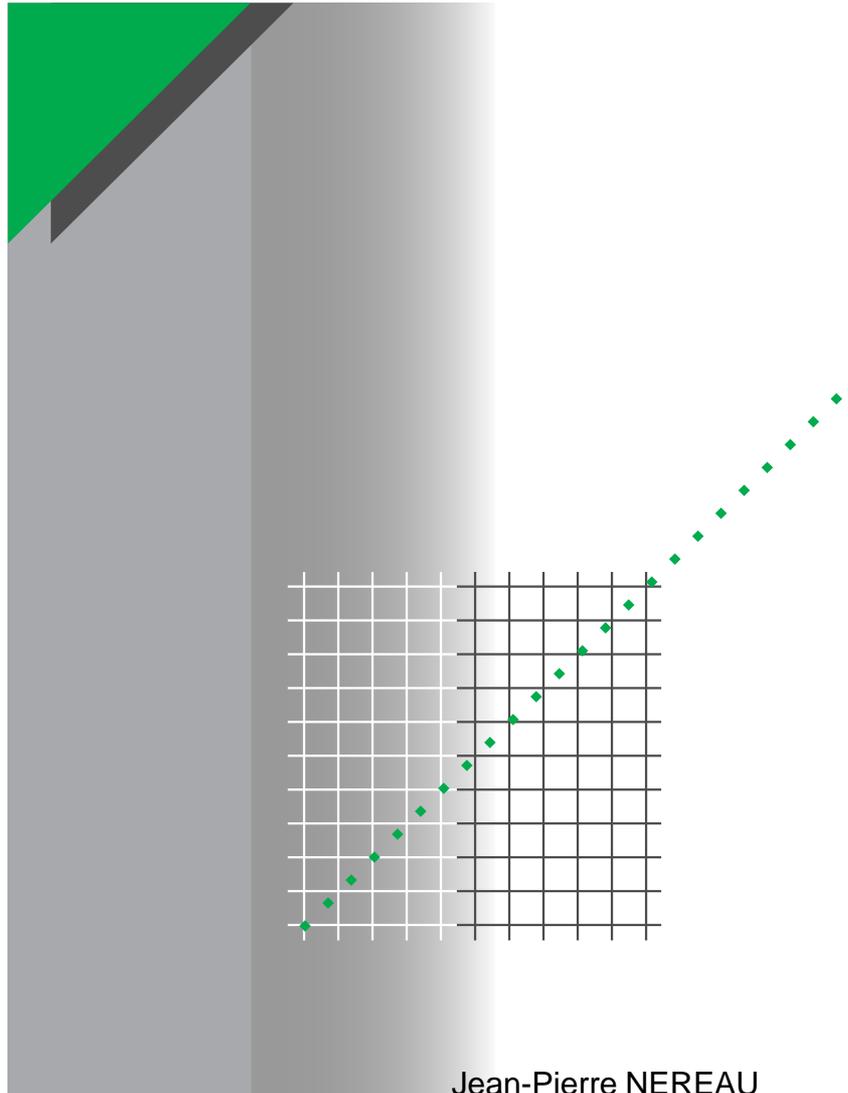


# Cuaderno Técnico nº 201

## Selectividad con los interruptores automáticos de potencia BT



- Merlin Gerin
- Eunea Merlin Gerin
- Modicon
- Telemecanique
- Mesa
- Himel
- Square D

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>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.** o bien dirigirse a:

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](mailto: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 201 de Schneider Electric».

# Cuaderno Técnico nº 201

## Selectividad con los interruptores automáticos de potencia BT



**Jean-Pierre NEREAU**

Ingeniero IEG, entró en Merlin Gerin en 1981; su trabajo en el Bureau d'Etudes de la actividad de Aparamenta BT le llevó a desarrollar productos, especialmente en la gama de los interruptores automáticos de caja moldeada y después en la de interruptores de potencia.

Actualmente es el responsable del Bureau d'Etudes Avancé de Schneider Electric para esta actividad.

Trad.: J.M. Giró

Original francés: junio 2000

Versión española: febrero 2001



## Terminología

---

**Calibre:**

Corriente ( $=I_n$ ) correspondiente al ajuste máximo del relé.

**Relé instantáneo:**

Relé que no tiene ningún dispositivo de retardo intencionado (protección contra los cortocircuitos).

**Relé de largo retardo (LR):**

Relé que tiene un dispositivo de retardo intencionado de varios segundos (protección contra sobrecargas). Normalmente este retardo depende de la corriente.

**Relé de corto retardo (CR):**

Relé que tiene un dispositivo de retardo intencionado de algunas decenas a algunas centenas de milisegundos.

**DIN:**

Relé instantáneo de autoprotección. Por semejanza, el umbral correspondiente.

**DINF:**

Relé instantáneo de autoprotección al cierre. Por semejanza, el umbral correspondiente.

**Interruptor automático limitador:**

Interruptor automático que durante el corte de una corriente de cortocircuito, limita la corriente a un valor sensiblemente inferior a la corriente presunta.

**Interruptor automático selectivo:**

Interruptor automático con gran  $I_{cw}$  (capaz de soportar la corriente de cortocircuito durante varios centenares de milisegundos).

**Filiación:**

Utilización de la limitación del interruptor automático aguas arriba para aumentar el poder de corte real del aparato aguas abajo. Permite utilizar aguas abajo de un interruptor limitador interruptores automáticos con un poder de corte inferior a la corriente de cortocircuito presunta.

 **$I_{cc}$ :**

Corriente de cortocircuito (dada en valor de cresta) que atraviesa realmente el interruptor automático teniendo en cuenta la limitación.

 **$I_{cw}$ :**

Corriente de corta duración admisible. Es la corriente máxima de cortocircuito (valor eficaz) que puede soportar el interruptor automático durante un tiempo definido (0,5 ó 1 ó 3 s) sin alteración de sus características.

 **$I_n$ :**

Corriente nominal del aparato.

 **$I_p$ :**

Corriente de cortocircuito presunta que se desarrollaría en ausencia de dispositivos de protección (valor eficaz).

 **$I_r$ :**

Corriente (en valor eficaz) que corresponde al ajuste de la protección contra sobrecargas. Normalmente puede variar entre 0,4 a 1 veces  $I_n$ .

 **$t_c$ :**

Tiempo real de corte (extinción del arco).

**IDMTL:**

(Inverse Definite Minimum Time Lag). Característica que se dice de las curvas de disparo de largo retardo cuya pendiente puede tomar diversos valores (ver § Los relés de curva «IDMTL»).

**Poder de corte (PdC):**

Es el nombre usual del poder de corte último ( $I_{cu}$ ).  $I_{cu}$  es la mayor intensidad de corriente de cortocircuito que puede cortar el interruptor automático. Se define para la tensión asignada de empleo dada  $U_e$ .

**Selectividad parcial:**

La selectividad es parcial cuando queda asegurada hasta el valor de corriente  $I_p$  inferior al poder de cortocircuito de la instalación.

**Selectividad total:**

La selectividad es total cuando queda asegurada hasta el poder de cortocircuito de la instalación.

**Sellim:**

Principio de selectividad que permite hacer trabajar conjuntamente la selectividad y la limitación.

**Resistencia electrodinámica (TED):**

Capacidad de un aparato para soportar por construcción los efectos electrodinámicos de una corriente de cortocircuito, especialmente sin repulsión o conexión de los contactos principales.

# Selectividad con los interruptores automáticos de potencia BT

El objetivo de este Cuaderno Técnico es presentar las técnicas de selectividad específicas de los interruptores automáticos de potencia BT.

Estos aparatos se caracterizan por su gran calibre (800 A a 6 300 A) y su situación en cabeza de la instalación BT, instalados generalmente a continuación de un transformador MT/BT.

Esta situación justifica las exigencias de selectividad que se le aplican. Después de repasar las técnicas de selectividad se citará la estrecha relación que existe entre la selectividad y las características generales de los interruptores automáticos y por último se darán algunos ejemplos prácticos sobre la elección de los aparatos a instalar.

|  |  |              |
|--|--|--------------|
| <b>1 La selectividad en BT</b>   | 1.1 Introducción   | <b>p. 6</b>  |
|  | 1.2 La selectividad en función de los tipos de defecto     | p. 6         |
| <b>2 Las técnicas de selectividad con cortocircuitos</b>   | 2.1 Selectividad amperimétrica                             | <b>p. 8</b>  |
|  | 2.2 Selectividad cronométrica                              | p. 9         |
|  | 2.3 Selectividad pseudo-cronométrica                       | p. 9         |
|  | 2.4 Selectividad «SELLIM» y selectividad energética        | p. 10        |
|  | 2.5 Selectividad lógica                                    | p. 10        |
|  | 2.6 Utilización de los diferentes tipos de selectividad    | p. 11        |
| <b>3 Selectividad con los interruptores automáticos de potencia</b>                                  | 3.1 Características de un interruptor automático           | <b>p. 12</b> |
|  | 3.2 Características del relé de disparo                    | p. 15        |
|  | 3.3 Selectividad al cierre                                 | p. 20        |
| <b>4 Caso de aplicación: ejemplos de elección de interruptores automáticos en una instalación BT</b> | 4.1 Presentación de la instalación estudiada               | <b>p. 21</b> |
|  | 4.2 Dimensionamiento de los aparatos de protección         | p. 22        |
|  | 4.3 Elección de los aparatos para asegurar la selectividad | p. 22        |
|  | 4.4 Variante con selectividad lógica                       | p. 25        |
|  | 4.5 Variante con dos entradas más potentes                 | p. 27        |
| <b>Bibliografía</b>  |  | <b>p. 29</b> |

# 1 La selectividad en BT

## 1.1 Introducción

En una distribución radial (**figura 1**) el objetivo de la selectividad es desconectar de la red el receptor o la derivación de salida defectuosa y sólo ésta, manteniendo en servicio la mayor parte posible de la instalación.

Permite también aunar seguridad y continuidad del servicio facilitando la localización de los defectos. Es un concepto especialmente importante para los aparatos de gran potencia y, puesto que están instalados en cabeza de la instalación, su disparo injustificado tiene consecuencias muy graves.

La selectividad es total si queda garantizada para cualquier valor de corriente de defecto hasta el valor máximo disponible en la instalación.

En caso contrario se llama «selectividad parcial».

Los defectos que se producen en una instalación son de diversos tipos:

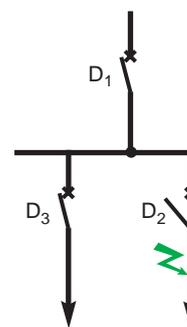
- sobrecarga,
- cortocircuito,

pero también:

- derivaciones de corriente a tierra,
- bajadas de tensión o incluso cortes momentáneos de la alimentación.

A cada tipo de defecto le corresponde un tipo de dispositivo de protección específico (protección contra las corrientes de sobrecarga, de cortocircuito, de defecto a tierra o contra los cortes de alimentación...).

Cada uno de estos defectos puede provocar una pérdida de selectividad si no se tiene presente la coordinación de los dispositivos de protección.



**Fig. 1:** Selectividad.

## 1.2 La selectividad en función de los tipos de defecto

Las técnicas de instalación de la selectividad se han de adaptar a los diversos fenómenos que se producen, según el tipo de defecto.

### Sobrecargas

Estas sobrecorrientes están comprendidas entre 1 y 10 veces la intensidad de servicio. Su eliminación debe hacerse en un tiempo compatible con la resistencia térmica de los conductores afectados. El tiempo de disparo es generalmente inversamente proporcional al cuadrado de la corriente (disparo llamado «a tiempo inverso»).

La selectividad de los interruptores automáticos se aplica comparando las curvas tiempo/intensidad de los disparos de largo retardo afectados por el defecto (**figura 2**).

Esta selectividad queda asegurada si, para cualquier valor de la corriente de sobrecarga, el tiempo de no disparo del interruptor aguas arriba,  $D_1$ , es superior al tiempo máximo de corte del interruptor automático  $D_2$  (incluido el tiempo de extinción del arco). Esta condición se cumple en la práctica si la razón  $I_{r1}/I_{r2}$  es mayor que 1,6.

### Cortocircuitos

Debido a la amplitud de las corrientes de cortocircuito y sobre todo a la presencia de los arcos eléctricos que normalmente le acompañan, los circuitos afectados deben de quedar interrumpidos casi instantáneamente, en menos de algunas centenas de milisegundos.

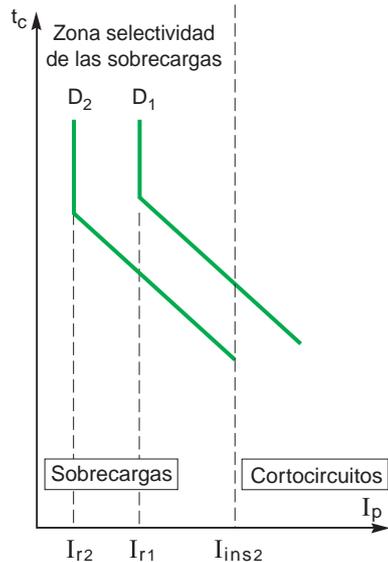


Fig. 2: Selectividad en la zona de sobrecargas.

