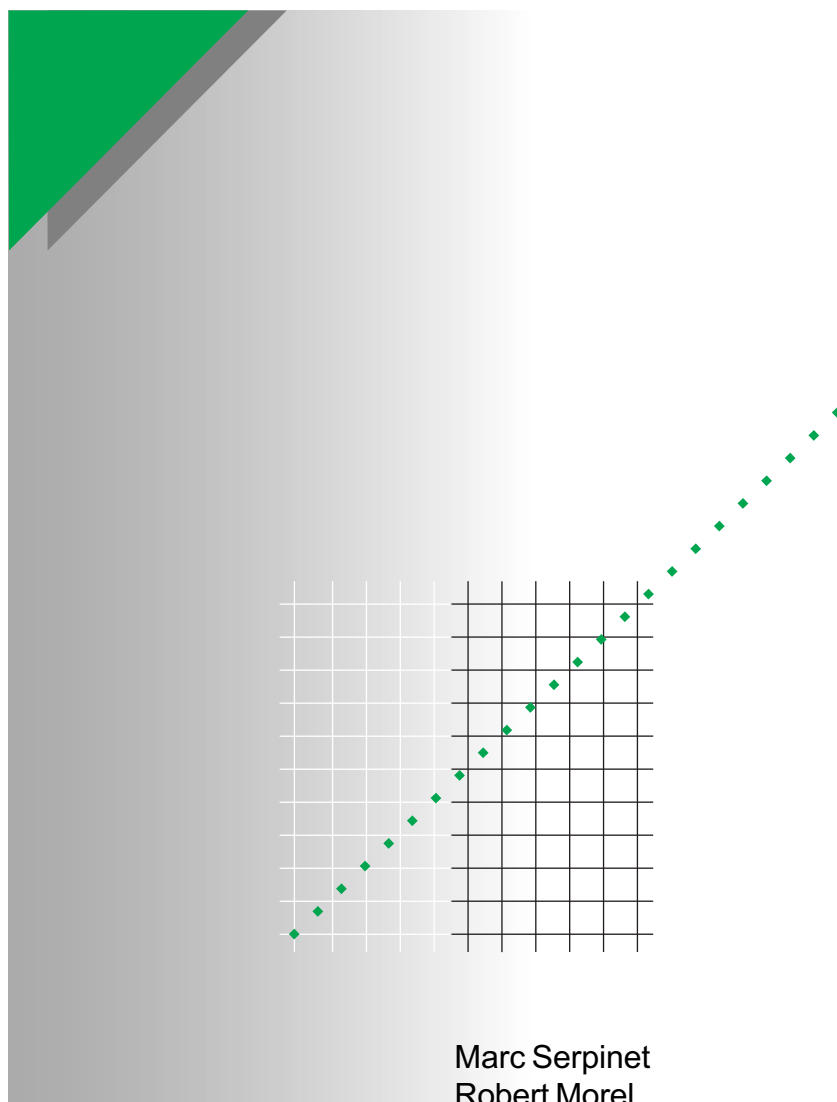


# Cuaderno Técnico nº 167

## La selectividad energética BT



Marc Serpinet  
Robert Morel



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» del **Grupo Schneider**.

### **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 167 de Schneider Electric».



**Marc SERPINET**

Entra en Merlin Gerin en 1 972 y trabaja hasta 1 975 en la sección de desarrollo de equipos de BT. Después se encarga del estudio específico de la definición de los armónicos eléctricos según el esquema de instalación. Seguidamente dirige diversos ensayos de investigación y desarrollo en la campo de los interruptores automáticos también de BT. Obtiene el título ingeniero ENSIEG en 1 981.

En 1991, después de haber dirigido desde el estudio hasta la industrialización de un proyecto para interruptores automáticos Compact, se responsabiliza de la sección de estudio «de anticipación a la evolución electromecánica».



**Robert MOREL**

Ingeniero ENSMM Besançon, entra en Merlin Gerin en 1 971 y se especializa en el diseño de aparamenta de BT contribuye al estudio del sistema Sellim.

En 1 980 se encarga del desarrollo de los interruptores automáticos Compact y de los interruptores automáticos Interpact.

En 1985 pasa a ser responsable de la sección de estudios del «corte en BT» de la división de potencia de baja tensión.

# cuaderno técnico nº 167

## La selectividad energética en BT

Por: Marc Serpinet y Robert Morel  
Trad.: Enrique Milà

Edición francesa: junio 1993  
Versión española: febrero 1994

## Terminología

---

### **Ec**

Energía de paso que permite el dispositivo de protección al producir el corte, está caracterizada por:  
 $\int i_c^2 \cdot dt \approx I^2 \cdot t_c$ .

### **ic**

Corriente de cortocircuito que recorre realmente el interruptor automático por efecto de la limitación (la corriente cortada es inferior a Ip).

### **Ip**

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

### **Ir**

Corresponde a la regulación de la protección contra las sobrecargas.

### **tc**

Tiempo real de ruptura (extinción del arco).

### **UT**

Unidad de Tratamiento electrónico.

### **Accionador**

Dispositivo capaz de desarrollar una acción mecánica.

### **Calibre**

Corresponde a la regulación máxima del relé.

### **Relé instantáneo de alto umbral (DIN)**

Relé instantáneo utilizado para limitar la sollicitación térmica sobre un cortocircuito.

### **Relé instantáneo (INS)**

Relé que no posee ningún dispositivo de retardo intencional con acción de intervención a partir de varias veces In (protección contra los cortocircuitos).

### **Relé de largo retardo (LR)**

Relé que posee un dispositivo de retardo intencional de varios segundos (protección contra las sobrecargas).

### **Relé de corto retardo o retardado (CR)**

Relé que posee un dispositivo de retardo intencional de varias decenas a varias centenas de milisegundos.

Si el retardo disminuye cuando Ip aumenta, decimos que el relé es de corto retardo dependiente (CRD).

### **Interruptor automático limitador**

Interruptor automático que, al cortar una corriente de cortocircuito, limita la intensidad a un valor netamente inferior al valor presunto (Ip).

### **Interruptor automático selectivo**

Interruptor automático equipado con un dispositivo de retardo intencional (selectividad cronométrica).

### **Selectividad parcial**

La selectividad es parcial cuando sólo se asegura hasta un cierto valor de la corriente Ip.

### **Selectividad total**

La selectividad es total cuando está asegurada para cualquier valor de la corriente de defecto presunta.

### **Tamaño**

Corresponde al escalado de la gama, por ejemplo: tamaño 160 A, 250 A, 630 A, 800 A...

# La selectividad energética en BT

## Índice

<b>1 La selectividad en BT</b>	Definición	<b>p. 6</b>
	Contribución al objetivo de seguridad y de disponibilidad	p. 6
	Zonas de selectividad	p. 7
<b>2 Las técnicas de selectividad en cortocircuito</b>	Selectividad amperimétrica	<b>p. 8</b>
	Selectividad cromométrica	p. 8
	Selectividad SELLIM	p. 9
	Selectividad lógica	p. 9
	Empleo de los diferentes tipos de selectividad	p. 10
<b>3 La selectividad energética</b>	Cuadro de representación de las energías	<b>p. 11</b>
	Características de un interruptor automático Compact NS	p. 12
	Características de los relés	p. 13
<b>4 Interés y aplicación de la selectividad energética</b>	Interruptor automático equipado con un relé a presión	<b>p. 16</b>
	La selectividad con los Compact NS	p. 17
	Asociación con el material tradicional de protección	p. 18
<b>5 Conclusión</b>		<b>p. 19</b>
<b>6 Anexo: repaso sobre la ruptura con limitación</b>		<b>p. 20</b>

El objetivo de este Cuaderno Técnico es la presentación de una nueva técnica de selectividad de las desconexiones ante un cortocircuito: la selectividad energética. Más simple y eficaz que las técnicas de selectividad habituales, se aplica en la gama de interruptores automáticos Compact NS que se utilizan en la distribución de potencia en BT.

Para que pueda garantizarse la selectividad total, es decir, cualquiera que sea la corriente de defecto presunta, es suficiente tener dos interruptores automáticos en serie de tamaño diferente (relación  $\geq 2,5$ ) con calibres en una relación  $\geq 1,6$ .

A continuación de un breve repaso de las técnicas de selectividad clásicas, los autores examinan el comportamiento de los interruptores automáticos y los diversos relés desde un punto de vista energético.

Se demuestra seguidamente la posibilidad de obtener selectividad total, hasta el poder de ruptura de los interruptores automáticos, en diferentes niveles, sin necesidad de utilizar la selectividad cromométrica.

# 1 La selectividad en BT

## Definición

En una instalación eléctrica los receptores están unidos a los generadores a través de una sucesión de dispositivos de protección, seccionamiento y mando. Este Cuaderno Técnico trata esencialmente de la función de protección por interruptor automático.

En el cuadro de la distribución radial (**figura 1**) el objetivo de la selectividad es desconectar de la red el receptor o derivación con defecto y sólo ello, para conseguir el objetivo de continuidad de servicio en su grado máximo.

