 1\%$
- $\varepsilon_{cc} = 5,5\%$
- IA:  $I_n = 200$  A
- Disparo electromagnético de retardo: 0,2 segundos
- Línea L:  $S = 120 \text{ mm}^2$ ,  $I = 190$  m, interior de cables de Cu aislamiento XLPE
- Carga M:  $I = 193$  A,  $\cos\phi = 0,8$

## Solución

Calculamos la corriente de cortocircuito en bornes del transformador:

$$R_{cc} = \left( \frac{\varepsilon_{R_{cc}}}{100} \right) \cdot \left( \frac{U_n^2}{S_n} \right) = \frac{1}{100} \cdot \frac{400^2}{250} = 6,4 \text{ m}\Omega$$

$$X_{cc} = \left( \frac{\varepsilon_{X_{cc}}}{100} \right) \cdot \left( \frac{U_n^2}{S_n} \right) = \frac{5,4}{100} \cdot \frac{400^2}{250} = 34,6 \text{ m}\Omega$$

Con

$$\varepsilon_{X_{cc}} = \sqrt{5,5^2 - 1^2} = 5,4 \text{ m}\Omega$$

por lo que:

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} = 35,2 \text{ m}\Omega$$

La corriente de cortocircuito al inicio de la línea,  $I_{cc,max}$  es:

$$I_{cc,max} = I_k^i = \frac{U}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 35,2} = 6,56 \text{ kA}$$

Luego, el poder de corte del interruptor automático deberá ser mayor de 6,56 kA.

Comprobamos la siguiente condición de protección:

$$I_{cc,min} > I_a$$

Para calcular la corriente mínima de cortocircuito es necesario determinar la impedancia de la línea:

$$R_{Línea L} = 1.000 \cdot \rho \frac{l}{(nS)} = 1.000 \cdot 0,017 \cdot \frac{190}{(1 \cdot 120)} = 27,7 \text{ m}\Omega$$

$$X_{Línea L} = X_i^i = \frac{l}{1.000} = 80 \frac{190}{1.000} = 15,2 \text{ m}\Omega$$

$$R_k = \sum R_i = R_{cc} + R_{Línea L} = 6,4 + 27,7 = 34,1 \text{ m}\Omega$$

$$X_k = \sum X_i = X_{cc} + X_{Línea L} = 34,6 + 15,2 = 49,8 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = 60,3 \text{ m}\Omega$$

La corriente mínima de cortocircuito es:

$$I_{cc,min} = I_k'' = \frac{U}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 60,3} = 3,83 \text{ kA}$$

La corriente de actuación según la curva característica es:

$$I_a = 15 \cdot I_n = 15 \cdot 200 = 3.000 \text{ A}$$

Como  $3,83 > 3 \text{ kA}$ , se cumple la condición.

La tercera condición que hay que comprobar es:

$$I_{cc,max} > I_b$$

Para calcular la intensidad admisible del conductor, consideramos el tiempo de retardo como la duración máxima del cortocircuito:

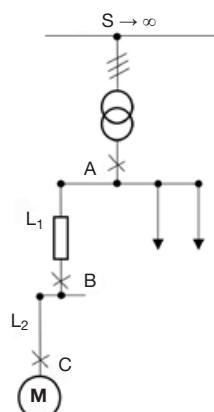
$$(I^2t)_{adm} = I_b^2 \cdot t_{retardo} = [K \cdot S]^2$$

Con  $K = 135$ , según la tabla 3, para las características de la línea. Despejando:

$$I_b = \frac{135 \cdot 120}{\sqrt{0,2}} = 36,22 \text{ kA} > 6,56 \text{ kA}$$

Por lo que se cumplen las tres condiciones de protección.

- 2** Determinar si el fusible del esquema unifilar de la figura cumple las condiciones para proteger frente a cortocircuitos a la instalación.