La selectividad puede tratarse, en parte, comparando las curvas tiempo/corriente en tanto que el tiempo  $t_c$  sea mayor que algunas decenas de milisegundo.

Pero, por una parte, estas curvas son un instrumento insuficientemente preciso para trabajar con exactitud.

Por otra, los tiempos y corrientes no son el único criterio de discriminación. Según los casos, hay que tener presente la corriente de cresta, de la limitación, o de la combinación de tiempo y de corriente (por ejemplo,  $\int i^2 dt$ ).

Por tanto, es necesario referirse a las tablas de selectividad publicadas por los fabricantes de los interruptores automáticos instalados.

Las técnicas que permiten obtener la selectividad frente al cortocircuito entre dos interruptores automáticos son variadas y se presentan en el capítulo siguiente.

### Corrientes de fuga a tierra

Aquí también hay que tener presente la selectividad para evitar que un defecto de aislamiento en un punto cualquiera de la instalación produzca un disparo intempestivo en los aparatos de cabeza.

Existen dos grandes familias de protección contra corrientes de fuga. Para los valores de corriente bajos o muy bajos (típicamente 30 mA a 30 A), se utiliza un captador que abarca todos los conductores activos. Este captador realiza de forma natural la suma

vectorial de corriente y entrega una señal proporcional a la corriente de defecto. En efecto, cuando hay una corriente de defecto a tierra (o a masa) conduce la suma de  $I_1 + I_2 + I_3 + I_n$  que será diferente de cero. Este sistema se denomina generalmente «protección diferencial» o «vigi». Para valores de corriente de fuga mayores, superiores al 20% de la corriente nominal, se utiliza un captador para cada conductor activo. El sistema, que se denomina simplemente «protección de tierra» (en inglés: «ground fault») efectúa la suma de las señales entregadas por cada uno de los captadores. En los dos casos, la selectividad se trata diferenciando los umbrales y las temporizaciones. Se puede controlar por las curvas tiempo/corriente (figura 3).

### Bajadas y cortes de tensión

Pueden estar producidos por un cortocircuito en la instalación o por un defecto aguas arriba de ésta y provocar el disparo de los aparatos en cabeza si están dotados de relés de falta de red o de tensión mínima.

La solución consiste en utilizar relés de falta de tensión o de tensión mínima temporizados, cuyo tiempo de actuación deberá ser superior al tiempo de disparo por cortocircuito de los aparatos situados aguas abajo.

Aunque no sean temporizados, los relés de falta de tensión o de tensión mínima deben estar inmunizados frente a cortes de tensión de una decena de milisegundo aproximadamente para no verse afectados cuando los cortocircuitos son eliminados por los aparatos situados junto a los receptores.

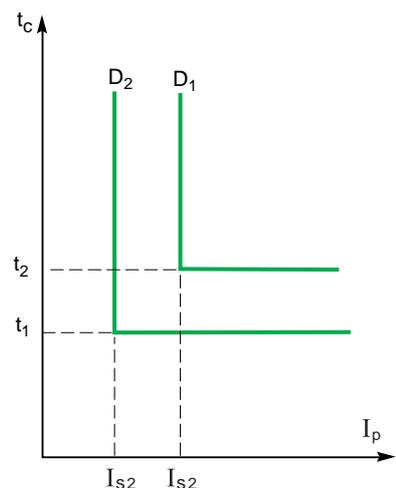


Fig. 3.

## 2 Las técnicas de selectividad con cortocircuitos

Mejorar la selectividad consiste normalmente en «frenar» el disparo de un determinado interruptor automático respecto al de los interruptores automáticos situados aguas abajo en la instalación.

Este objetivo se consigue:

- o ajustando de forma diferente los umbrales de disparo (es la **selectividad amperimétrica**),
- o retardando algunas decenas o centenas de milisegundos el disparo del interruptor aguas arriba (es lo que se llama **selectividad cronométrica**),

■ o utilizando criterios de discriminación más elaborados, por ejemplo la detección de un número de ondas de corriente, o la forma de estas ondas ( $\int i dt$ ,  $\int i^2 dt$ , etc.), (es lo que se

llama **selectividad «Sellim»** y **selectividad «energética»**),

■ informando un interruptor automático al otro, de que ha sobrepasado su umbral (es lo que se llama **selectividad lógica**).

### 2.1 Selectividad amperimétrica

Se obtiene ajustando los umbrales de disparo de los relés instantáneos o de corto retardo de los interruptores automáticos en serie dentro del circuito.

Se utiliza normalmente en el caso de defectos de cortocircuito y lleva generalmente, si no va asociada a otra selectividad (cronométrica, Sellim o energética), a una selectividad parcial limitada al umbral de actuación del aparato aguas arriba (**figura 4**).

La selectividad queda asegurada si el umbral máximo del relé del aparato aguas abajo es inferior al umbral mínimo del aparato aguas arriba, incluidas todas las tolerancias.

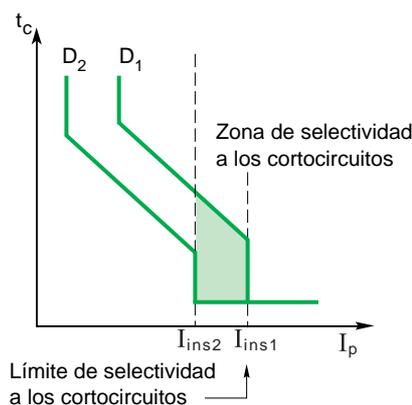


Fig. 4: Selectividad amperimétrica.

## 2.2 Selectividad cronométrica

Para asegurar la selectividad más allá del margen de corto retardo ( $I_{CR1}$ ) del aparato aguas arriba, es posible utilizar una temporización, ajustable o no, del relé del aparato aguas arriba,  $D_1$  (figura 5).

Esta solución no puede adaptarse si no es con la condición de que el aparato pueda soportar la corriente de cortocircuito durante el tiempo de la temporización. Por tanto, solamente puede utilizarse con los aparatos de gran resistencia electrodinámica, llamados también «selectivos».

Con dos interruptores automáticos en serie, las dos posiciones de temporización, cuando existen, se ajustan de tal manera que sean selectivas entre ellas. El tiempo máximo de actuación en una posición de ajuste determinada, incluido el tiempo de corte, debe de ser menor que el tiempo mínimo de detección de la siguiente posición de ajuste.

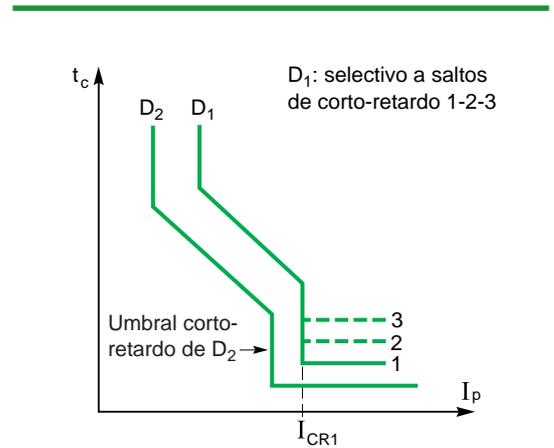


Fig. 5: Selectividad cronométrica.

## 2.3 Selectividad pseudocronométrica

Cuando se utiliza aguas abajo un interruptor automático limitador, la corriente de cortocircuito real queda muy reducida en amplitud y en duración, tanto más cuanto mayor sea la corriente presunta. El relé del aparato situado aguas arriba ve por tanto una corriente mucho menor que si no existiera este tipo de interruptor aguas abajo.

Esto puede traducirse en la curva de disparo tiempo/corriente del aparato aguas abajo en un tiempo «equivalente» que disminuye sensiblemente cuando la corriente de cortocircuito prevista aumenta.

La comparación con la curva de detección del aparato pone en evidencia la selectividad de los dos aparatos. Se califica de pseudocronométrica porque no utiliza un retardo intencionado (figura 6).

Esta solución, por su efecto de limitación y la rápida eliminación del defecto, permite además limitar los esfuerzos térmicos y electrodinámicos en la instalación.

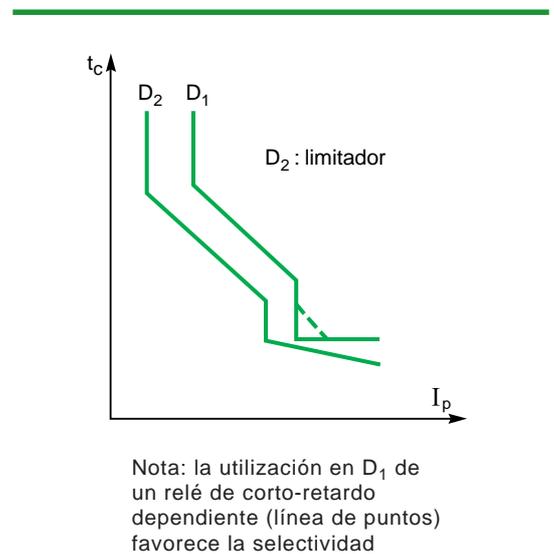


Fig. 6: Selectividad pseudocronométrica.

## 2.4 Selectividad «SELLIM» y selectividad energética

Estos principios, desarrollados por Schneider Electric, son especialmente útiles para aparatos de media potencia (100 a 630 A) donde la limitación es una necesidad. En efecto, estos aparatos, con una repulsión electrodinámica muy activa, no pueden soportar una temporización de varias centenas de milisegundo. La selectividad cronométrica con el interruptor automático aguas abajo no puede por tanto utilizarse, o queda limitada a un valor de corriente muy bajo.

La solución consiste en utilizar criterios de disparo más elaborados que el simple valor de la corriente y el tiempo, en general una combinación de estas dos magnitudes, por ejemplo:  $\int i^2 dt$ .

El tipo de criterio, así como el valor de ajuste, se adaptan con mucha exactitud a la combinación aguas arriba/aguas abajo de los aparatos considerados.

Permiten garantizar la selectividad en varios escalones, limitando considerablemente los esfuerzos térmicos y electrodinámicos en la instalación.

Esta selectividad se instala con interruptores automáticos Compact NS de la marca Merlin Gerin.

Para más explicaciones, el lector interesado puede consultar el Cuaderno Técnico nº 167: «La selectividad energética en BT».

## 2.5 Selectividad lógica

Este sistema requiere la transferencia de información entre los relés de los interruptores automáticos de los diferentes escalones de la distribución.

Su principio es sencillo (figura 7):

- un relé que ve una corriente mayor que su umbral de funcionamiento envía una orden lógica de temporización al relé del interruptor automático inmediatamente superior a él. La temporización será la fijada en el relé,
- el relé del interruptor automático situado inmediatamente aguas arriba del cortocircuito, puesto que no recibe orden de espera, actúa inmediatamente, sea cual sea su temporización.

La selectividad lógica es un aditivo a la selectividad cronométrica. Permite reducir los tiempos de eliminación de los defectos, lo que reduce considerablemente las sobrecargas sobre la instalación. Se aplica a los interruptores automáticos BT selectivos de

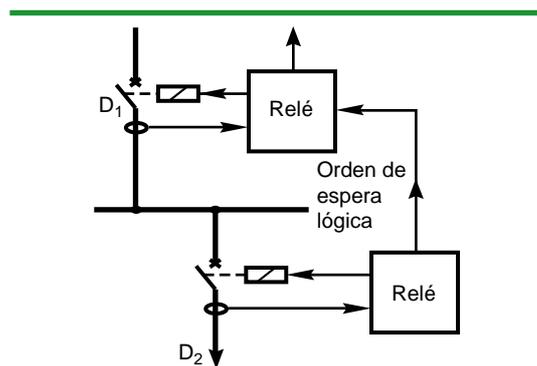


Fig. 7: Selectividad lógica.

gran intensidad, pero también se está utilizando en las redes AT industriales. Necesita relés que sean compatibles entre sí. Para más detalle, ver el Cuaderno Técnico titulado «Protección de redes mediante el sistema de la selectividad lógica».

## 2.6 Utilización de los diferentes tipos de selectividad

La elección de un tipo de selectividad en una distribución eléctrica se hace en función del tipo de aparato y de su situación en la instalación. Para obtener la mejor disponibilidad de la energía eléctrica, pueden

combinarse diferentes técnicas entre cada dos aparatos; ver, a título de ejemplo, la **figura 8**.

La selectividad amperimétrica es, en todos los casos, el primer objetivo a conseguir.

| Circuito                 | Tipo de selectividad |                       |              |                     |                     | Tipo de interruptor automático |
|--------------------------|----------------------|-----------------------|--------------|---------------------|---------------------|--------------------------------|
|                          | Amperimétrico        | Cronométrico + lógico | Cronométrico | Pseudo-cronométrico | Sellim y energético |                                |
| Origen de la instalación |                      |                       |              |                     |                     | Selectivo                      |
| Distribución de potencia |                      |                       |              |                     |                     | Limitador                      |
| Distribución terminal    |                      |                       |              |                     |                     | Limitador                      |

**Fig. 8:** Ejemplo de utilización de diferentes tipos de selectividad.

## 3 Selectividad con los interruptores automáticos de potencia

Los interruptores automáticos de potencia BT, por su posición en cabeza de la instalación, están especialmente diseñados para conseguir los objetivos de selectividad.