Si no se realiza un estudio de selectividad o éste está mal realizado, un defecto eléctrico puede solicitar a varios dispositivos de protección. Es por ello que un único defecto puede provocar la falta de tensión en una parte más o menos grande de una instalación.

De ello resulta una pérdida anormal de disponibilidad de energía eléctrica en derivaciones correctas, es decir, sin defecto.

Las sobreintensidades que pueden producirse en una instalación son de tipos diferentes:

- sobrecarga,
- cortocircuito,
- punta de corriente de arranque, y también,
- derivación de corriente a tierra,
- corriente transitoria debida a una caída de tensión o a una ausencia momentánea de tensión.

Para garantizar una continuidad máxima de servicio es necesario emplear dispositivos de protección coordinados entre sí.

Hay que considerar que las caídas de tensión pueden provocar la apertura intempestiva de interruptores automáticos por acción de los relés de mínima tensión.

## Contribución al objetivo de seguridad y de disponibilidad

A cada tipo de defecto corresponde un dispositivo específico de protección, (protección contra las corrientes de sobrecarga, de cortocircuito, de defecto a tierra, o de ausencia de tensión...) pero un defecto puede, por sus características, solicitar simultáneamente a varios tipos de dispositivos de protección, bien directamente o por efecto secundario.

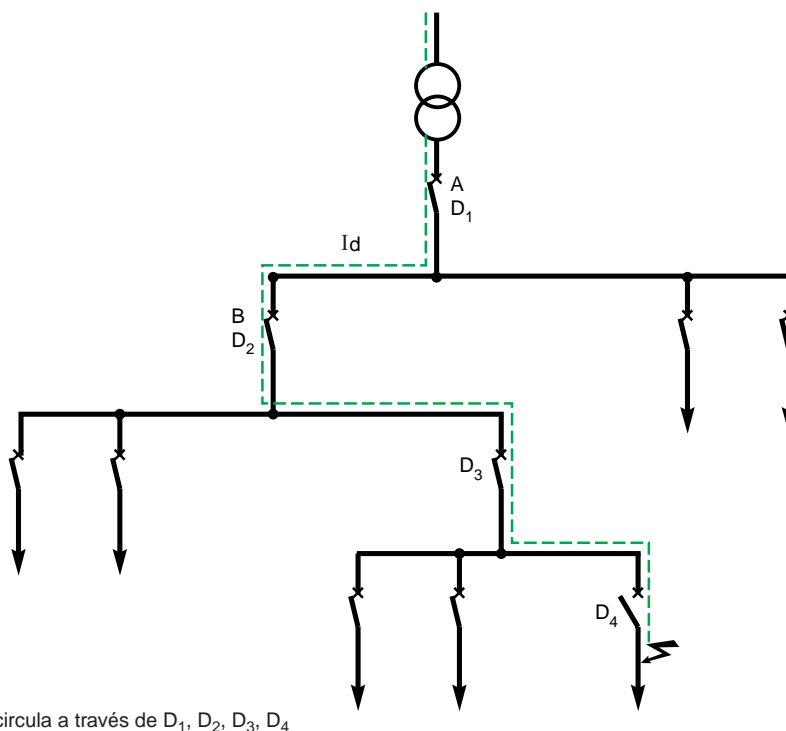
### Ejemplos:

- una corriente de cortocircuito elevada crea una caída de tensión y puede solicitar al dispositivo de protección contra las bajadas de tensión o mínimos de tensión,

- un defecto de aislamiento puede detectarse simultáneamente como defecto homopolar por un dispositivo de protección diferencial y como defecto de sobreintensidad por el dispositivo de protección contra los cortocircuitos (este caso depende de los regímenes de neutro a tierra; IT y TN),

- una elevada corriente de cortocircuito puede provocar el funcionamiento del dispositivo de protección contra los defectos a tierra (en los casos de régimen de neutro TT) por las saturaciones locales del toro que puedan crear falsas corrientes homopolares.

Para una red determinada, el estudio de la selectividad, o más generalmente, del plan de protección de una instalación, se basa en las características de los dispositivos de protección publicadas por los constructores.



**Fig. 1:** Varios interruptores automáticos se ven afectados por el defecto.

Este estudio se inicia por el análisis de las necesidades en dispositivos específicos de protección para cada tipo de defecto y sigue un análisis de la coordinación de las diferentes protecciones que pueden verse solicitadas. Ello permite obtener la mejor continuidad de servicio simultaneando la garantía de protección de los bienes y las personas.

En el próximo capítulo trataremos el problema de la selectividad en el caso de sobreintensidad (sobrecargas y cortocircuitos).

La selectividad entre interruptores automáticos se materializa simplemente por la apertura o no de varios interruptores automáticos (figura 2).

### Selectividad total

Una distribución la consideraremos totalmente selectiva si, para cualquier valor de corriente de defecto, sólo el dispositivo de protección situado más abajo, de entre los solicitados por la corriente del defecto, abre y permanece abierto.

### Selectividad parcial

Decimos que hay selectividad parcial si la condición anterior no se cumple a partir de un cierto valor de la corriente de defecto.

## Zonas de selectividad

En una instalación de distribución eléctrica pueden presentarse dos tipos de defectos por sobreintensidad:

- las sobrecargas,
- los cortocircuitos.

Generalmente consideramos que las sobrecargas son las sobreintensidades comprendidas entre 1,1 y 10 veces la intensidad de servicio.

A partir de este valor, se trata de cortocircuitos que conviene eliminar en el menor tiempo posible, por la intervención de los relés instantáneos (INS), o de corto retardo (CR) de los interruptores automáticos.

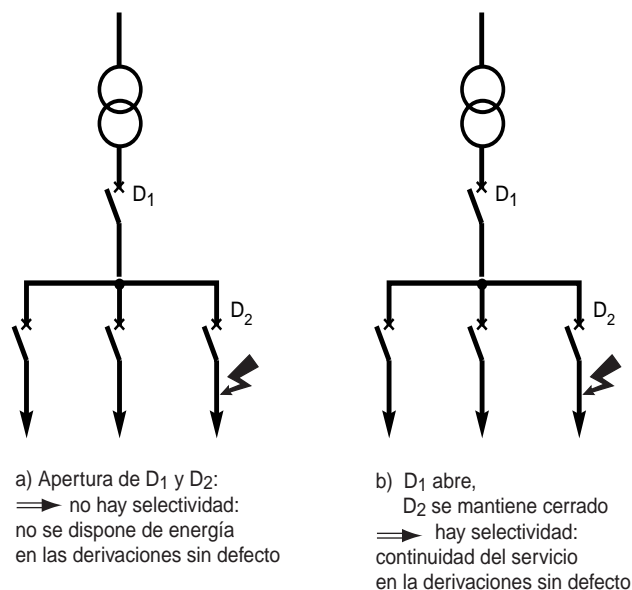


Fig. 2: Comportamiento de los interruptores automáticos sobre un defecto.

El estudio de la selectividad difiere según sea el tipo de defecto.

### En la zona de las sobrecargas

Esta zona se sitúa a partir del umbral de funcionamiento ILR del dispositivo de largo retardo (LR). La curva de disparo  $t_c = f(I_p)$  es generalmente de tiempo inverso para adaptarse mejor a la curva térmica admisible de los cables.

El método conocido y extensamente difundido consiste en trazar, en un sistema de coordenadas logaritmo-logaritmo las curvas de los relés LR afectados por el defecto (figura 3).

Para un valor cualquiera de la sobreintensidad, la selectividad queda asegurada, en sobrecarga, si el tiempo de no desconexión del interruptor situado, aguas arriba D1 es superior al tiempo máximo de ruptura del interruptor automático D2 (comprendiendo el tiempo de arco). Esta condición se realiza en la práctica si se cumple que  $I_{LR1} / I_{LR2} > 1,6$ .

### En la zona de los cortocircuitos

La selectividad se trata por comparación de las curvas del interruptor aguas arriba y del interruptor aguas abajo.

Las técnicas que permiten llegar a la selectividad en cortocircuito entre dos interruptores automáticos se apoyan en el empleo de interruptores automáticos y relés de tipo o regulaciones diferentes, evitando que las curvas se superpongan o sean secantes entre sí.

Estas técnicas son múltiples y se presentan en el próximo capítulo.

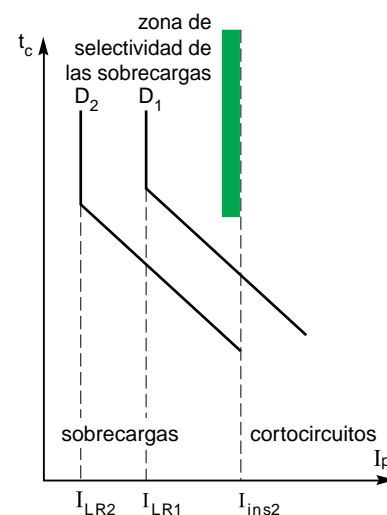


Fig. 3: Selectividad a las sobrecargas.