#### Datos del transformador

- 630 kVA
- 20 kV/380 V
- $\varepsilon_{Rcc} = 1\%$
- $\varepsilon_{Xcc} = 3\%$

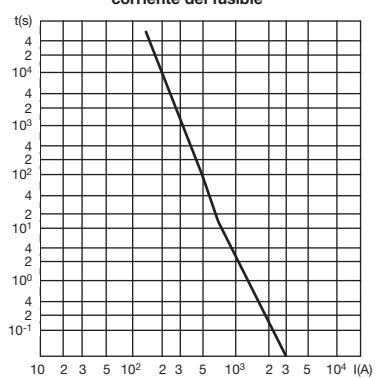
#### Datos generales de la instalación

- Fusible: poder de corte 100 kA
- Carga M:  $I = 60 \text{ A}$
- Punto A:  $I_k'' = 30,3 \text{ kA}$
- Punto B:  $I_k'' = 21,5 \text{ kA}$
- Punto C:  $I_k'' = 2,3 \text{ kA}$

#### Características de $L_1$ y $L_2$

- Sección: 10 mm<sup>2</sup>
- Cu/PVC

#### Curva característica tiempo-corriente del fusible



## Solución

Como la sección de  $L_1$  y  $L_2$  es la misma, no es necesario incluir un dispositivo de protección entre B y C. El fusible debe cumplir las siguientes condiciones:

$$\text{Poder de corte } F > I_{cc,\max} = 30,3 \text{ kA}$$

En este caso se cumple la condición, ya que el poder de corte del fusible es de 100 kA.

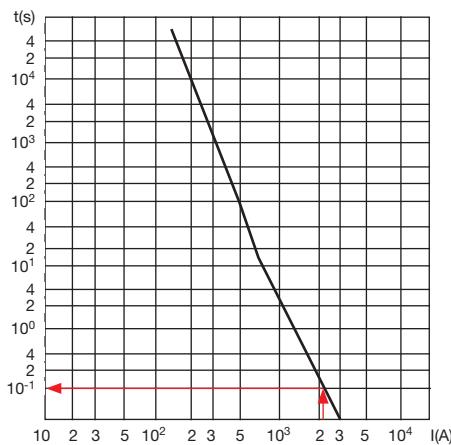
La segunda condición que se debe verificar es:

$$I_{cc,min} > I_{ad}$$

Donde, en este caso,  $I_{cc,min} = 2,3 \text{ kA}$ . Hay que comprobar en la curva  $I(t)$  del fusible que se cumple  $t_c \leq t_{ad}$ . Donde:

$$t_{ad} = \left[ K \cdot \left( \frac{S}{I} \right) \right]^2 = \left[ 115 \cdot \left( \frac{10}{2.300} \right) \right]^2 = 0,25 \text{ s}$$

Con el valor de  $K$  obtenido de la tabla 3 para una línea de Cu/PVC. Entrando en la curva característica tiempo-corriente del fusible con el valor de  $I_{cc,min}$  se obtiene  $t_c = 0,1 \text{ s}$  (véase la figura que viene a continuación), luego cumple.



- 3** Analizar si el fusible del circuito de la actividad 2 se podría sustituir por un interruptor automático de las siguientes características:

- $I_n = 250 \text{ A}$ .
- Poder de corte: 35 kA.
- Disparo electromagnético ajustable: entre  $5I_n$  y  $10I_n$ .

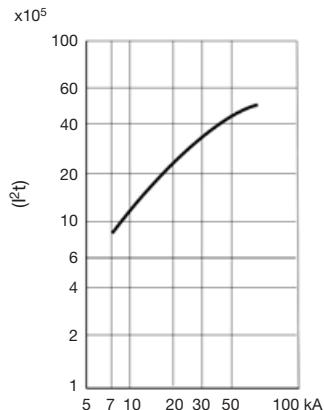
Sabiendo que los cables tienen la siguiente característica en el punto de trabajo:

$$I^2t_{adm} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s}$$

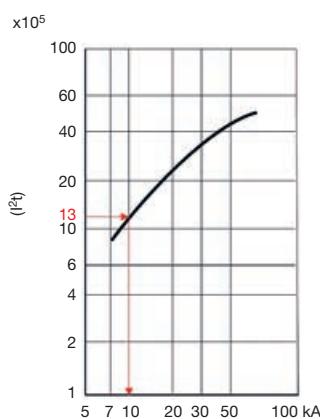
### Solución

Las condiciones que se deben verificar son:

1. Poder de corte  $IA > I_{cc,max} \Rightarrow 35 > 30,3 \text{ kA} \rightarrow$   
→ Cumple
2.  $I_{cc,min} > I_a$  con  $I_a = [5I_n, 10I_n] = [1,25 \text{ kA}, 2,5 \text{ kA}]$ .  
Como  $I_{cc,min} = 2,3 \text{ kA}$ , el IA es válido en su ajuste inferior.
3.  $I_{cc,max} < I_b$ .