Su robustez natural lleva a utilizar principalmente, en caso de cortocircuito, la selectividad cronométrica. Esto no excluye la utilización, como complemento, de la selectividad «pseudo-cronométrica» (interruptor automático limitador aguas abajo de un interruptor automático selectivo) y de la selectividad lógica (cableado lógico entre los diferentes niveles de la distribución).

En este capítulo se analizarán las características que tienen influencia en esta selectividad, considerando en primer lugar las del interruptor automático en sí mismo y a continuación las del relé que se le asocia.

El caso particular de la selectividad cuando se cierra un interruptor automático se tratará después, con las características que lo determinan.

### 3.1 Características de un interruptor automático

#### Corriente de corta duración admisible ( $I_{cw}$ )

##### ■ Descripción

La corriente de corta duración admisible ( $I_{cw}$ ) caracteriza la capacidad de los aparatos de soportar las corrientes de cortocircuito, eventualmente elevadas, durante una duración suficiente para eliminarlas mediante los interruptores automáticos o dispositivos de protección situados aguas abajo. Esto es por tanto una característica esencial del interruptor automático de potencia que se encuentra normalmente en cabeza de la instalación.

Cuanto mayor sea la  $I_{cw}$ , mayor será el límite de utilización de la selectividad cronométrica. Y esto porque los aparatos con  $I_{cw}$  elevada se califican normalmente como de «selectivos».

Hay que tener en cuenta que es necesario que tanto el cuadro en el que está instalado el aparato como todos los conductores situados aguas arriba, sean capaces de soportar estas corrientes.

Las corrientes de cortocircuito producen 2 tipos de fenómenos:

□ los **esfuerzos electrodinámicos** entre las diferentes partes del circuito recorrido por una corriente.

Estos esfuerzos son de repulsión o atracción según los sentidos respectivos de las corrientes; se manifiestan instantáneamente y la resistencia del aparato a estos esfuerzos, llamada «resistencia electrodinámica» (TDE) estará caracterizada por el valor máximo

instantáneo de la corriente que puede soportar, medido en kA «de cresta».

Más allá de este valor se producen deformaciones irreversibles en las piezas o arcos eléctricos que pueden perjudicar las piezas afectadas.

□ un **calentamiento** de las piezas recorridas por la corriente.

Este calentamiento no es función del valor instantáneo de la corriente, sino de su valor eficaz y de su duración; la resistencia del aparato a estos fenómenos puede por tanto expresarse en  $kA_{ef}$  y en segundos.

La «corriente de corta duración admisible» está definida en varias normas y entre ellas la CEI 60947-2 que le asigna el símbolo « $I_{cw}$ ».

El ensayo asociado permite probar el comportamiento del aparato a la vez bajo el aspecto electrodinámico, cuando se produce un cortocircuito, y bajo el aspecto térmico, manteniendo la corriente durante un tiempo determinado (normalmente de 0,5 s, 1 s ó 3 s). La corriente máxima de cresta la define la norma en función de la corriente eficaz; el conocimiento de esta última es suficiente para definir la  $I_{cw}$ . Es evidente que el valor de  $I_{cw}$  queda limitado por los más severos fenómenos, sea electrodinámicos o térmicos y que su valor disminuye por tanto normalmente cuando aumenta su duración: una  $I_{cw}$  durante 3 segundos es térmicamente 9 veces peor que una  $I_{cw}$  durante 1 segundo. Por tanto, es la resistencia térmica la que determina

habitualmente la  $I_{CW}$  de 0,5 s, quedando los efectos térmicos controlados.

El valor de  $I_{CW}$  a tener en cuenta para la selectividad es el que corresponde al tiempo máximo de ajuste del relé de corto retardo, normalmente de 0,5 s. En general, este valor está determinado directamente por la resistencia electrodinámica, por tanto, los efectos térmicos quedan fácilmente controlados. Los valores de 1 s y hasta 3 s no son más que indicación de una robustez adicional.

### ■ Disposiciones constructivas

Para conseguir una buena  $I_{CW}$ , hace falta:

□ una construcción robusta y rígida del aparato que asegure un mantenimiento eficaz de las piezas que transportan la corriente. La utilización de cajas moldeadas en poliéster termoendurecido permite actualmente una notable mejora de la rigidez estructural de los interruptores automáticos respecto a las técnicas anteriores de construcción a base de piezas metálicas cortadas, dobladas y encajadas,

□ una gran rigidez del mecanismo para mantener la posición cerrada de los contactos,

□ una disposición especial de los contactos móviles y de las pinzas de conexión que aseguren una compensación automática de los esfuerzos de repulsión producidos entre los puntos de los contactos (**figura 9**):

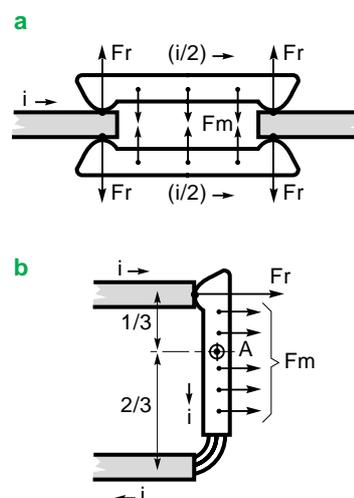
– las pinzas están constituidas por dedos situados a cada lado de los conductores a unir; por estos dedos circulan corrientes paralelas que crean un esfuerzo de atracción,  $F_m$ , que compensa los esfuerzos de repulsión,  $F_r$ , producidos en los contactos (**figura 9a**);

– los contactos móviles tienen un eje de articulación situado aproximadamente a un tercio de la distancia que separa los conductores de conexión. Así, la resultante de los esfuerzos de repulsión,  $F_m$ , producidos por el bucle de corriente crea en los contactos un par que compensa el generado por la repulsión,  $F_r$ , en los puntos de contacto (**figura 9b**).

Sin embargo, la compensación de esfuerzos tiene el efecto de aumentar las fuerzas transmitidas al mecanismo, lo que constituye una exigencia restrictiva para el fabricante,

□ un dimensionamiento generoso de la sección del circuito de potencia para evitar alcanzar una temperatura excesiva cuando la temporización del relé se ajusta a su valor,

□ la utilización de sustancias moldeadas termoendurecibles (sin punto de fusión), o de



**Fig. 9:** Disposiciones constructivas que aseguran la compensación de los esfuerzos de repulsión en un interruptor automático.

técnicas termoplásticas de alto punto de fusión en las zonas próximas al circuito de potencia.

### Poder de corte (PdC)

#### ■ Descripción

Para poder utilizar un interruptor automático en un circuito dado, su poder de corte último ( $I_{CU}$ ) debe de ser superior al poder de cortocircuito previsto de este circuito en el punto considerado.

Normalmente, en los interruptores automáticos de potencia BT, este poder de corte es igual a  $I_{CW}$  en 0,5 segundos. En este caso, la selectividad cronométrica puede ajustarse hasta el poder de corte, puesto que el aparato es capaz de soportar estas corrientes durante el tiempo correspondiente. Por tanto, se tiene una selectividad total.

Sin embargo, los valores de  $I_{CW}$  alcanzados, incluso con los mejores modelos, resultan actual y normalmente limitados a un valor aproximado de 85 kA<sub>ef</sub>, limitando por tanto los poderes de corte. Ahora bien, cada vez son más las instalaciones que pueden producir corrientes de cortocircuito superiores a este valor, alcanzando ciertos casos 150 kA o incluso más. Se da este caso en instalaciones que tienen varios transformadores de gran potencia en paralelo o redes en forma de bucle con múltiples generadores.

La respuesta a esta necesidad suele ser la utilización de interruptores automáticos con un **poder de corte superior a  $I_{CW}$** .

### ■ Exigencias constructivas de los aparatos con un poder de corte superior a su $I_{CW}$ :

Los interruptores automáticos cuyo poder de corte es superior a  $I_{CW}/05$  s necesitan, para su autoprotección, un disparo instantáneo (DIN) desde que la corriente supera su resistencia electrodinámica, porque no podrían resistir durante varios centenares de milisegundos los arcos de esta intensidad producidos durante la repulsión de los contactos.

Sin embargo, esta condición no es suficiente por sí misma y el control del poder de corte de estos aparatos requiere la colaboración de los especialistas en la interrupción de los arcos eléctricos.

En concreto, en estos aparatos, puesto que no son limitadores, la corriente puede alcanzar, durante el corte de fuertes corrientes de cortocircuito, un régimen asimétrico de unas 2,3 veces el valor eficaz de la corriente presunta, o sea, 230 kA de cresta en el caso de un cortocircuito presunto de 100 kA<sub>ef</sub> (figura 10). Por tanto, aparecen importantes esfuerzos electrodinámicos en el seno del aparato y sus consecuencias aumentan sobremanera al producirse el corte efectivo precisamente en el momento en que estos esfuerzos son máximos.

Estas consideraciones limitan el poder de corte máximo que se puede alcanzar con aparatos de gran  $I_{CW}$ , y sólo una construcción extremadamente resistente unida a un perfecto control de los fenómenos asociados al corte de corrientes de gran valor permite obtener valores superiores a 100 kA<sub>ef</sub>.

Los aparatos Masterpact NW del tipo H3, de la marca Merlin Gerin, que ofrecen un poder de corte de 150 kA con 440 V para un  $I_{CW}$  de 65 kA/3 s son un ejemplo significativo de este saber-hacer.

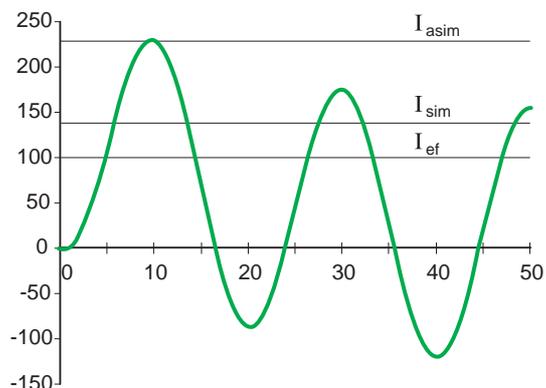
Hay que tener presente en este caso que la resistencia del cuadro y de la instalación requieren también una construcción muy robusta de los juegos de barras y de sus soportes. La utilización de cuadros BT montados y probados en fábrica según la norma CEI 439, garantiza la fiabilidad de esta construcción (Cuaderno Técnico nº 162).

### ■ Aparatos limitadores

Cuando el poder de corte máximo anunciado por el fabricante, con aparatos de gran  $I_{CW}$ , es insuficiente, no queda otra solución que utilizar **interruptores automáticos limitadores**, que tienen habitualmente un poder de corte que llega hasta los 150 kA a 400 V.

Por su propio principio de funcionamiento, estos aparatos limitan el valor máximo alcanzado por la corriente, y aseguran un gran poder de corte, reduciendo al mismo tiempo

a: corte asimétrico



b: corte simétrico

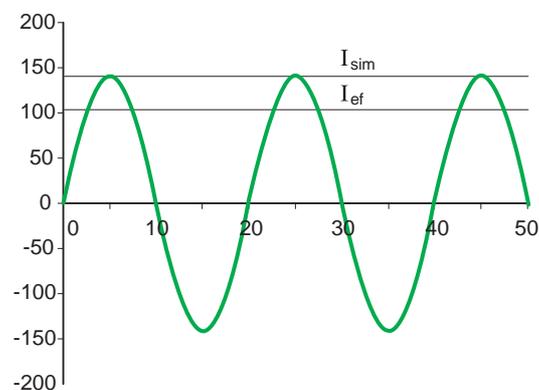


Fig. 10: Cronograma de corriente en el caso de una conexión asimétrica o simétrica.

los efectos del cortocircuito tanto en la instalación como en el propio aparato.

Los interruptores automáticos limitadores de gran calibre tienen sin embargo un handicap, respecto a la selectividad con los aparatos situados aguas abajo, porque su TED es siempre relativamente baja. En efecto, la limitación se obtiene habitualmente utilizando el efecto de repulsión electrodinámica de los contactos, que está directamente opuesto con la TED. El umbral de disparo del relé instantáneo de autoprotección (DIN) debe entonces situarse muy bajo, lo que limita la selectividad aguas abajo a valores muy bajos, **salvo que se utilicen criterios de disparo muy elaborados** (Cuaderno Técnico nº 167: «La selectividad energética en BT»).

Más aún, un diseño hábil de los interruptores automáticos limitadores de potencia puede

permitir anunciar un gran poder de corte y una gran limitación garantizando también una buena TED.

Este es el caso notable de los aparatos Masterpact NW limitadores, de la marca Merlin Gerin cuyo TED alcanza los **37 kA<sub>ef</sub>**! Sin embargo, esta TED no será nunca tan grande como con un aparato no limitador.