## 2 Las técnicas de selectividad en cortocircuito

Son numerosas las técnicas que permiten alcanzar el objetivo de la selectividad en cortocircuito entre dos aparatos:

- la selectividad amperimétrica,
- la selectividad cronométrica,
- la selectividad SELLIM,
- la selectividad lógica,
- la selectividad energética (objeto de los **capítulos 3 y 4**).

### Selectividad amperimétrica

Es el resultado de la separación entre los umbrales de los relés instantáneo o de corto retardo de los interruptores automáticos sucesivos.

Se usa, sobre todo, en distribución terminal, con la instalación de los interruptores automáticos rápidos, desprovistos de dispositivo de retardo intencional a la desconexión.

Se aplica a los casos de cortocircuito y conduce generalmente a una selectividad parcial.

Es tanto más eficaz cuanto más diferentes son las corrientes de defecto en uno u otro punto de una red, debido a la impedancia no despreciable de los conductores, sobre todo los de sección débil (**figura 4**).

La zona de selectividad es tanto más importante cuanto mayor es la separación entre los umbrales de los relés instantáneos de  $D_1$  y  $D_2$  y que el punto del defecto está alejado de  $D_2$  ( $I_{cc} \text{ débil} < I_{ins} \text{ de } D_1$ ).

La relación mínima entre  $I_{ins1}$  e  $I_{ins2}$  es de 1,5 teniendo en cuenta la precisión de los valores de umbral.

### Selectividad cronométrica

Para garantizar una selectividad total, las curvas de disparo de los dos interruptores automáticos no deben superponerse en ningún punto, cualquiera que sea el valor de corriente presunta.

Para corrientes de defecto importantes, la selectividad total está

garantizada si las dos partes horizontales de las curvas, a la derecha de  $I_{ins1}$ , son distintas.

Para alcanzar esta condición podemos usar varias soluciones:

- la más clásica consiste en elegir interruptores automáticos selectivos, equipados con un dispositivo de retardo intencional,
- la segunda se aplica solamente al último nivel de la distribución y consiste en la utilización de un interruptor automático limitador.

### Empleo de interruptores automáticos selectivos

El término selectivo tiene dos significados:

- el relé del interruptor automático está equipado con un sistema de temporización fijo o regulable;
- la instalación y el interruptor automático son capaces de soportar la corriente de defecto durante el tiempo del retardo intencional (umbral térmico y umbral electrodinámico).

Un interruptor automático selectivo va precedido normalmente, aguas arriba, de otro interruptor automático selectivo cuyo retardo intencional es más importante.

El empleo de este tipo de interruptores automáticos que corresponde a la selectividad cronométrica conduce, en caso de defecto, a tiempos totales de ruptura superiores a 20 ms (un período), pudiendo llegar hasta algunos centenares de ms (**figura 5**).

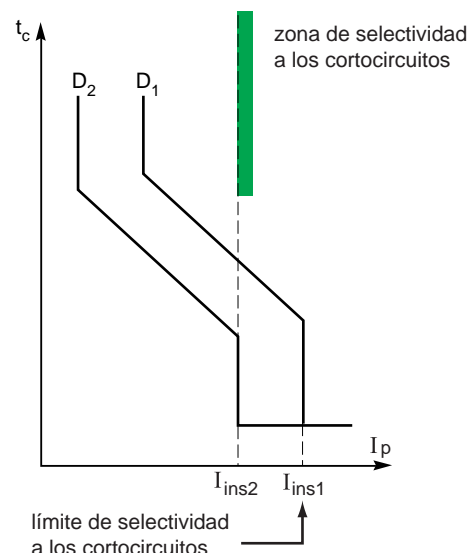
Cuando la instalación y, eventualmente, el interruptor automático no son capaces de soportar durante la temporización un alto valor de  $I_{cc}$ , es necesario que el interruptor automático  $D_1$  esté equipado con un relé instantáneo de umbral alto (DIN).

En este caso, la zona de selectividad está limitada al umbral del (DIN) del interruptor automático situado aguas arriba (**figura 5**).

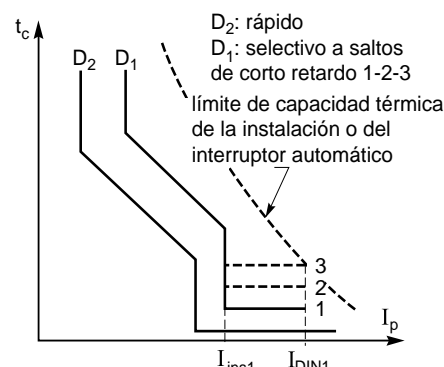
### Empleo de interruptores automáticos limitadores y selectividad «pseudo-cronométrica»

Estos interruptores automáticos están caracterizados por:

- el hecho de que limitan fuertemente la corriente de cortocircuito gracias a su velocidad de apertura y a su tensión de arco elevada,



**Fig. 4:** Selectividad amperimétrica.



**Nota:** El empleo de un relé instantáneo de umbral alto DIN, fija el límite de selectividad.

**Fig. 5:** Selectividad cronométrica.



■ el hecho de que cuanto mayor es la corriente de cortocircuito presunta, tanto más rápidos son.

Con ello, la elección de un interruptor automático limitador aguas abajo permite obtener una selectividad «pseudo-cronométrica» entre dos niveles de protección. Esta solución, por su efecto de limitación y rapidez en eliminar el defecto, permite además limitar las solicitaciones térmicas y electrodinámicas en las instalaciones (figura 6).

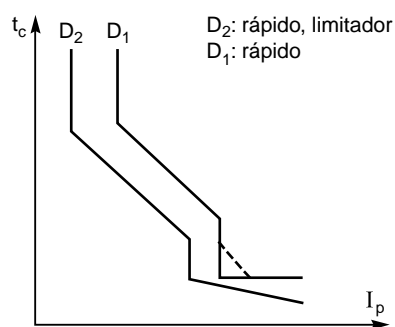
## Selectividad SELLIM

El sistema «SELLIM» resulta interesante desde varios aspectos:

- la selectividad,
- la filiación,
- la reducción de las solicitaciones en la instalación.

Consiste en instalar, aguas arriba de un interruptor automático rápido  $D_2$ , un interruptor automático ultra limitador  $D_1$ , equipado con un relé específico cuya característica distintiva es que no desconecta con la primera semionda de corriente de defecto (figura 7).

Un defecto producido en B será percibido por los dos interruptores automáticos.



**Nota:** El empleo, sobre  $D_1$ , de relés de corto retardo dependiente (en puntos) favorece la selectividad.

Fig. 6: Selectividad pseudo-cronométrica.

$D_2$ , equipado con un relé instantáneo se abre a partir del instante que la corriente de defecto es superior a su umbral de disparo y elimina el defecto en menos de un semiperiodo.

$D_1$  ve solamente una semionda de corriente y no desconecta. Pero la corriente de defecto provoca la repulsión de los contactos con lo que limita la corriente y las solicitaciones correspondientes. Esta limitación de la corriente de defecto permite el empleo, aguas abajo, de interruptores automáticos con poder de ruptura inferior a la corriente de defecto presunta.

Un defecto en A provoca la repulsión de los contactos del interruptor automático limitador lo que conlleva

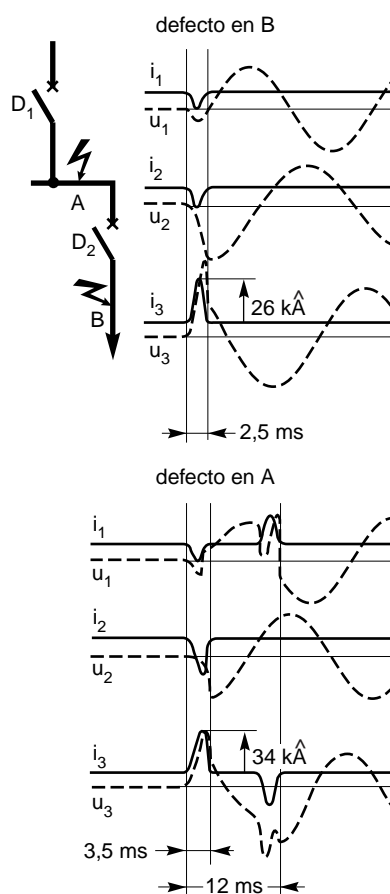


Fig. 7: Selectividad SELLIM  
( $D_1$  = compact C 250 L SB  
 $D_2$  = compact C 125 N).

una limitación de las solicitaciones debidas a la corriente de defecto y la de corriente limitada.

## Selectividad lógica

Este sistema necesita de una transferencia de informaciones entre los relés de los interruptores automáticos de los diferentes niveles de la distribución radial.

Su principio es simple (figura 8):

- todos los relés que ven una corriente superior a su umbral de funcionamiento envían una orden de espera lógica al que está justamente aguas arriba.
- el relé del interruptor automático situado inmediatamente aguas arriba del cortocircuito no recibe orden de espera y dispara inmediatamente.

Con este sistema, en todos los niveles de la distribución, los tiempos de eliminación de un defecto quedan cortos.