Determinaremos  $I_b$  en la curva  $I^2t$  del interruptor automático entrando en el eje y con el valor del  $I^2t$  admisible del cable de  $1,3 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s}$  (véase siguiente figura):



$I_b \approx 10 \text{ kA}$  y como  $I_{cc,max} = 30,3 \text{ kA}$  no se cumpliría la tercera condición, luego, el interruptor automático no sería válido para proteger a la instalación.

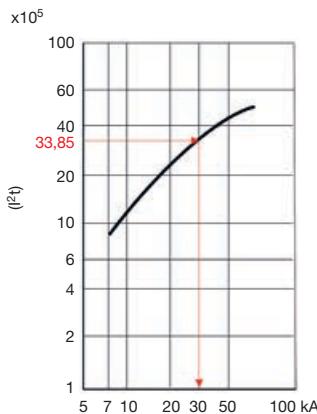
- 4 Calcular la energía máxima admisible en  $\text{A}^2\text{s}$  que puede soportar un cable de cobre aislado con PVC ( $K = 115$ ) de  $16 \text{ mm}^2$  de sección ante un cortocircuito de duración inferior a  $0,1 \text{ s}$  y determinar el valor de la intensidad admisible del cable  $I_b$  para que no resulte dañado, si la curva de características  $I^2t$  del equipo de protección es la misma que la de la actividad anterior.

## Solución

La energía máxima admisible en un cortocircuito de corta duración se determina mediante la siguiente expresión:

$$(I^2t)_{\text{adm}} = [K \cdot S]^2 = [115 \cdot 16]^2 = 3.385.600 \text{ A}^2\text{s} = 33,85 \cdot 10^5 \text{ A}^2\text{s}$$

Que se corresponde con una intensidad  $I_b \approx 30 \text{ kA}$  (véase figura).



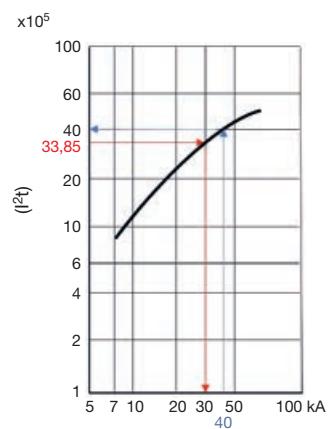
- 5 Si la corriente máxima de cortocircuito de la línea de la actividad anterior es de 40 kA, ¿se cumple la condición  $(I^2t)_{\text{disp}} \leq (I^2t)_{\text{adm}}$ ?

## Solución

En la curva de características  $I^2t$  del equipo de protección de la actividad anterior podemos determinar el valor de  $(I^2t)_{\text{disp}}$  entrando en el eje  $x$  con el valor de  $I_{cc,max}$  (véase figura), obteniendo  $(I^2t)_{\text{disp}} = 40 \cdot 10^5 \text{ A}^2\text{s}$ . Luego, no se cumple:

$$40 \cdot 10^5 \not\leq 33,85 \cdot 10^5 \text{ A}^2\text{s}$$

Comprobamos que en la curva  $I^2t$  del dispositivo podemos determinar, tanto la intensidad máxima admisible del cable calculando  $(I^2t)_{\text{adm}}$ , a partir de sus características, como el valor de  $(I^2t)_{\text{disp}}$ , a partir de la intensidad de cortocircuito máxima.



## Bibliografía

- Guirado Torres, R., Asensi Orosa, R., Jurado Melguizo, F. y Carpio Ibáñez, J. (2006). *Tecnología eléctrica*. McGraw-Hill.
- Mujal Rosas, R. (2009). *Tecnología eléctrica*. Ediciones UPC.
- Roger Folch, J., Riera Guasp, M. y Roldán Porta, C. (2002). *Tecnología eléctrica*. Editorial Síntesis.