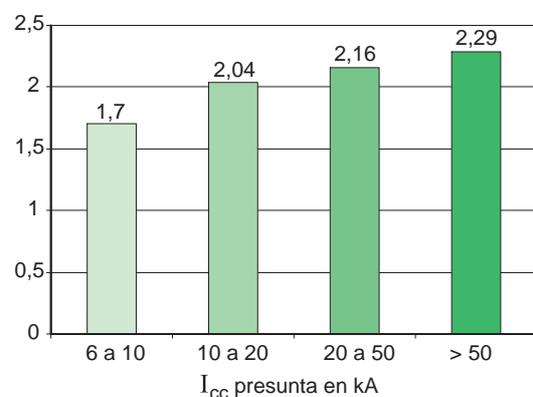
Se constata de esta manera el poder de corte máximo de los aparatos con gran I<sub>CW</sub>, que evita el recurso a aparatos limitadores en cabeza de la instalación, es un elemento fundamental de la selectividad.

### Limitación

El poder instantáneo de una corriente alterna senoidal en régimen permanente, oscila entre  $+\sqrt{2}$  y  $-\sqrt{2}$  veces su valor eficaz.

Durante la actuación, este valor instantáneo puede alcanzar, en una primera onda, alrededor de 2,3 veces el valor eficaz debido a la asimetría de la corriente. El valor real depende de la inductancia del circuito; en la práctica, depende también del nivel de cortocircuito considerado y aumenta con éste.

Si el interruptor automático en cabeza de la instalación está dotado de un relé instantáneo de autoprotección (DIN), porque su poder de



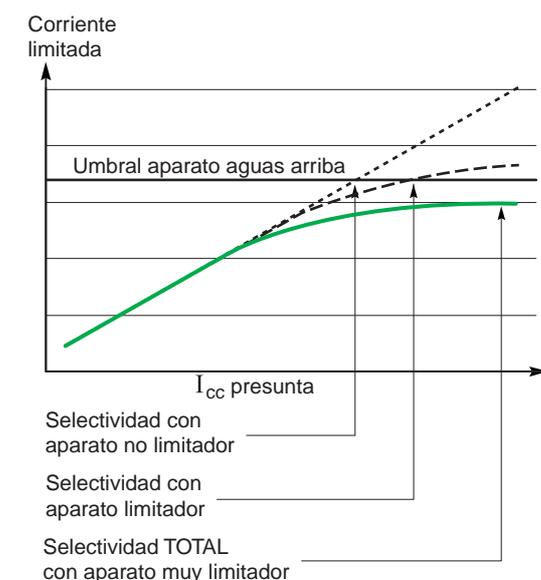
**Fig. 11:** Coeficientes de asimetría en función de la corriente eficaz presunta según la norma CEI 60947-1.

corte es superior a su I<sub>CW</sub>, la selectividad con el aparato aguas abajo queda limitada por la presencia de este relé instantáneo.

Conociendo el valor de su ajuste (en kA de cresta) es suficiente dividir este valor por el coeficiente de asimetría (figura 11) para conocer el límite de selectividad (en kA<sub>ef</sub>).

Sin embargo, si el aparato situado aguas abajo del interruptor automático considerado es limitador y si el cortocircuito tiene lugar aguas abajo de este aparato limitador, el valor instantáneo máximo mencionado antes no se alcanza. En este caso, el límite de selectividad conseguido aumenta, tanto más cuanto mayor sea el poder de limitación del interruptor situado aguas abajo (selectividad pseudo-cronométrica).

Por el contrario, si la corriente máxima limitada por el interruptor automático aguas abajo es inferior al margen instantáneo del aparato aguas arriba, la selectividad entre los 2 aparatos es total (figura 12).



**Fig. 12:** Obtención de una selectividad parcial o total entre dos aparatos, en función del poder de limitación del aparato aguas abajo.

## 3.2 Características del relé de disparo

### Funciones del relé

El potencial de selectividad de un aparato no puede utilizarse plenamente más que utilizando relés adecuados.

### Tipos de relés

Hoy en día, para aparatos de gran calibre, los relés son siempre electrónicos.

Existen varios tipos según sus posibilidades de ajuste:

□ **Los relés simples**, tienen normalmente una curva a tiempo inverso de margen ajustable para las protecciones contra sobrecargas y un margen de disparo instantáneo (< 10 ms), también ajustable, para la protección contra cortocircuitos.

Este margen instantáneo tiene normalmente un valor máximo de 10 a 12  $I_n$ .

Es este el valor máximo, que **limita la selectividad real**, que puede conseguirse con este relé.

□ **Relés llamados «selectivos»**, tienen otro umbral de disparo temporizado, regulable en valor y en temporización (de 0 a 500 ms) y un relé instantáneo ajustable hasta el valor máximo admisible para el aparato (**figura 13**).

Si la  $I_{cw}$  del interruptor automático es igual a su poder de corte, este valor puede resultar «infinito» u «off» (es decir, que nunca habrá un disparo instantáneo - ver § Poder de corte).

**La selectividad es entonces total**, con la condición de que el relé instantáneo esté efectivamente ajustado a esta posición «off». En caso contrario, la selectividad real queda limitada por los valores ajustados como antes se ha dicho.

Si la  $I_{cw}$  es inferior al poder de corte, este umbral instantáneo puede sin embargo ser muy elevado (mucho más que 12  $I_n$ ) si la TED es elevada (ver § Poder de corte). **La selectividad es entonces parcial**, hasta que la corriente eficaz corresponde a este margen instantáneo, **o puede llegar a ser total**, si el dispositivo de protección aguas abajo es suficientemente limitador para que este valor no se alcance nunca (ver § Limitación).

Por debajo de este valor, se utilizará la selectividad cronométrica: el aparato del 3<sup>er</sup>

escalón se temporizará, por ejemplo, a 100 ms; el del 2<sup>o</sup> nivel a 200 ms, y el del 1<sup>er</sup> nivel a 300 ms.

□ **Los relés con «selectividad lógica»**. Un cable de conexión conecta los relés de los interruptores automáticos de un mismo circuito. Si un relé detecta un cortocircuito envía al relé aguas arriba una orden de temporización. Él mismo disparará instantáneamente en cuanto se rebase su umbral de corto retardo (sea el que sea el ajuste de la temporización) si no ha recibido una orden de esperar proveniente de un relé aguas abajo.

Esta función no modifica las reglas de la selectividad, pero reduce los efectos en la instalación porque el interruptor automático inmediatamente superior al defecto disparará siempre instantáneamente.

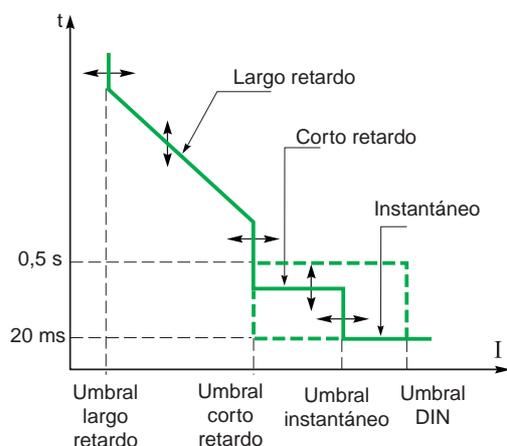
### Precisión del relé de autoprotección

#### ■ Descripción

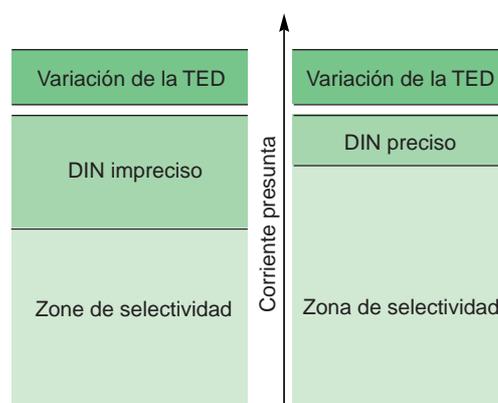
Como hemos visto anteriormente (al final del § Limitación), un interruptor automático cuyo poder de corte es superior a  $I_{cw}$  necesita para su propia protección un relé instantáneo (DIN).

El umbral DIN debe seleccionarse de manera que en las peores condiciones de tolerancia posible, resulte inferior a la resistencia última del interruptor automático. En concreto, hay que prestar una atención especial a la tolerancia de la cadena de medida de corriente.

Si esta tolerancia es ancha, el umbral nominal deberá reducirse en la misma proporción. Por el contrario, si este sistema de medida es muy exacto, el umbral nominal podrá situarse mucho más cerca del valor límite de la resistencia del aparato (**figura 14**).



**Fig. 13:** Curva de desconexión de un interruptor automático indicando los parámetros de ajuste.



**Fig. 14:** Influencia de la precisión de la línea de medida de corriente en un interruptor automático selectivo.

### ■ Precisión de la línea de medida

La precisión del sistema de medida depende de la precisión de los captadores. Con los interruptores automáticos, se utilizan dos grandes familias de captadores:

□ los transformadores de corriente con circuito magnético (figura 15).

Esta tecnología, la más antigua, ofrece una precisión satisfactoria en el caso de aparatos que tienen un valor bajo de TED. Estos transformadores tienen un arrollamiento secundario de  $n$  espiras alrededor de un núcleo de material **magnético**, estando el primario formado por el paso a través del circuito magnético de un conductor principal.

Este transformador proporciona al secundario una corriente ( $I_s$ ) igual a la corriente primaria ( $I_p$ ) dividida por el número de espiras ( $n$ ) del secundario.

La precisión es buena si el circuito magnético no llega a saturarse, o sea hasta unas 5 a 10 veces la corriente nominal. Por encima de este valor, la corriente secundaria es sensiblemente menor que  $I_p/n$  (figura 16).

Además, al cerrarse un interruptor automático sobre un cortocircuito, la respuesta del captador a la primera onda de corriente está estrechamente ligada al estado magnético (magnetismo remanente) en el que le ha dejado la corriente anterior. Si al cerrar, la corriente primaria es del mismo sentido que la anterior, la corriente secundaria  $I_s$  quedará muy atenuada en la primera onda; pero si es de sentido inverso,  $I_s$  quedará aumentada.

En consecuencia, la línea o cadena de medida puede quedar afectada por un error significativo, y por tanto, el constructor debe de ajustar el umbral DIN a un valor sensiblemente menor que el de TED. Además, si el umbral real está afectado por variaciones que le aproximan al valor mínimo, se producirá un disparo instantáneo (y por tanto una pérdida de selectividad) para un valor de cortocircuito sensiblemente inferior al estrictamente necesario.

**Variante:** Hay que destacar que una construcción especial puede neutralizar completamente la imprecisión del captador de corriente. Por ejemplo, para dar la orden de apertura del interruptor automático se puede utilizar, en cada polo, un **captador optoelectrónico de luz que detecta** la aparición entre los contactos del arco que se produce al rebasarse la resistencia electrodinámica.

En este caso, la selectividad no queda afectada por la tolerancia del captador de corriente, salvo únicamente la de su propia resistencia electrodinámica.

En la práctica, estos dispositivos complejos solamente están justificados para solucionar la imprecisión de los captadores tradicionales con grandes corrientes,

□ los transformadores de corriente con toro amagnético (figura 17).

Esta novedad tecnológica consigue una perfecta utilización de los interruptores automáticos. Estos transformadores de corriente o toros Rogowski, están constituidos por un arrollamiento secundario que está bobinado sobre un material **amagnético** alrededor del circuito primario. Estos transformadores suministran al secundario una tensión proporcional a la variación de la corriente primaria. Al realizar la integración de esta tensión con los circuitos electrónicos se obtiene una imagen de la corriente primaria.

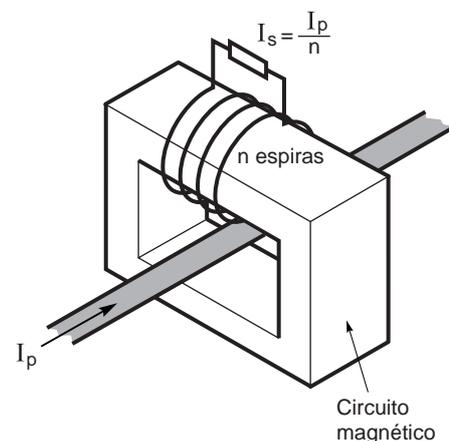


Fig. 15: Esquema de principio de un transformador de corriente con circuito magnético.