La selectividad lógica se aplica a los interruptores automáticos de baja tensión selectivos de alta intensidad, sobre todo se utiliza en las redes industriales de alta tensión. Para más detalles ver el Cuaderno Técnico nº 2 «Protección de las redes por el sistema de selectividad lógica».

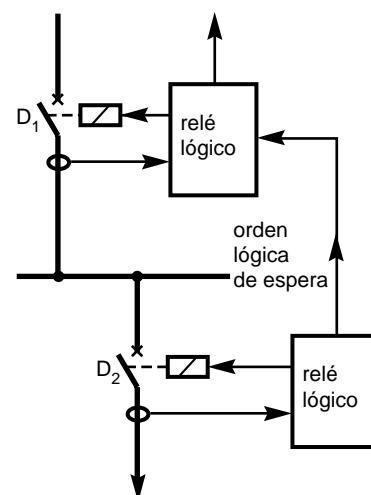


Fig. 8: Selectividad lógica.

## Empleo de los diferentes tipos de selectividad

Los diferentes sistemas de selectividad presentados se combinan entre sí habitualmente para obtener una mejor disponibilidad de la energía eléctrica; ver a título de ejemplo la **figura 9**.

Actualmente, los estudios de selectividad se realizan con la ayuda de tablas elaboradas por los constructores. Dan los límites de selectividad para cada combinación de interruptores automáticos y para cada uno de los relés.

Los costes resultantes de una no selectividad eventual y de la elección de la aparamenta deben tenerse muy en cuenta.

La selectividad energética presenta, en el próximo capítulo, una innovación que simplificará considerablemente los estudios en distribución en baja tensión y permitirá obtener, en muchos niveles, la selectividad total con un menor coste.

circuito afectado	tipo de selectividad				tipo de interruptor automático
	lógica	cronométrica	«SELLIM»	pseudo-cronométrica	
origen de la instalación					selectivo lógico
distribución de potencia					selectivo
					rápido limitador «SELLIM»
					rápido
distribución terminal					rápido limitador

**Fig. 9:** Ejemplo de empleo de los diferentes tipos de selectividad.

### 3 La selectividad energética

La selectividad energética es una mejora y una generalización de la selectividad «pseudo-cronométrica» descrita en el capítulo anterior: la selectividad es total si, para cualquier valor de  $I_p$ , la energía que deja pasar el interruptor automático situado aguas abajo es inferior a la energía necesaria para entrar en acción el relé del interruptor automático situado aguas arriba.

La tecnología del principio de selectividad energética ha sido objeto de una patente internacional por parte de Merlin Gerin, con la creación de la gama de interruptores automáticos Compact NS.

Estos interruptores automáticos rápidos y fuertemente limitadores responden a la evolución de una necesidad:

- aumento de las potencias instaladas, lo que representa un incremento de las corrientes de cortocircuito y de los poderes de ruptura necesarios,
- preocupación por minimizar las sollicitaciones en la instalación y limitar la corriente de defecto en intensidad y duración.

Para razonar en energías y comprender la selectividad energética un elemento importante es la elección del cuadro de representación de las curvas de funcionamiento, según se define seguidamente, en el próximo apartado.

Examinaremos seguidamente el comportamiento energético de los interruptores automáticos limitadores y sus diversos relés.

#### Cuadro de representación de las energías

Las energías  $t_c = f(I_p)$  normalmente utilizadas para los estudios de selectividad no son de aplicación con los interruptores automáticos limitadores cuando las corrientes son superiores a  $25 I_n$  (ello corresponde

a los tiempos de ruptura inferiores a 10 ms, a la frecuencia de 50 Hz).

La selectividad debe estudiarse a partir de los fenómenos transitorios y ya no a partir de los fenómenos periódicos. La comprensión de la selectividad energética necesita la caracterización y la explotación de:

- la onda de corriente que deja pasar el interruptor automático durante la ruptura, caracterizada por su integral de Joule  $\int i^2 dt$  (generalmente expresada como  $I^2 t$ ) que corresponde a la energía de ruptura  $E_c$ ,
- la sensibilidad de los relés ante la energía correspondiente al impulso de corriente.

Así, lógicamente estas características se pueden representar por las curvas  $I^2 t = f(I_p)$  y  $t_c = f(I_p)$  (figura 10).

Hay que notar que la norma CEI 947.2 prevé la caracterización de los interruptores automáticos por sus tipos de curvas.

Por razones prácticas, la curva  $I^2 t = f(I_p)$  se representa en un sistema de coordenadas logaritmo-logaritmo.

Para el estudio de la selectividad, los límites de  $I^2 t$  de ruptura ( $E_c$  de los interruptores automáticos) se sitúa entre  $10^4$  y  $10^7$  A<sup>2</sup>s para valores de corriente presunta entre 1 y 100 kA. En el diagrama cartesiano tomaremos tres décadas para los valores de  $E_c$  y dos para la corriente.

Si consideramos que la semionda de corriente cortada es equivalente a una semi-senoide con una pendiente en el origen igual a la corriente presunta, la energía de ruptura  $E_c$  puede expresarse en función de  $I_p$  a partir de las expresiones siguientes (ver anexo de ruptura con limitación):

- para  $t \geq 10$  ms  
(2)  $\Rightarrow E_c = I_p^2 t$
- para  $t < 10$  ms  
(3)  $\Rightarrow E_c = 4 \cdot f^2 \cdot I_p^2 \cdot t_{vc}^3$

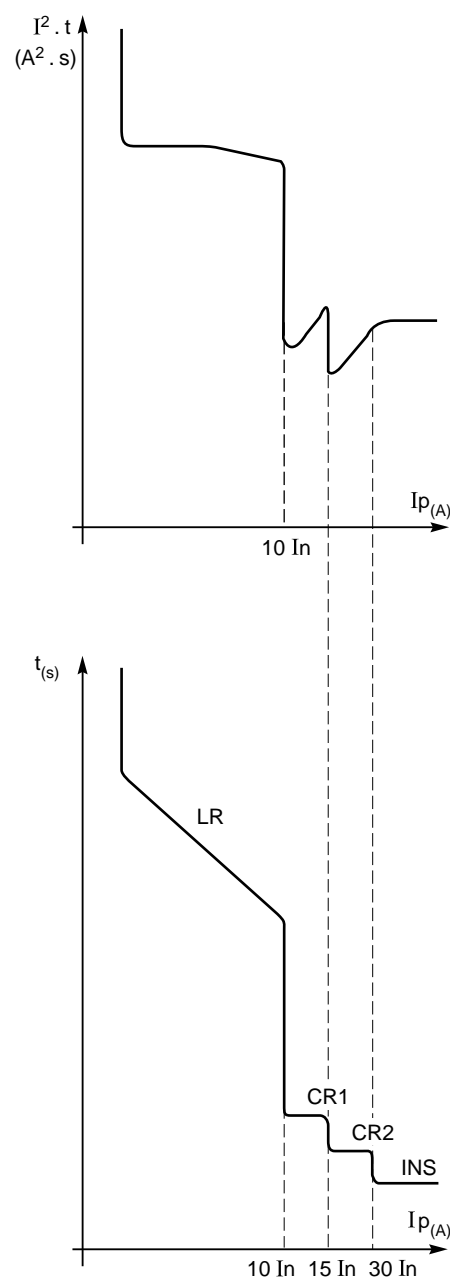


Fig. 10: Curvas  $t_c = f(I_p)$  e  $I^2 t = f(I_p)$  de un interruptor automático equipado con un relé electrónico.

ó

$$(4) \Rightarrow E_c = \frac{\hat{I}_c^3}{4\sqrt{2} \cdot f \cdot I_p}$$

Partiendo de estas ecuaciones es posible mejorar el diagrama de ejes  $I^2 \cdot t / I_p$  para obtener informaciones suplementarias: tiempo virtual de ruptura ( $t_{vc}$ ) y valor de cresta de corriente limitada ( $\hat{I}_c$ ).

#### Líneas de los tiempos (figura 11)

Sobre el diagrama  $I^2 \cdot t / I_p$  puede trazarse una familia de rectas correspondientes a las condiciones de ruptura o tiempo constante para una frecuencia determinada.

Ejemplo: para  $f = 50$  Hz determinamos las rectas para:

■  $t = 20$  ms correspondiente al tiempo de ruptura a considerar más corrientemente ya que  $I_p$  es superior al umbral de disparo instantáneo e inferior al de repulsión de los contactos:

$$(2) \Rightarrow E_c = I_p^2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}$$

■  $t = 10$  ms que es el tiempo de ruptura en el umbral de la limitación:

$$(2) \Rightarrow E_c = I_p^2 \cdot 10^{-2}$$

■  $t = 9$  a  $4$  ms que corresponde al comportamiento del interruptor automático como limitador:

$$(3) \Rightarrow E_c = I_p^2 \cdot t_{vc}^3 \cdot 10^4$$

#### Líneas de corrientes de cresta

A partir de la ecuación (4)

$$E_c = \frac{\hat{I}_c^3}{4\sqrt{2} \cdot f \cdot I_p}$$

se construye una familia de rectas que corresponde a los valores de cresta limitadas constantes (figura 11).

Es de notar que esta tabla de representación permite caracterizar los interruptores automáticos y los relés a 50 Hz, para los defectos tripolares, bipolares o unipolares.

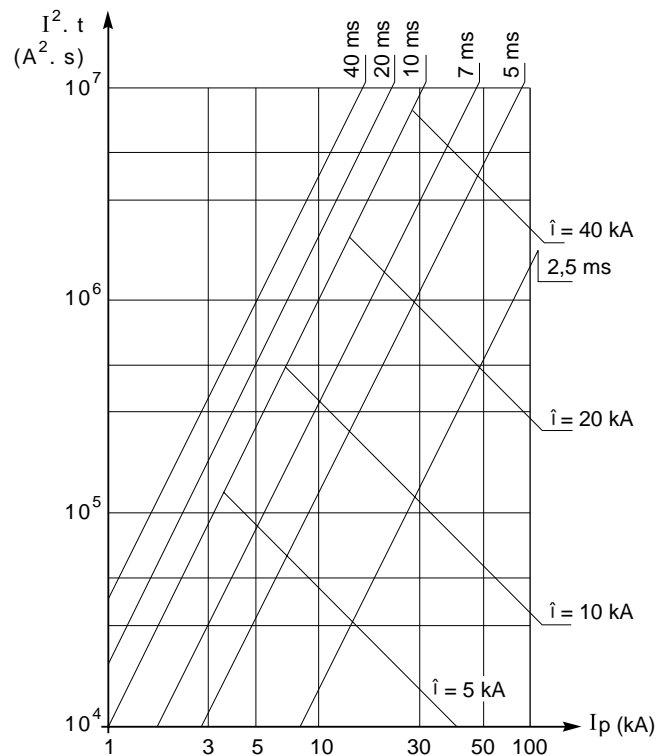


Fig. 11: Gráfico de representación de las energías.

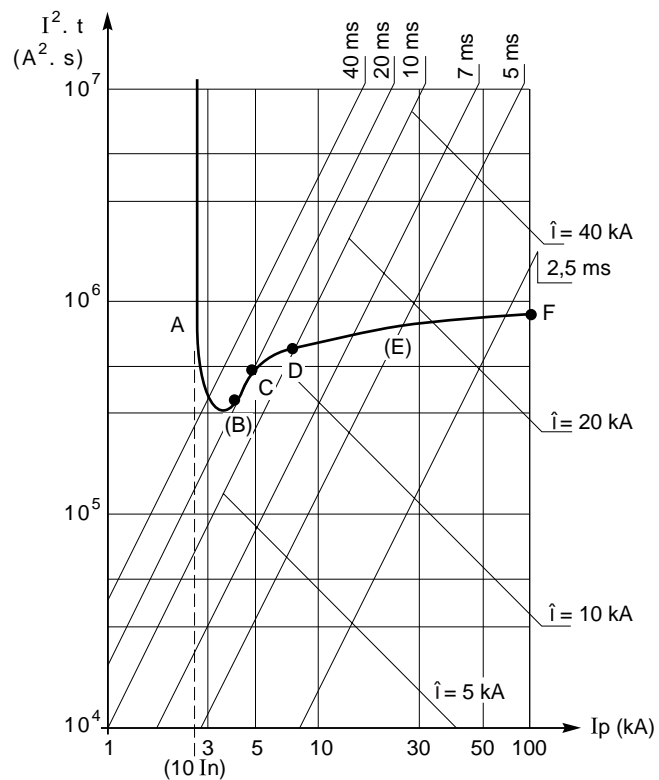


Fig. 12: Curva de ruptura de un interruptor automático limitador.

## Características de un interruptor automático Compact NS

### Representación de $I^2t$ de ruptura

La característica del valor de  $I^2t$  que deja pasar un interruptor automático sale de los ensayos de tipo normalizados o de simulaciones numéricas realizadas a una tensión y frecuencia determinadas.

Las curvas que siguen corresponden a defectos trifásicos a 400 V - 50 Hz.

Pueden construirse curvas similares para otras frecuencias y tensiones.

Los valores utilizados son los máximos obtenidos para diferentes ángulos de disparo o desconexión (figura 12).

### Interpretación de la curva

Sobre la curva de la figura 12, que corresponde a un interruptor automático compact NS, de calibre 250 A, equipado con un relé electromecánico a corto retardo dependiente (CRD) con umbral a 10  $I_n$ , aparecen una serie de informaciones.

Estas informaciones caracterizan las diferentes fases del comportamiento, en ruptura, del interruptor automático limitador, según el valor de la corriente de cortocircuito presunta  $I_p$ .

■ punto A: a partir del punto en que la corriente de defecto alcanza el umbral de funcionamiento del relé, el tiempo de ruptura es típicamente de 50 ms para un relé INS o CRD,

■ punto B: cuando la corriente de defecto supera el umbral de funcionamiento del relé, el tiempo de ruptura disminuye y se estabiliza en 20 ms a partir de 16  $I_n$ ,

■ punto C: cuando la corriente de defecto se sitúa al nivel del umbral de repulsión de contactos, se produce un inicio de la limitación de la corriente por la aparición de una caída de tensión de arco en el circuito. Esta limitación provoca una reducción en los tiempos de paso por cero de la corriente con lo que la eliminación del defecto pasa de 20 ms a 10 ms a medida que aumenta  $I_p$ ,

■ punto D: cuando la corriente de defecto es del orden de 1,7 veces el umbral de repulsión, la energía de propulsión de los contactos es suficiente para que éstos se separen totalmente; el tiempo de ruptura es entonces típicamente 10 ms.

Esta ruptura, de tipo reflejo, es autónoma y no precisa un relé si no es para confirmar el estado de desconexión del interruptor automático y evitar que los contactos cierren nuevamente de forma intempestiva,

■ zona E: cuando la corriente de defecto evoluciona alrededor de 2 veces el valor umbral de repulsión de los contactos, la limitación de la corriente de defecto es cada vez más eficaz, lo que se traduce en que los tiempos de ruptura son cada vez más cortos,

■ punto F: el final de la curva representa el límite del poder de ruptura del interruptor automático.

La curva que se ha trazado es muy rica en informaciones:

- $I^2t$  de ruptura en función de la corriente presunta;
- umbral de disparo ( $I$  umbral; punto A);
- corriente de inicio de repulsión ( $I_r$ ; punto C);
- poder de corte (PdC) (punto F);
- tiempo de ruptura ( $t_{vc}$ ) en función de la corriente presunta;
- corriente de cresta limitada ( $\hat{i}_c$ ) en función de la corriente presunta;
- corriente a partir de la cual  $t_{vc} < 10$  ms (inicio de la limitación).

## Características de los relés

Los relés vienen caracterizados por el tiempo de respuesta ante una corriente determinada, (onda, semionda, ...).

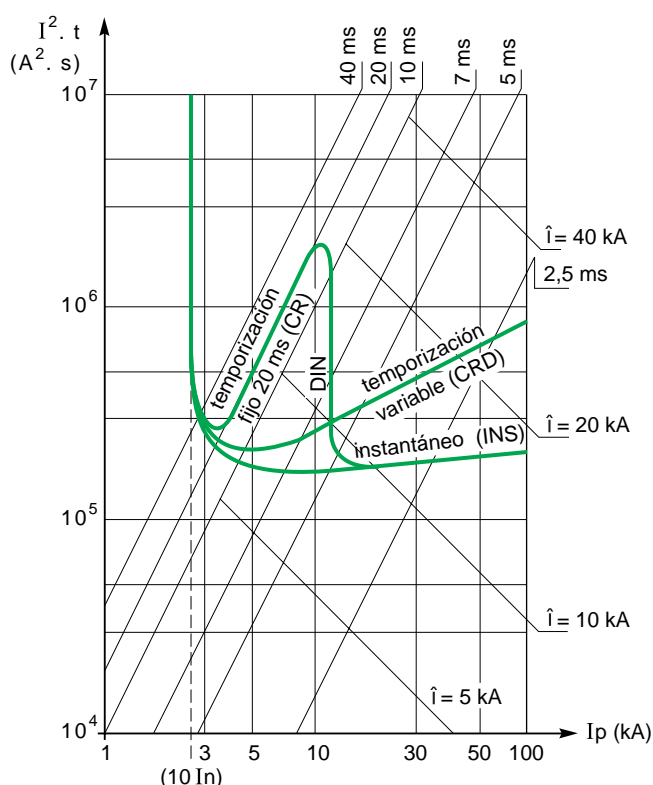


Fig. 13: Curvas de diferentes relés magnéticos.

Haciendo variar la duración y el valor de cresta de la corriente, lo que corresponde con diferentes corrientes limitadas por un interruptor automático, se obtiene, por ensayos sucesivos, una serie de puntos que pueden situarse sobre el gráfico descrito anteriormente con la finalidad de obtener la curva característica de un relé.

### Relés magnéticos

#### ■ relé instantáneo

Constituido, generalmente, de una U de material magnético que constituye el núcleo y de una armadura, generalmente móvil, asegura la protección contra los cortocircuitos. Su tiempo de intervención es inferior a 50 ms en su umbral de funcionamiento (situado entre 5 y 10 veces la corriente nominal) y decrece rápidamente por debajo de 10 ms cuando la corriente aumenta (figura 13).