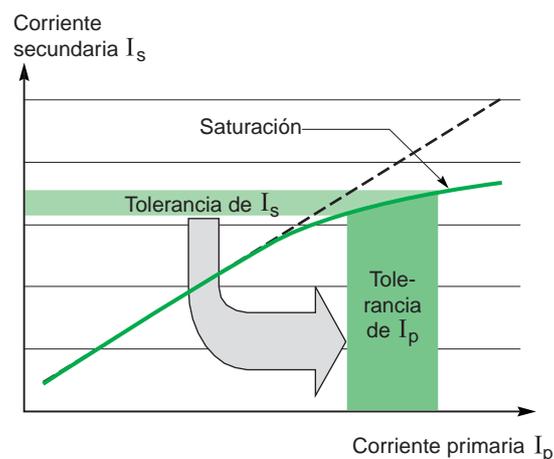
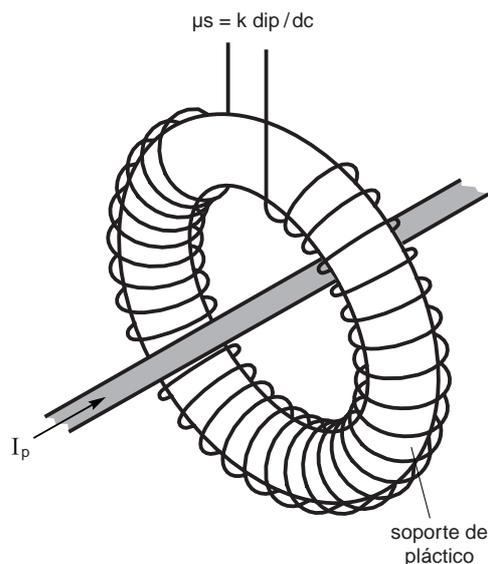


Fig. 16: Variación de corriente secundaria de un transformador en función de la corriente primaria (influencia de la saturación del circuito magnético).



**Fig. 17:** Esquema de principio de un transformador de corriente con toro magnético.

Al no tener circuito magnético, estos captadores tienen una perfecta linealidad con todos los valores de corriente.

La contrapartida de esta característica es:

- el valor bajo de la tensión que suministra,
- que el captador no proporciona ninguna energía,
- la sensibilidad de la señal secundaria a las dimensiones del toro.

Todos estos detalles tienen su solución:

- un tratamiento cuidadoso de la señal,
- la instalación de un segundo captador, de tipo magnético, que proporciona la potencia necesaria para alimentar el sistema electrónico del relé de disparo,

- el control de las dimensiones del toro utilizando materiales adecuados, a la vez estables, poco sensibles a la temperatura y fáciles de fabricar en serie.

La precisión de estos captadores permite situar el umbral de disparo muy cerca del valor límite de la resistencia del aparato (TED) y por otra parte se mejora el límite de la selectividad.

### Los relés de autoprotección con di/dt

#### ■ Descripción

Para mejorar las prestaciones del corte y obtener una cierta limitación de la corriente de cortocircuito en aparatos no limitadores, se puede utilizar un relé de autoprotección no ajustado al valor instantáneo de la corriente (ver § «Precisión de disparo de autoprotección»), sino a su derivada (di/dt).

A una frecuencia dada, la derivada máxima de la corriente depende en efecto de su valor eficaz mediante la ecuación:

$di/dt_{m\acute{a}x} = I_{ef} \sqrt{2} 2\pi f$ , donde  $f$  es la frecuencia de la red, lo que da:

$di/dt_{m\acute{a}x} = 0,443 I_{ef}$  en 50 Hz (derivada en kA/ms si  $I_{ef}$  está en kA)

$di/dt_{m\acute{a}x} = 0,531 I_{ef}$  en 60 Hz.

El peor caso en cuanto a velocidad de establecimiento de la corriente de cortocircuito es el constituido por una onda simétrica, que se desarrolla en forma de senoide según la ecuación:

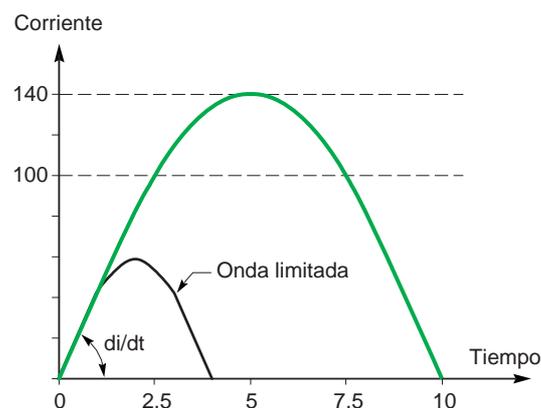
$$I_{ef} \sqrt{2} \text{sen}(2\pi f t) \text{ (figura 18).}$$

Si se quiere limitar la corriente máxima producida por este tipo de onda, es indispensable actuar con extrema rapidez.

Precisamente la derivada de la corriente ofrece esta posibilidad, porque, en este caso, su valor máximo se alcanza al iniciarse el cortocircuito; en cambio, el valor umbral instantáneo de la corriente puede tardar en alcanzarse varios milisegundos después.

Para un cortocircuito de 100 kA<sub>ef</sub> a 50 Hz, la onda simétrica genera una corriente máxima de 140 kA de cresta en alrededor de 5 ms (figura 18).

Con un interruptor automático de autoprotección basado en el valor del umbral de disparo instantáneo de 100 kA de cresta, hay que esperar unos 2,5 ms para alcanzar este umbral, quedando entonces muy poco tiempo para limitar la corriente de forma significativa. Con un relé sensible a la derivada de la corriente, la orden de disparo



**Fig. 18:** Principio de detección de un cortocircuito, a partir de la derivada instantánea de corriente y limitación obtenida.

puede darse instantáneamente, aunque sin embargo, con una ligera temporización para evitar disparos intempestivos por parásitos.

#### ■ Influencia sobre la selectividad

A pesar de lo dicho, este tipo de relé de autoprotección tiene un comportamiento particular en cuanto a la selectividad. En efecto, si aguas abajo de este aparato se coloca otro muy limitador, éste no tendrá efecto sobre la derivada de la corriente en el origen del defecto, puesto que es necesario un tiempo, aunque sea muy corto, para que sus contactos se abran y que la tensión de arco generada entre estos contactos haga frenar el aumento de la corriente y después la corte.

Por tanto, en este caso, **la selectividad quedará limitada al valor de ajuste de la derivada de la corriente, independientemente de los dispositivos de protección situados aguas abajo.**

Por tanto, es determinante para la selectividad que el fabricante ajuste este aparato al valor más alto posible, compatible con la limitación pretendida y su resistencia electrodinámica.

En el ejemplo anterior, si el ajuste se sitúa en un valor de 44,3 kA/ms que corresponde a una corriente presunta de 100 kA<sub>ef</sub> a 50 Hz, la limitación actuará solamente a partir de este valor de corriente presunta, pero en contrapartida habrá selectividad con los aparatos aguas abajo hasta este mismo valor. Téngase presente que este mismo aparato a 60 Hz tendrá el mismo comportamiento, pero para un límite de 83 kA<sub>ef</sub> en lugar de 100 kA<sub>ef</sub>.

#### Los relés con curva «IDMTL»

##### ■ Descripción

En un campo muy diferente de las consideraciones anteriores, que se refiere a la selectividad de los interruptores automáticos en régimen de cortocircuito, algunos relés «de gama alta» ofrecen curvas de disparo llamadas «IDMTL» definidas por la norma CEI 60 255-3.

Estas curvas permiten mejorar la selectividad de los interruptores automáticos en situación de **sobrecargas**, donde la selectividad puede estudiarse con facilidad comparando las curvas de disparo de los dispositivos de protección aguas arriba y aguas abajo (figura 19).

Con estos relés, es posible ajustar además del umbral y la temporización del relé de «largo retardo» **la pendiente de tiempo de disparo en función de la corriente.**

Ésta es la pendiente estándar, del tipo  $I^2 t = \text{constante}$ , es decir, que el tiempo de disparo es inversamente proporcional al cuadrado de la corriente y permite una protección contra esfuerzos térmicos constantes.

Las curvas IDMTL permiten diferentes tiempos de disparo, a escoger:

- constante (t = constante; DT = «Definite Time»),
  - inversamente proporcional a la corriente (It = constante; VIT «Very Inverse Time»),
  - inversamente proporcional al cuadrado de la corriente ( $I^2 t = \text{constante}$ ; EIT = «Extremely Inverse Time»),
  - inversamente proporcional a la potencia 4ª de la corriente ( $I^4 t = \text{constante}$ ; HVF = «High Voltage Fuse»).
- Esto permite conseguir una selectividad mejor, especialmente con los interruptores automáticos de MT situados aguas arriba, que tienen normalmente un tiempo de disparo constante, o con los fusibles de MT que tienen una pendiente superior a  $I^2 t$  (§ 4.3).

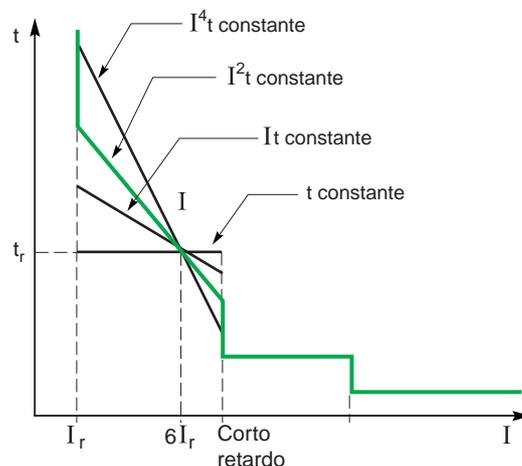


Fig. 19: Curva de disparo «IDMTL» de un interruptor automático.

### 3.3 Selectividad al cierre

#### **Riesgos debidos a la conexión sobre un defecto**

Cuando se cierra un aparato, el mecanismo debe proporcionar la energía necesaria para la maniobra de los contactos, en especial para la compresión de los resortes que aseguran la fuerza de apoyo de los contactos móviles sobre los contactos fijos. Es esta fuerza la que garantiza el paso idóneo de la corriente sin una elevación excesiva de la temperatura.

Cuando un interruptor se cierra sobre una corriente normal o de sobrecarga, las condiciones descritas no varían significativamente de lo dicho.

Por el contrario, cuando un aparato se cierra sobre una corriente de cortocircuito, se producen esfuerzos electrodinámicos considerables entre los contactos, incluso antes de que se complete el mecanismo de cierre con su acompañamiento y después la reapertura inmediata. Esta situación debe evitarse so pena de destrucción rápida del aparato debido a una sucesión ininterrumpida de tentativas de cierre y apertura sin que el relé tenga tiempo de intervenir.

#### **Necesidad de distinguir el caso de cierre con corriente normal o con corriente de cortocircuito**

Por tanto, hay una diferencia sensible entre la corriente que un aparato puede soportar cuando está cerrado (resistencia electrodinámica) y la corriente que el aparato puede establecer completamente (capacidad de cierre) y que los anglosajones llaman «close & latch».

Se puede admitir que se controla el valor de la corriente que el aparato es capaz de establecer completamente, controlando la energía del mecanismo de mando. Al aumentar esta energía, aumentará el límite de corriente. Sin embargo, cuando las maniobras se hacen sin corriente o con corriente «normal», esta energía adicional no se consumirá en los contactos y por lo tanto se disipará en choques en el mecanismo. Por tanto, no se puede aumentar impunemente esta energía sin poner en compromiso la durabilidad del mecanismo, valor esencial para el usuario, puesto que condiciona la esperanza de vida del aparato.

#### **La solución del relé de 2 márgenes de disparo**

Para poder utilizar un aparato en circuitos donde la corriente puede alcanzar valores superiores a su capacidad de cierre, hay una solución, que consiste en hacer disparar al aparato si la corriente durante el cierre del circuito sobrepasa esta capacidad. La apertura se produce entonces en condiciones controladas que no suponen ninguna dificultad especial.

Puesto que esta capacidad de cierre es inferior a su resistencia electrodinámica, siempre es posible colocar un simple relé instantáneo con un umbral de disparo inferior a esta capacidad: entonces se perdería todo interés por tener una resistencia electrodinámica elevada. Por tanto hace falta disponer de un relé instantáneo con dos umbrales; uno «bajo», que sólo está activo durante el cierre (llamado «DINF»), y el otro «alto», que está activo cuando el aparato está completamente cerrado (DIN).

En la práctica, este sistema puede aplicarse de dos maneras:

- la primera solución, muy utilizada, consiste en tener activo el margen bajo durante algunas decenas de milisegundos desde que el relé detecta la corriente. Esta solución es fácil de instalar, puesto que sólo afecta al relé y por tanto puede ejecutarse de manera enteramente electrónica. Sin embargo, tiene un inconveniente mayor: no permite distinguir entre un aparato abierto que cierra y un aparato que anteriormente cerrado, sin corriente, o con una corriente muy baja, ve súbitamente llegar una corriente de cortocircuito. Esto es lo que sucede con un interruptor automático de entrada, cerrado, sin corriente, cuando se cierra uno de los interruptores de distribución aguas abajo sobre un cortocircuito. En este caso, el umbral DINF del interruptor automático de cabeza, se activa sin motivo y perjudica la selectividad cuando el aparato sería suficientemente capaz de proteger con su margen DIN,

- una segunda solución, más satisfactoria, consiste en detectar el movimiento de cierre del aparato y temporizar esta información el tiempo necesario para asegurar que el aparato está completamente cerrado, utilizando esta información en forma de contacto eléctrico para hacer conmutar el relé del estado DINF al estado DIN. Esta solución garantiza que el umbral bajo sólo está activo en el momento oportuno y no va a disminuir inadecuadamente la selectividad de un aparato ya cerrado.