#### ■ relé de umbral alto (DIN)

Como se ha indicado en el párrafo correspondiente de selectividad cronométrica, los DIN tienen por misión en el cuadro de empleo de la selectividad cronométrica, limitar las sollicitaciones térmicas (figura 5) sobre la instalación y el aparato de ruptura.

El relé DIN es un relé instantáneo con un umbral de varias decenas de  $I_n$

Puede ser de tipo electromagnético o electrónico.

#### ■ relé a temporización constante

Se trata de un relé instantáneo equipado con un sistema de retardo tipo relojería con la finalidad de convertir su disparo selectivo en relación al interruptor automático instalado aguas abajo.

Los retardos pueden estar comprendidos entre 10 y 500 ms, generalmente son regulables por escalones. La figura 13 describe la curva (escalón 20 ms) correspondiente a un retardo corto.

Si la corriente térmica ( $I^2t$ ), por su retardo importante, debe limitarse, interviene el DIN (figura 13).

■ relé a temporización variable en función de  $I_p$  (corto retardo dependiente: CRD).

La temporización se realiza por la inercia de una masa; esta temporización es inversamente proporcional a  $I_p$  (figura 13).

### Relé electrónico

Los disparos instantáneos de los relés electrónicos son sensibles al valor eficaz (RMS) o al valor de cresta de la corriente. Su característica  $I^2t$  está situada, para valores de corriente de defecto importantes, teóricamente sobre una recta  $\hat{I}_c = \text{constante}$ .

En realidad esto es cierto para tiempos de impulsión de corrientes superiores al tiempo de reacción del conjunto accionador del relé (típicamente 4 ms), por debajo de este valor la inercia de la parte

mecánica del relé hace que se retorne, para valores altos de  $I_p$ , a una característica del tipo relé electromecánico instantáneo.

Entonces, es necesario caracterizar el relé por la curva característica  $E_c = f(I_p)$  efectuando ensayos idénticos a los efectuados con los relés magnéticos.

Estos relés pueden ser del tipo instantáneo o del tipo retardado.

Es posible asociar varios tipos de relés electrónicos, por ejemplo:

- 10 a 15  $I_n$  CR (40 ms),
- 15 a 30  $I_n$  CR (10 ms),
- > a 30  $I_n$  INS.

La figura 14 ilustra este ejemplo, las curvas de esta asociación son comparables a las de la figura 10 en cuanto a la energía de ruptura del interruptor automático.

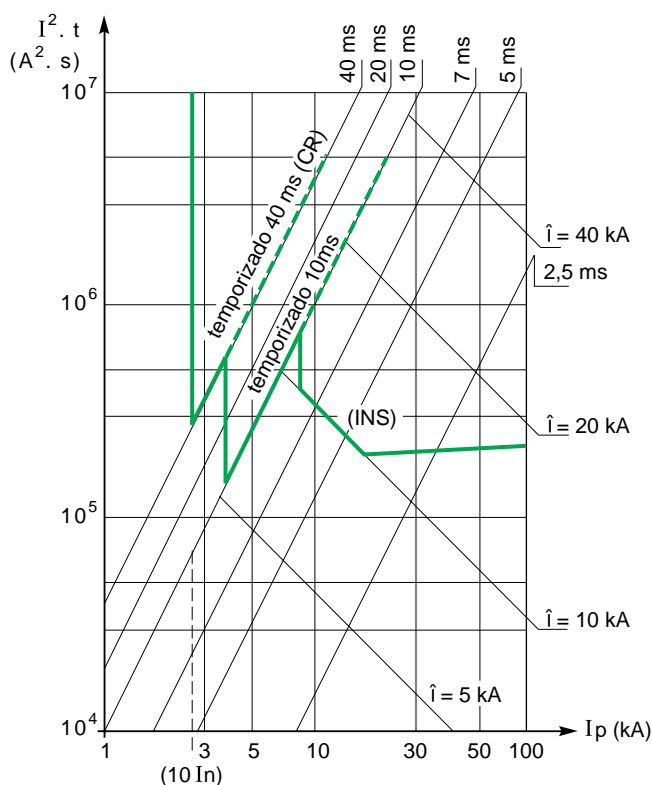


Fig. 14: Ejemplo de asociación de curvas de relés electrónicos.

### Relés con detección de arco

Los detectores de arco generalmente van asociados a relés electrónicos y pueden utilizarse para asegurar la protección:

- de una celda: si en el interior de la celda se produce un arco, el detector ordena la apertura del interruptor automático de entrada,
- de un interruptor automático selectivo: el detector de arco, situado en la cámara de ruptura, provoca, vía el relé electrónico, el disparo instantáneo del interruptor automático.

Con ello se realiza la autoprotección del aparato y permite su empleo, justo hasta el límite de su capacidad electrodinámica.

### Relé a presión

En la cámara de ruptura de un interruptor automático aparece una presión, que es consecuencia de la energía desarrollada por el arco.

Esta presión puede, a partir de cierto nivel de la corriente de defecto, ser un medio de detección y de disparo.

Ello puede obtenerse canalizando la expansión de los gases contenidos en el recinto de ruptura hacia un

pistón de mando de un sistema de disparo del interruptor automático (figura 15).

El relé a presión puede utilizarse:

- para asegurar la autoprotección de un interruptor automático selectivo, (como el detector de arco),
- para mejorar el comportamiento en ruptura y la seguridad de funcionamiento de un interruptor automático limitador rápido.

Si a cada interruptor automático se le asocia un relé a presión bien calibrado, la selectividad entre los interruptores automáticos de diferente calibre queda garantizada para cualquier sobreintensidad superior a 20 In.

Es este relé a comportamiento energético ( $I^2t$  constante), que constituye la base de la selectividad energética empleada en los interruptores automáticos limitadores Compact NS.

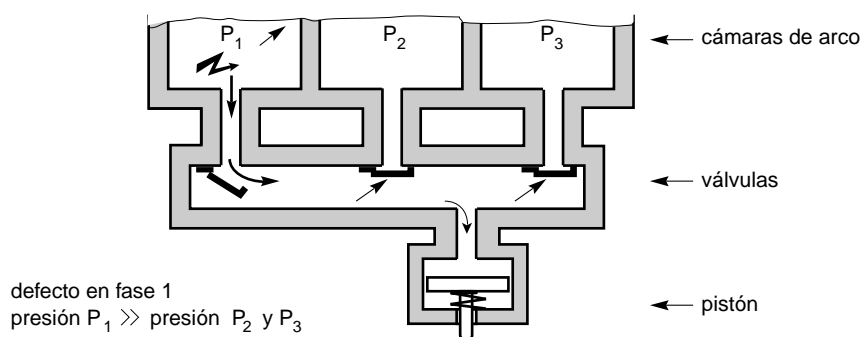


Fig. 15: Principio del relé a presión.



## 4 Interés y aplicación de la selectividad energética

Recordemos que el sistema de disparo de un interruptor automático, tanto si es electromecánico, electrónico o mixto, debe ser el mejor posible a nivel de los siguientes criterios:

- solicitudes mínimas para la instalación (limitar  $\hat{I}_c$  e  $I^2t$ ),
- garantía de disparo (seguridad),
- perturbación mínima de la parte sana de la instalación (bajadas de tensión),
- facilidad de los estudios de selectividad.

### Interruptor automático equipado con un relé a presión

El relé a presión, asociado a un relé CDR, electromagnético o electrónico a doble corto retardo permite responder en forma óptima a los criterios indicados anteriormente.

La **figura 16** muestra la «sensibilidad energética» de esta asociación. Cuanto mayor es la corriente de cortocircuito presunta, tanto menor es el tiempo de reacción, lo que conduce a una desconexión a energía  $I^2.t$  casi constante.

La energía que deja pasar el interruptor automático limitador, en la ruptura, sigue la misma ley, con un ligero decalado.

#### Solicitudes para la instalación

Las solicitudes son reducidas en comparación con las observadas con los interruptores automáticos limitadores de la generación precedente. Si retomamos el ejemplo de la **figura 16**, para un interruptor automático Compact NS 250 A y un  $I_p$  de 40 kA:

- el tiempo de ruptura es de 4 ms,
- la corriente de cresta es de 20 kA,
- el  $I^2t$  es de  $8 \cdot 10^5 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ .

#### Seguridad de funcionamiento

El relé a presión forma parte del mecanismo de apertura sobre el cortocircuito y depende del calibre del interruptor automático.

El relé CRD regulable (calibre), tanto si es de tipo electromecánico (**figura 13**) o electrónico (**figura 14**) es físicamente independiente del relé a presión.

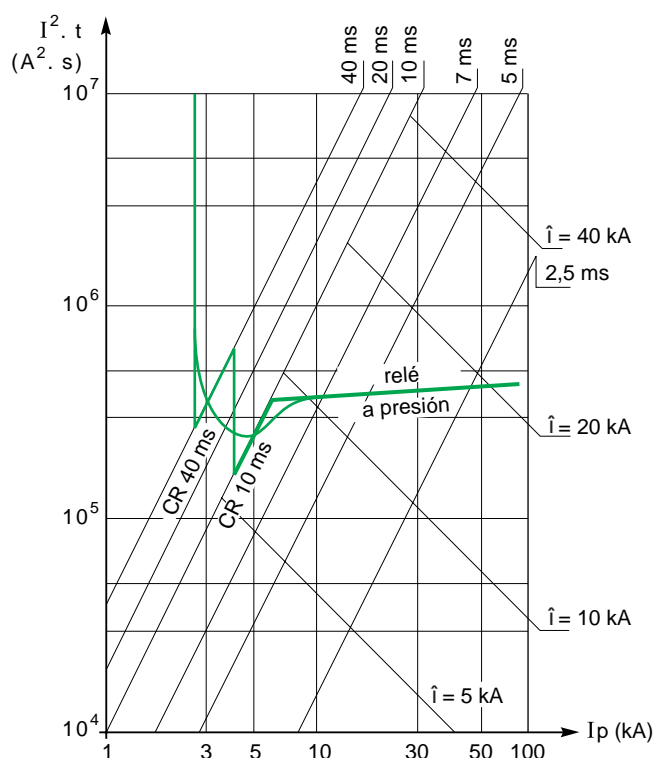
Esta separación física mejora la seguridad de funcionamiento.

#### Bajadas de tensión

En una instalación, las bajadas de tensión solicitan los relés de mínima o falta de tensión de los interruptores automáticos y de los contactores.

Su apertura intempestiva, a consecuencia de una bajada de tensión provocada por un cortocircuito, conlleva una pérdida de continuidad de servicio.

Es por esto que un estudio de selectividad también comprende el



**Fig. 16:** Curvas de asociación de relés (electromagnético y presión o electrónico y presión).

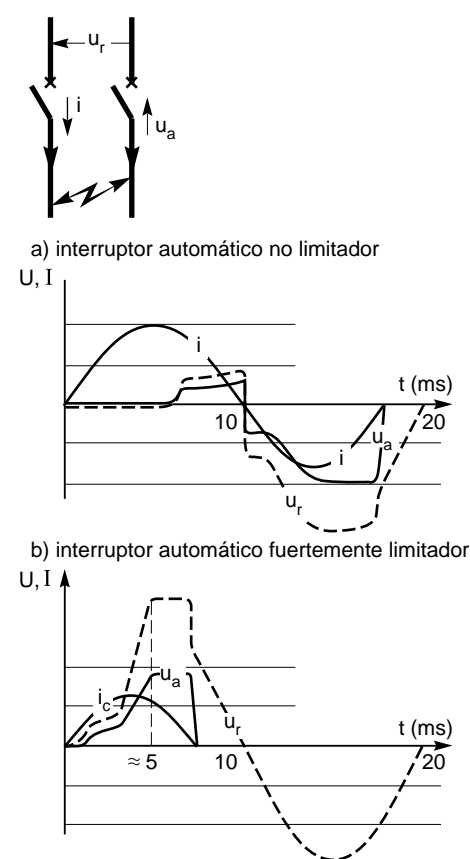


umbral de los contactores e interruptores automáticos en cuanto a relés y bobinas de mínima tensión ante las bajadas de tensión.

La bajada de tensión en la red tendrá la misma duración que la tensión de arco, que se opone a la tensión del generador o generadores, permitiendo la extinción de la corriente; la bajada de tensión es, pues, función del tipo de interruptor automático y del relé utilizado:

- con los interruptores automáticos no limitadores, la bajada de tensión es importante y su duración del orden de 10 a 15 ms (**figura 17**),

- con los interruptores automáticos limitadores, la aparición rápida de una tensión de arco significativa permite minimizar la bajada de tensión en duración y amplitud (**figura 17**).



**Fig. 17:** Las bajadas de tensión en la red dependen del tipo de interruptor automático empleado.

La bajada de tensión es del orden de 5 ms y del 50% de la tensión nominal para las corrientes cercanas al valor de repulsión de los contactos.

La bajada de tensión es del orden de 30% de la tensión nominal para corrientes más elevadas pero con tiempos del orden de 3 a 4 ms. Cuanto mayor es  $I_{cc}$  tanto mayor la bajada de tensión y tanto menor su duración.

Los relés de mínima tensión, eventualmente asociados a los interruptores automáticos no se ven afectados por tales bajadas de tensión.

### Selectividad

La energía que deja pasar el interruptor automático que corta está fuertemente limitada, es insuficiente

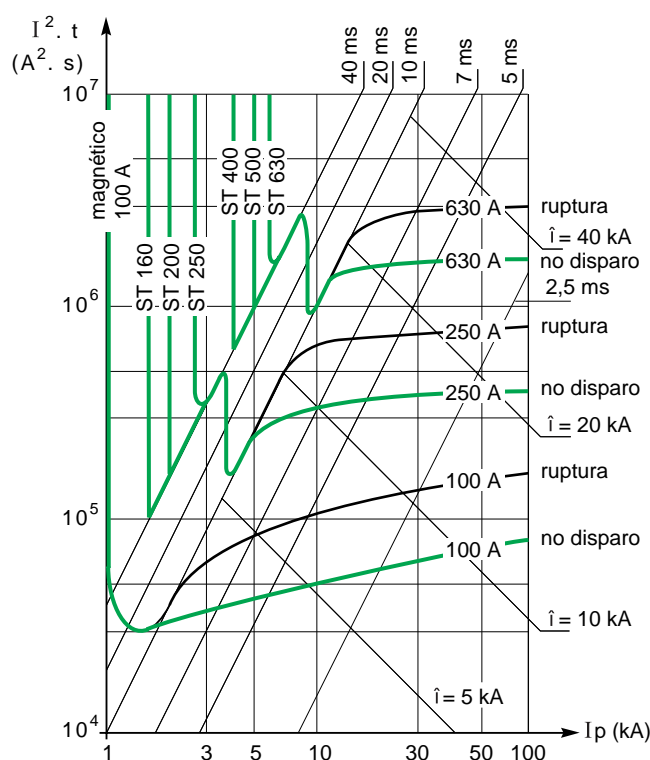
para solicitar el relé del interruptor automático situado aguas arriba, que permanece cerrado.

## La selectividad con los Compact NS

La gama Compact NS, que comprende los tamaños 100 - 160 - 250 - 400 - 630 A permite, por aplicación de la selectividad energética, según sea la relación de tamaños y calibres de los interruptores automáticos empleados, obtener selectividad parcial o selectividad total hasta el poder de ruptura.

### Selectividad total

La **figura 18** muestra un ejemplo de selectividad total hasta 150 kA, en



### Nota:

ST 160 - ST 200 y ST 250: relés electrónicos colocados sobre interruptores automáticos de calibre 250 A.

ST 400 - ST 500 y ST 630: relés electrónicos colocados sobre interruptores automáticos de calibre 630 A.

**Fig. 18:** Selectividad total entre los interruptores automáticos Compact NS de tamaños 100, 250 y 630 A.

tres etapas, con interruptores automáticos de tamaño 100, 250, 630 A equipados con diversos relés.

Para que haya selectividad total es suficiente que la energía que deja pasar un interruptor automático sea inferior a la energía necesaria para el funcionamiento del relé de disparo del interruptor automático instalado inmediatamente, aguas arriba.

### Regla práctica

**La selectividad es total, salvo excepciones, si:**

- los tamaños de los interruptores automáticos sucesivos se hallan en la relación  $\geq 2,5$ ,
- los calibres están en una relación superior a 1,6.

### Selectividad parcial

Si la regla práctica enunciada anteriormente no se respeta, la selectividad será parcial. La **figura 19** muestra que, entre un interruptor automático de tamaño 160 A y otro de tamaño 250 A, equipado con relé de 250 A, la selectividad está asegurada hasta una corriente de cortocircuito presunta de 4 800 A. Este límite es más elevado que el obtenido en el mismo caso, con los Compact estándar.

### Filiación con los Compact NS

Recordemos que la filiación, cuyo empleo está recomendado y previsto por la norma UNE 20 460, permite al interruptor automático situado aguas arriba, ayudar al interruptor automático situado aguas abajo a cortar las fuertes corrientes de cortocircuito; esto, claro está y es necesario de precisar, en detrimento de la selectividad (salvo con el sistema «SELLIM»).

En los Compact NS, la filiación no modifica en nada la selectividad total o parcial descrita arriba.

Por contra, un Compact NS puede incluso ayudar a un interruptor automático de tipo diferente situado aguas abajo, con poder de ruptura insuficiente.