#### **Importancia de la selectividad en caso de un cierre con defecto**

Hay que decir por último que después del cierre de un interruptor automático, la pérdida de selectividad provocada por la protección DINF es una consecuencia limitada, puesto que el disparo del aparato no tiene el riesgo de desconectar una parte de la instalación que anteriormente hubiera estado ya alimentada. Sin embargo, la selectividad sigue siendo útil porque permite, al menos hasta el umbral DINF, cerrar el aparato aguas arriba y no dejar disparar el aparato aguas abajo afectado por el defecto, facilitando así la localización del cortocircuito.

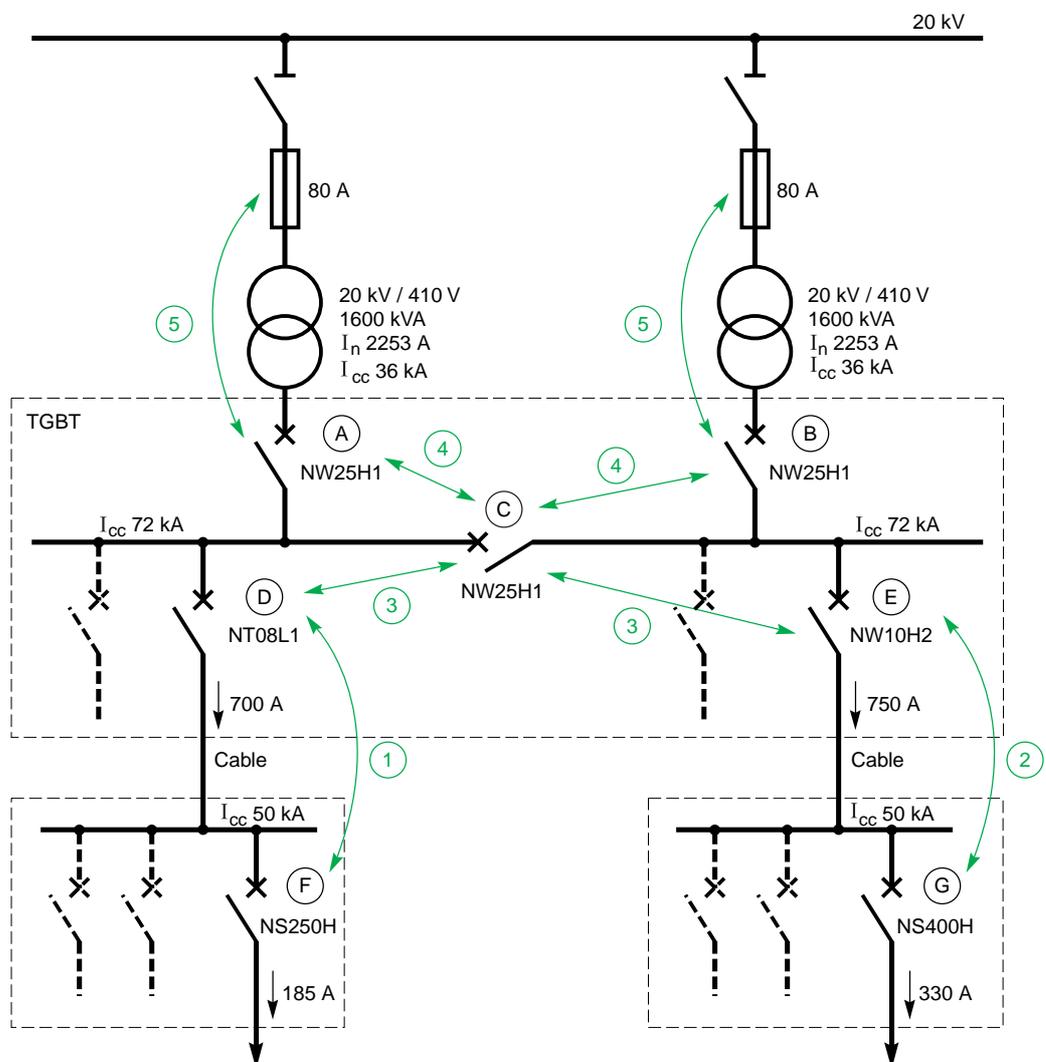
## 4 Caso de aplicación: ejemplos de elección de interruptores automáticos en una instalación BT

### 4.1 Presentación de la instalación estudiada

El ejemplo que se estudia corresponde a la instalación BT representada en la **figura 20**. Este estudio incluye la coordinación de las protecciones entre la BT y la protección situada aguas arriba de cada transformador de alimentación MT/BT. La elección se refiere a los productos de la marca Merlin Gerin.

La instalación tiene dos entradas MT de 20 kV protegidas por fusible, equipada cada una con

un transformador MT/BT de características 20 kV/410 V, 1600 kVA y un interruptor automático de entrada BT (A) o (B). Un interruptor automático de acoplamiento (C) permite hacer funcionar las dos partes de la instalación conjunta o separadamente para optimizar la disponibilidad de la energía en caso de fallo de una de las dos entradas.



**Fig. 20:** 1<sup>er</sup> ejemplo de instalación (con transformadores MT/BT 1600 kVA) con indicación del orden de estudio de la selectividad.

## 4.2 Dimensionamiento de los aparatos de protección

### Calibre de los aparatos (A) y (B) instalados en las entradas BT

Determinación de la corriente nominal en las entradas BT:

1600 kVA en 410 V que corresponden a una corriente nominal de  $\frac{1600\ 000}{(410 \times \sqrt{3})} = 2\ 253\ \text{A}$ .

Se elegirán por tanto para la entrada aparatos de calibre 2500 A.

### Calibre de los fusibles instalados en las entradas MT

La corriente nominal en las entradas MT es:

$$I_n = \frac{1600\ 000}{(20\ 000 \times \sqrt{3})} = 46\ \text{A}.$$

Se elegirán por tanto de acuerdo con los cuadros de selección de los fabricantes, fusibles de calibre 80 A (para tener en cuenta las corrientes de conexión y sobrecarga pero asegurando la protección térmica del transformador).

### Poder de corte de los diversos aparatos

#### ■ Corrientes de cortocircuito en diferentes puntos de la instalación

Cada transformador tiene una corriente de cortocircuito  $I_{cc} = 36\ \text{kA}$  (corriente que depende de la potencia y de la tensión de cortocircuito del transformador).

Por tanto, cuando el interruptor de acoplamiento está cerrado, se tiene aguas abajo de los aparatos (A) y (B) un poder de cortocircuito de  $2 \times 36 = 72\ \text{kA}_{ef}$  si se desprecian las impedancias del juego de barras. La corriente de cortocircuito que atraviesa los interruptores automáticos situados en (F) y (G) no será mayor que unos 50 kA, teniendo en cuenta las impedancias de los cables.

#### ■ Poder de corte de los aparatos

El poder de corte necesario para cada aparato se calcula después de los valores de corriente de cortocircuito en los diferentes puntos de la instalación.

Los interruptores (D) y (E) deberán tener un poder de corte superior a 72 kA; para los interruptores automáticos (A), (B) y (C) será suficiente un poder de corte mayor que 36 kA; los interruptores automáticos (F) y (G) deberán tener como mínimo un poder de corte de 50 kA.

## 4.3 Elección de los aparatos para asegurar la selectividad

### Principio

La determinación de la selectividad se hace comparando las características de cada interruptor automático con las de la protección (interruptor automático o fusible) situada inmediatamente aguas arriba.

Los interruptores automáticos de potencia situados en la parte más baja de la instalación se elegirán y ajustarán para disparar «lo más rápidamente posible», de manera que limiten los sobreesfuerzos en la instalación en caso de sobreintensidad.

Una vez fijadas las características de estos interruptores automáticos, se «sube en la instalación» para asegurar la selectividad de los interruptores de dos en dos (interruptor automático superior/interruptor automático inferior).

### Selectividad entre los interruptores automáticos (F) y (D)

□ en (F):  $I_n = 185\ \text{A}$ ;  $I_{cc} = 50\ \text{kA}$

Se podrá utilizar un interruptor automático de calibre 250 A, por ejemplo, un Compact NS 250 H (PdC 70 kA a 415 V),

□ en (D):  $I_n = 700\ \text{A}$ ;  $I_{cc} = 72\ \text{kA}$

Se podrá utilizar un interruptor automático de calibre 800 A, por ejemplo un Compact NS 800 L o un Masterpact NT 08 L1 (PdP 150 kA a 415 V).

### Mecanismo de selectividad

El aparato (F) es muy limitador (la corriente de cresta máxima que deja pasar es de 22 kA de cresta para un cortocircuito presunto de  $50\ \text{kA}_{ef}$ ); este interruptor automático permitiría por tanto una selectividad de tipo «pseudo-cronométrica» con el interruptor automático (D).

Sin embargo, el interruptor automático (D) es también limitador, con una resistencia electrodinámica baja para conseguir una limitación muy buena. Por tanto, aquí se aplica el principio «SELLIM», y se consigue tener una **selectividad total** entre (F) y (D) (porque, según el principio de selectividad SELLIM el relé de (D) no dispara con la primera onda de corriente).

La función «SELLIM» se incorpora sistemáticamente en los relés Micrologic y se activa automáticamente en los aparatos afectados.

### Selectividad entre los interruptores automáticos (G) y (E)

□ en (G):  $I_n = 330 \text{ A}$ ;  $I_{cc} = 50 \text{ kA}$

Se podrá utilizar un interruptor automático de calibre 400 A, por ejemplo un Compact NS 400 H (PdC 70 kA a 415 V)

□ en (E):  $I_n = 750 \text{ A}$ ;  $I_{cc} = 72 \text{ kA}$

Se podrá utilizar el mismo interruptor automático (limitador) que en (D), pero, como la limitación del NS 400 H es menor que la del NS 250 H, esta asociación no será totalmente selectiva. Para una selectividad aumentada, se podrá utilizar un interruptor automático **selectivo** y utilizar el poder de limitación del aparato (G) para conseguir, si es necesaria, la selectividad pseudo-cronométrica.

Por ejemplo, un Masterpact NW 10 H2

( $I_n$  1000 A, PdC 100 kA en 415 V,

$I_{cw} = 85 \text{ kA}_{ef} / 1 \text{ s}$ ).

### ■ Mecanismo de selectividad

Puesto que la  $I_{cw}$  (85 kA) es inferior al PdC (100 kA), este aparato tiene un relé instantáneo de autoprotección con un umbral de disparo (DIN) en 170 kA de cresta.

Con una  $I_{cc} = 72 \text{ kA}_{ef}$ , la corriente de cresta máxima en (E) es de  $72 \times 2,3 = 175 \text{ kA}$  de cresta. Puesto que el umbral DIN no se alcanza nunca, no habrá disparo producido por el DIN y que comprometa la selectividad.

Por otra parte, en caso de cortocircuito en (G), la corriente de cresta máxima, que corresponde a una  $I_{cc}$  de 50 kA, ¡se limitará para (G) a 30 kA de cresta! Por tanto la selectividad será **total**, con la condición de dotar siempre al aparato (E) de un relé con un umbral instantáneo superior a 30 kA de cresta,

o sea,  $\frac{30}{\sqrt{2}} = 21 \text{ kA}_{ef} = 21 I_n$ , y ajustar la

temporización del relé de corto retardo al valor de 0,1 s.

### ■ Variante

También se podría utilizar en (E) un aparato limitador, que tuviera una TED mayor que la de (D). Por ejemplo un NW 10 L1 ( $I_n$  1000 A; PdC 150 kA en 415 V,  $I_{cw}$  30 kA/1s).

### ■ Ventaja de esta variante

La elección de este tipo de interruptor automático reduce considerablemente los esfuerzos electrodinámicos en los cables entre (E) y (G), por su poder de limitación (125 kA de cresta a  $72 \text{ kA}_{ef}$ , frente a 165 kA de cresta sin limitación). Este interruptor automático está dotado de un relé instantáneo de autoprotección a **80 kA** de cresta, que por tanto nunca será solicitado en caso de defecto aguas abajo de (G) ( $I_{cc}$  limitada a 30 kA de cresta). Por tanto, se tendrá también aquí selectividad total, de tipo pseudo-cronométrico, es decir, debida a la limitación del aparato aguas abajo.

(Nota: un aparato no limitador en (G) dejaría pasar, en caso de cortocircuito, una intensidad de cresta de  $50 \text{ kA} \times 2,3 = 115 \text{ kA}$  de cresta, lo que provocaría el disparo del interruptor automático (E).

### Selectividad entre los interruptores automáticos (E) y (C)

Esta selectividad no es indispensable si las dos entradas están operativas (porque la apertura del acoplamiento no interrumpe la alimentación por (A) y (B)). Por el contrario, no se consigue si la entrada (B) está fuera de servicio.

□ Valor de la corriente nominal  $I_n$  en (C):

Para conseguir la máxima fiabilidad, los aparatos de acoplamiento se dimensionan de igual manera que los aparatos de entrada, o sea,  $I_n = 2500 \text{ A}$ . Como que  $I_{cc} = 36 \text{ kA}$ , se podrá utilizar un interruptor automático selectivo que permitirá una selectividad cronométrica con (E) (y con (D), que necesariamente ha de ser limitador). Por ejemplo, un Masterpact NW 25 H1 ( $I_n$  2500 A, PdC 65 kA a 415 V,  $I_{cw}$  65 kA/1 s).

### ■ Explicación de esta elección

Puesto que la  $I_{cw}$  del aparato es igual a su PdC, esto no obliga a utilizar un relé instantáneo de autoprotección; la selectividad cronométrica podrá por tanto aplicarse sin restricción hasta el PdC. Por tanto, el interruptor automático (C) estará dotado de un relé selectivo, con los ajustes de disparo instantáneo en la posición «off» y la temporización de corto retardo en la posición 0,2 s (puesto que la temporización del relé de corto retardo del interruptor automático (E) está ajustada en la posición 0,1 s).

### **Selectividad entre el interruptor automático (D) y (C)**

La solución aplicada para la selectividad entre (E) y (C) es válida también entre (D) y (C), puesto que (C) es totalmente selectivo hasta su PdC.

### **Selectividad entre los interruptores automáticos (C) y (B) o entre los interruptores automáticos (C) y (A)**

Se trata de dos aparatos selectivos sin relé instantáneo de autoprotección. Aquí también se aplica la selectividad cronométrica hasta su PdC.

Para (A) y (B): relé selectivo, con el relé instantáneo ajustado a la posición «off» y la temporización de corto retardo ajustada en la posición 0,3 s (puesto que la temporización del relé de corto retardo del interruptor automático (C) está ajustada en la posición 0,2 s).

### **Selectividad entre los interruptores automáticos (A) o (B) y los fusibles MT**

Para analizar esta selectividad, hay que comparar las curvas de disparo de los interruptores automáticos BT y las de los fusibles MT.

Para esto hay que transportar la curva del fusible MT a la gráfica BT, multiplicando la escala de corriente por la razón de transformación, en este caso:  
 $20000/410 = 48,8$  (figura 21).

La selectividad se estudia con dos tipos de relés: primero para un relé selectivo estándar y segundo para un relé con curva IDMTL.

#### **■ Ajuste en el caso de relés selectivos estándar**

##### **□ Umbral de largo retardo**

No hay problema: la corriente límite de no disparo del fusible está muy por encima de la corriente límite de disparo del interruptor automático; por tanto se podrá ajustar el umbral de largo retardo a su valor máximo (o sea,  $I_r = I_n$ ).

##### **□ Temporización de largo retardo y umbral de corto retardo**

La característica de fusión de los fusibles MT tiene una pendiente mucho mayor que la del disparo del relé de largo retardo (LR), de pendiente  $I^2t$  (figura 21).

Por tanto será necesario, para evitar la intersección de ambas curvas, ajustar la temporización de largo retardo ( $t_r$ ), o el umbral de corto retardo ( $I_{sd}$ ) a valores suficientemente bajos.

En este caso, un buen compromiso consiste en ajustar  $t_r = 12$  s (para  $6 I_r$ , con un margen que va generalmente de 1 a 24 s), e  $I_{sd} = 4 I_r$  (con un margen de 1,5 a  $10 I_r$ ).

Estos valores permitirán dejar pasar sin desconexión intempestiva los picos de conexión o de corriente de arranque de los receptores situados aguas abajo; el estudio detallado hay que hacerlo en función de estos receptores. Con un umbral mayor de corto retardo,  $5 I_r$  por ejemplo, habrá que disminuir  $t_r$  a 4 s.

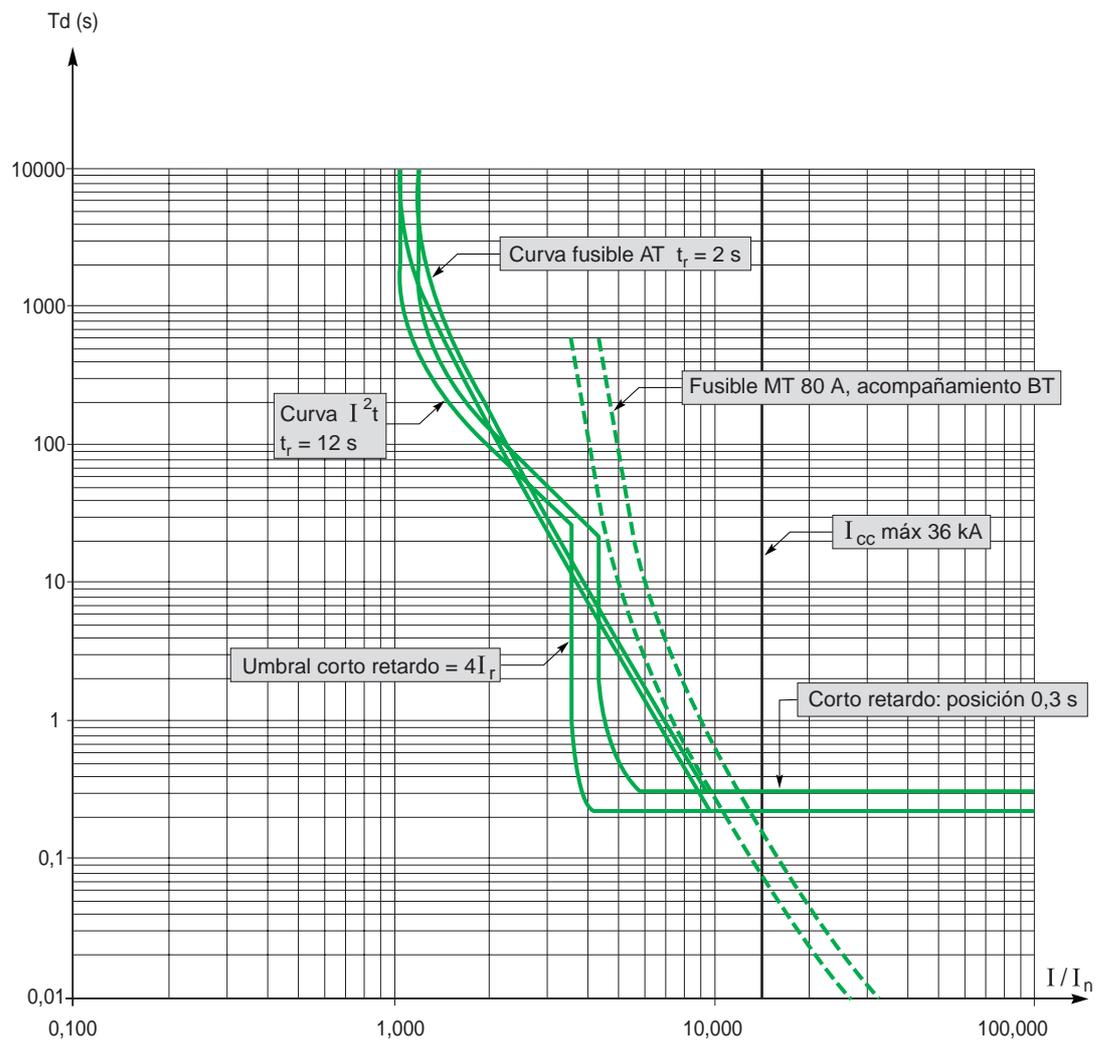
##### **□ Temporización de corto retardo**

Puesto que la temporización de corto retardo está ajustada en la posición 0,3 s para garantizar la selectividad con los aparatos aguas abajo, como se ha indicado anteriormente, las curvas del fusible y del interruptor automático se cortan hacia  $10 I_n$  (figura 21). Por tanto, la selectividad entre el interruptor automático y el fusible MT quedará limitada a aproximadamente  $25 kA_{ef}$  para una corriente de cortocircuito máxima  $I_{cc}$  de  $36 kA_{ef}$ .

#### **■ Ajuste en el caso de relés con curva IDMTL (ver § Relés con curva «IDMTL»)**

Con estos relés, se puede adaptar la pendiente de la curva de largo retardo. En este caso, se podrá optar por la pendiente «HVF» (Hig Voltage Fuse), que es la que más se acerca a la del fusible (pendiente en  $I^4t$ ).

Con una temporización de  $6 I_r$  de 2 s, se obtiene una insensibilidad mejor a las corrientes transitorias de valor elevado (picos de conexión o de arranque) en la zona de las curvas comprendida entre 5 y  $10 I_r$  y el umbral de corto retardo puede ajustarse a cualquier valor deseado hasta  $10 I_r$  (figura 21).



**Fig. 21:** Análisis de la selectividad entre un interruptor automático BT y unos MT - aplicación en el caso de la instalación estudiada.

#### 4.4 Variante con selectividad lógica

Esta variante necesita en (A), (B), (C), (D) y (E) la utilización de relés que tengan esta función (tipo Micrologic 5.0 A).

##### Descripción

El principio teórico y el funcionamiento real de la selectividad lógica se detallan en el Cuaderno Técnico nº 200, dedicado a este tipo de selectividad. Recordemos que cada relé tiene dos bornes de entrada (IN), para

conectar a los aparatos aguas abajo y dos bornes de salida (OUT) para conectar a los aparatos aguas arriba (**figura 22**).

Cuando un relé detecta un defecto superior a su umbral de corto retardo, cortocircuita los bornes de salida. Cuando un relé ve sus bornes de entrada cortocircuitados, activa la temporización de corto retardo. Si no, dispara instantáneamente.

### Instalación en este caso

■ Los primeros aparatos (D) y (E) tendrán sus entradas cortocircuitadas permanentemente para que esté activa la temporización de corto retardo. Esto garantiza la selectividad con el nivel inferior (interruptores automáticos Compact NS).

■ A continuación se llevará a cabo el cableado y el ajuste de las temporizaciones de corto retardo según se ve en la **figura 22**.

El cableado directo entre (E) y (B) por una parte y (D) y (A) por otra, permite asegurar la selectividad entre estos aparatos cuando el interruptor automático de acoplamiento (C) está abierto. Los diodos garantizan la independencia de las dos mitades de la instalación: en este caso, evitan que (D) actúe sobre (B) y que (E) actúe sobre (A).

### Funcionamiento

■ En caso de defecto aguas abajo de (G) (**figura 20**), (G) **disparará instantáneamente**, y (E) quedará temporizado en 100 ms, por tanto no disparará y enviará una señal a (C),

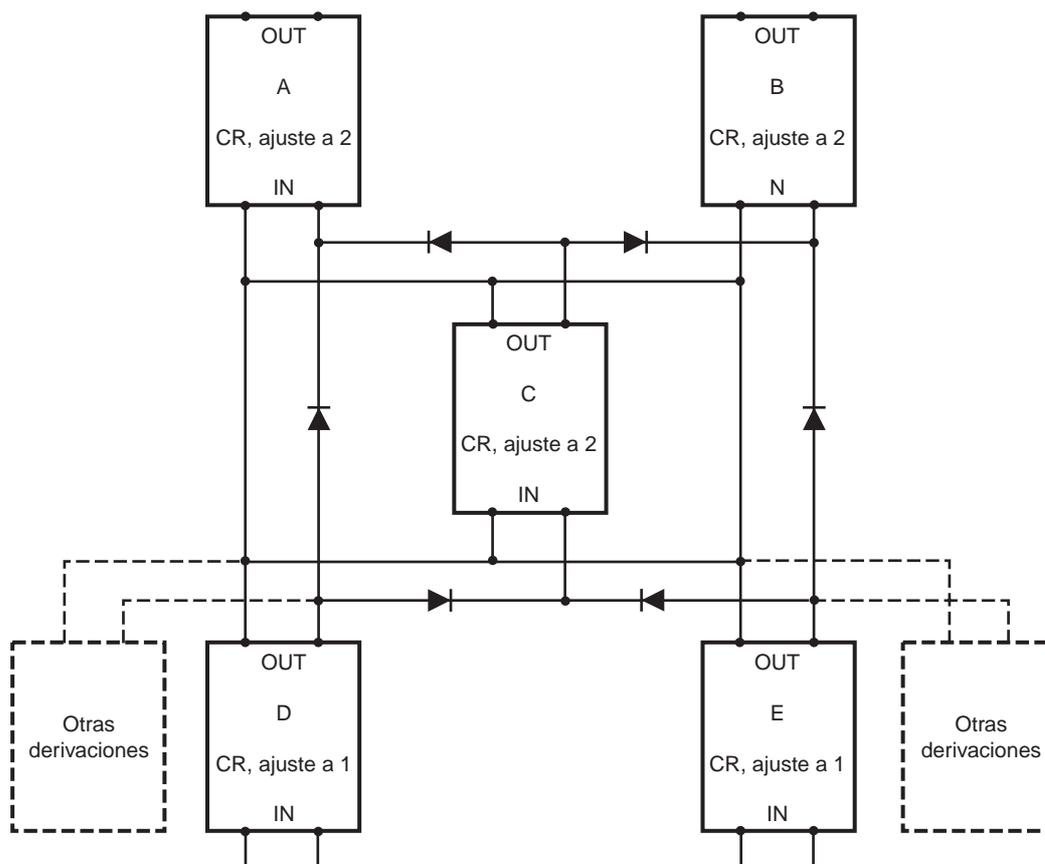
que quedará por tanto temporizado 200 ms (no disparo) y retransmitirá la señal a (A) y (B) (temporizaciones ajustadas a 200 ms  $\Rightarrow$  no-disparo) y por tanto sólo (G) disparará.

■ En caso de defecto entre (G) y (E) **E disparará al llegar a 100 ms**, enviará una señal a (B) y (C) que serán temporizadas en 200 ms (no disparo), y (C) enviará una señal a (A), temporización ajustada a 200 ms  $\Rightarrow$  no disparo).

Si (C) está abierto no enviará señal a (A), pero éste no verá el cortocircuito.

■ En caso de defecto entre (E) y (C)

□ si (C) está cerrado, **(C) disparará instantáneamente**, y enviará señal a (A) y a (B) (temporizaciones ajustadas a 200 ms). Puesto que el defecto está alimentado por dos entradas en paralelo, (C) cortará la corriente entregada por el transformador de la izquierda y (A) permanecerá cerrado, dejando la parte de la izquierda de la instalación en servicio. **(B), al cabo de 200 ms, interrumpirá la corriente** entregada por el transformador de la derecha.



**Fig. 22:** Instalación de la selectividad lógica: gráfico del ajuste de temporizaciones y cableado de los relés.

□ si (C) está abierto, no enviará señal a (B), que por tanto disparará instantáneamente.

■ En caso de defecto entre (C) y (B), **(B) disparará instantáneamente.**

Nota: un defecto entre (E) y (C) o entre (C) y (B) es muy poco probable, puesto que estos aparatos están situados normalmente en un mismo cuadro.

De este modo, la selectividad lógica permite limitar mucho los esfuerzos sobre la instalación, tanto más cuanto más cerca estén las salidas de la fuente de alimentación de la

red. Sin este artificio, un defecto inmediatamente aguas abajo de (A) o (B) provocaría un disparo en más de 300 ms, frente a lo conseguido aquí, que es de solamente algunas decenas de milisegundos.

Por otra parte, puesto que el disparo de los aparatos es instantáneo en la casi totalidad de los casos, **la selectividad con los fusibles MT será total**, puesto que estará limitada a  $25 \text{ kA}_{\text{ef}}$  debido a la temporización de 300 ms de corto retardo de los aparatos (A) y (B).

## 4.5 Variante con dos entradas más potentes

Sea un esquema como el anterior, pero con:

■ la potencia de los transformadores llega hasta **2500 kVA** y la intensidad del circuito de derivación (E) hasta **2200 A**,

■ la protección MT se ha hecho con interruptores automáticos MT (**figura 23**).

La corriente nominal en (A) y (B) pasa a ser de 3520 A y la  $I_{\text{cc}}$  54 kA. En el juego de barras principal  $I_{\text{cc}}$  pasa a ser de 108 kA.

### Elección del interruptor automático MT

Para una tensión MT de 20 kV, se podrá utilizar un interruptor automático tipo «MC-Set»

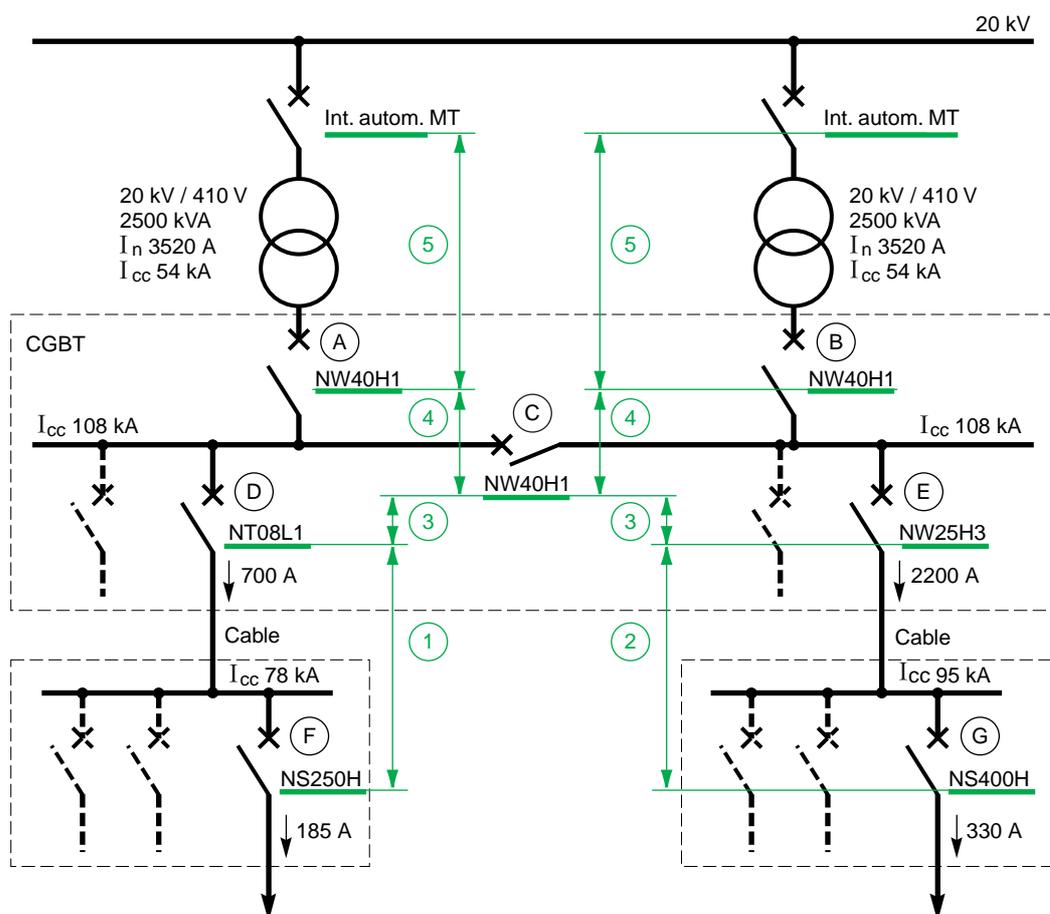


Fig. 23: 2º ejemplo de instalación (potencia de los transformadores MT/BT 2500 kVA).

de la marca Merlin Gerin, con un relé de protección Sepam de tipo «transformador». Este relé tiene 2 umbrales de disparo (figura 24).

El primero sirve de protección en caso de cortocircuito entre el transformador y el interruptor automático BT, o en caso de fallo de la protección BT. El segundo sirve de protección en caso de cortocircuito por encima del transformador.

### Elección de los interruptores automáticos BT

#### ■ Interruptor automático (E)

Puesto que la  $I_{cc}$  es superior a 100 kA, no se podrá utilizar un NW 25H2 (PdC 100 kA). ¡Ya no se puede utilizar un interruptor automático limitador cuya corriente nominal no supere los 2000 A (NW 20L1)!

La solución consiste en utilizar un **interruptor automático selectivo de alto poder de corte, como el NW 25H3**, que proporciona un PdC de 150 kA con una  $I_{cw}$  de 65 kA/3 s.

#### ■ Interruptores (A), (B) y (C)

Para  $I_n = 3520$  A, se elegirán interruptores automáticos del tipo NW 40H1 ( $I_n$  4000 A, PdC 65 kA,  $I_{cw}$  65 kA/1 s).

#### Ajuste de los aparatos para asegurar la selectividad

No hay que hacer ningún cambio fundamental. El aparato (E) se temporizará en la posición 0,1 s; el aparato (C) se temporizará en la posición 0,2 s; y los aparatos (A) y (B) se temporizarán en la posición 0,3 s.

En caso de utilización de la selectividad lógica, seguirá siendo válido el esquema de la figura 22.

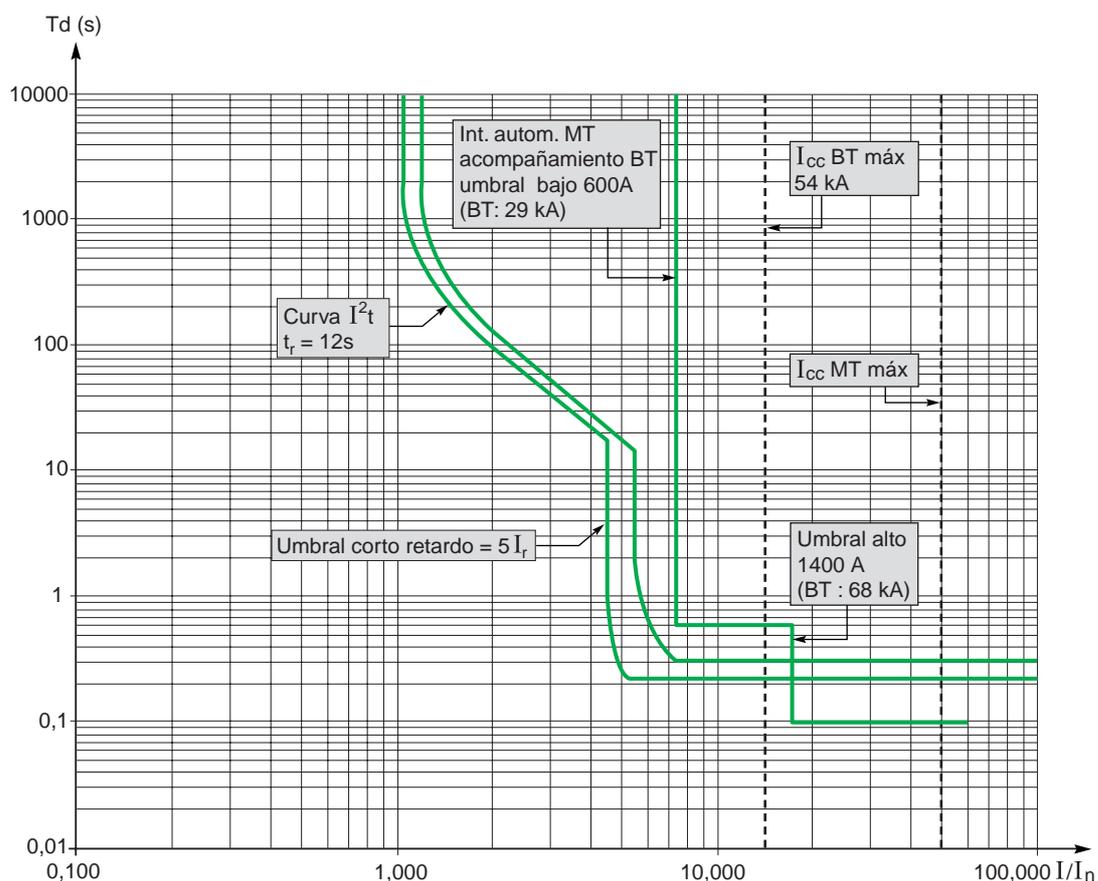


Fig. 24.

### **Ajuste del relé de protección del interruptor MT**

El primer umbral debe ser inferior a la corriente de cortocircuito aguas abajo del transformador, o sea, 54 kA lado BT, que equivalen a 1100 A lado MT. Debe de ser selectivo con el umbral de corto retardo de los interruptores automáticos (A) o (B). Si se ajusta a  $5 I_n$ , el valor correspondiente máximo será  $I_n$  veces su umbral de tolerancia, por tanto:  $4000 \times 5 \times 1,1 = 22 \text{ kA}$ , o sea, 450 A lado MT.

El primer umbral MT podrá por tanto ajustarse a **600 A**.

Para evitar la interferencia con la temporización de corto retardo de 0,3 s, la temporización ligada a este primer umbral se ajustará, por ejemplo, a 0,6 s.

El segundo umbral deberá ser superior a la corriente de cortocircuito citada (1100 A) e inferior a la corriente de cortocircuito aguas arriba del transformador. Suponiendo que la red tenga una potencia de cortocircuito de 150 MVA, la corriente correspondiente será de 4 kA lado MT.

El segundo umbral podrá ajustarse a 1400 A.

## **Bibliografía**

### **Normas**

- CEI 60255-3

### **Cuadernos Técnicos Schneider Electric**

- Interruptores automáticos con SF<sub>6</sub> Fluarc y protección de motores MT. Cuaderno Técnico nº 143. D. GIBBS - J. HENNEBERT
- Evolución de los interruptores automáticos BT con la norma CEI 60947-2. Cuaderno Técnico nº 150. E. BLANC
- Los esfuerzos electrodinámicos en los juegos de barras BT. Cuaderno Técnico nº 162. JP. THIERRY - C. KILINDJIAN
- La selectividad energética en BT. Cuaderno Técnico nº 167. R. MOREL - M. SERPINET
- Protección de redes por el sistema de selectividad lógica.