## Asociación con el material tradicional de protección

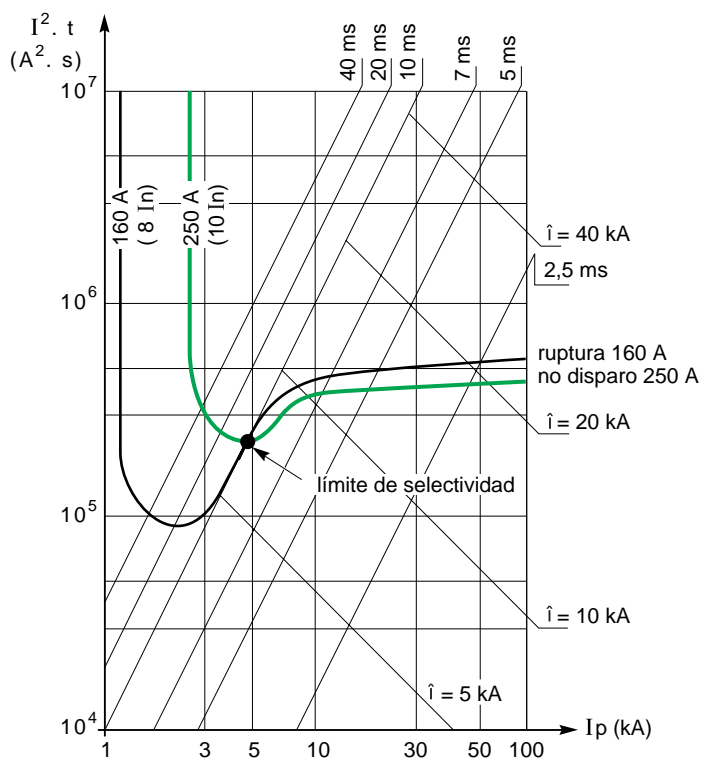
### Interruptores automáticos estándar

En una instalación existente, los interruptores automáticos fuertemente limitadores Compact NS pueden utilizarse para ampliar la instalación existente o reemplazando un interruptor automático existente, sin perturbar el límite de selectividad

alcanzado inicialmente. En efecto, si el nuevo interruptor automático es:

- aguas abajo, el fuerte poder limitador del nuevo aparato sólo puede mejorar el límite de selectividad que puede convertirse, si no lo era, en total (**figura 20**),

- aguas arriba, el límite de selectividad es, al menos, al anterior valor y el fuerte poder de limitación del interruptor automático Compact NS refuerza eventualmente la filiación.



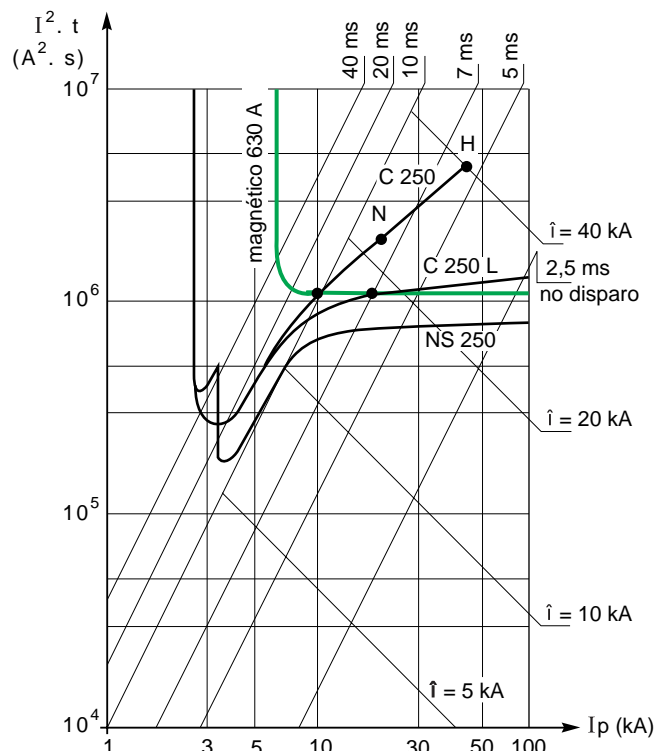
**Fig. 19:** Selectividad parcial entre interruptores automáticos Compact NS 250 A y 160 A.

## Fusibles

Las curvas  $I^2 \cdot t = f(I_p)$  (facilitadas por los fabricantes de fusibles) determinan:

- la energía necesaria para la fusión (prearco),
- la energía que pasa por el fusible durante la ruptura.

Para que exista selectividad, entre un interruptor automático, situado aguas arriba, y un fusible, el relé del interruptor automático no debe ser sensible a la suma de estas energías.



**Fig. 20:** La sustitución de un interruptor automático Compact NS C 250 N, H o L por un Compact NS 250 proporciona una mejor selectividad. En este caso, se transforma en total.

## 5 Conclusión

Los interruptores automáticos fuertemente limitadores, tanto más rápidos cuanto más importante es la corriente presunta de defecto, permiten normalmente con sólo respetar unas simples reglas, obtener una selectividad total en caso de varios niveles de distribución. Esto antes de eventualmente hacer uso de la selectividad cronométrica.

Es esta una innovación técnica importante que permite:

- simplificar considerablemente los estudios de selectividad,
- minimizar los esfuerzos electrodinámicos, las solicitaciones térmicas así como las bajadas de tensión como consecuencia de los cortocircuitos.

Este nuevo principio de selectividad, denominada energética, puesta a punto gracias al perfecto dominio de la energía que permiten pasar los interruptores automáticos al producir la ruptura, así como la sensibilidad de los relés a esta mínima energía contribuye a mejorar la disponibilidad de la energía eléctrica.

## 6 Anexo: repaso sobre la ruptura con limitación

La **figura 21** muestra la evolución de las corrientes y tensiones correspondientes al fenómeno de limitación sobre un semiperíodo.

La ley que aplicamos sobre la evolución de la corriente de cortocircuito ( $i_c$ ) es:

$$U_r - U_a = r \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} \approx L \cdot \frac{di}{dt}$$

■ en el origen del cortocircuito,  $U_a$  es nula, no hay arco, con lo que  $i_c$  e  $i_p$  son iguales y tienen la misma pendiente.

■ cuando  $U_a$  se iguala a  $U_r$ ,  $i_c$  pasa por su valor máximo ( $\hat{i}_c$ ) ya que su derivada es nula.

■ cuando  $U_a$  es superior a  $U_r$ ,  $i_c$  decrece y se anula en un tiempo  $t_c$ .

Se comprueba que la onda de corriente cortada es equivalente a una semi-senoide de período igual a dos veces el tiempo virtual de ruptura ( $t_{vc}$ ).

Con estas informaciones se consigue fácilmente determinar la energía disipada en las impedancias del circuito afectado.

La expresión reducida de esta energía, que denominamos «energía de ruptura» es:

$$Ec = \int_0^{t_{vc}} i_c^2 \cdot dt$$

siendo  $i_c$ , una función senoidal

$$Ec = \frac{1}{2} \cdot \hat{i}_c^2 \cdot t_{vc} \quad (1)$$

Es interesante expresar  $Ec$  en función de  $I_p$  y del tiempo ( $t_{vc}$ ) de duración de la ruptura.

■  $t_{vc} \geq 10 \text{ ms}$

Este tiempo significa que la corriente de defecto es de poca importancia pues los contactos del interruptor automático no presentan repulsión y no se considera el efecto limitador de la tensión de arco, luego:

$$i_c = i_p \text{ e } \hat{i}_c = \sqrt{2} \cdot I_p;$$

con ello, la expresión (1) se transforma en:

$$Ec = I_p^2 \cdot t \quad (2)$$

■  $t_{vc} < 10 \text{ ms}$

El interruptor automático limita la corriente de defecto.

$i_c$  e  $i_p$  tienen, como se ha indicado anteriormente, la misma pendiente en el origen, pues:

$$\frac{di}{dt} = \omega \cdot I_p \cdot \sqrt{2} = \omega' \cdot \hat{i}_c$$

$$\text{con } \omega' = \frac{\pi}{t_{vc}}$$

$$t_{vc} \cdot \omega \cdot I_p \cdot \sqrt{2} = \pi \cdot \hat{i}_c$$

de donde:

$$\hat{i}_c = t_{vc} \cdot 2 \cdot f \cdot I_p \cdot \sqrt{2}$$

o:

$$t_{vc} = \frac{\hat{i}_c}{2 \cdot f \cdot I_p \cdot \sqrt{2}}$$

Si de la expresión anterior (1) se extrae:

$$\hat{i}_c^2 = \frac{2 \cdot Ec}{t_{vc}}$$

resulta:

$$\frac{2 \cdot Ec}{t_{vc}} = \left( t_{vc} \cdot 2 \cdot f \cdot I_p \cdot \sqrt{2} \right)^2$$

de donde:

$$Ec = 4 \cdot f^2 \cdot I_p^2 \cdot t_{vc}^3 \quad (3)$$

Volviendo nuevamente a (1) y combinando con  $\hat{i}_c$ :

$$t_{vc} = \frac{2 \cdot Ec}{\hat{i}_c^2} = \frac{\hat{i}_c}{2 \cdot f \cdot I_p \cdot \sqrt{2}}$$

de donde se obtiene:

$$Ec = \frac{\hat{i}_c^3}{4 \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot I_p} \quad (4)$$

Las expresiones (3) y (4) permiten trazar las rectas de los tiempos de ruptura y valores de cresta de las corrientes limitadas en el diagrama doble logarítmico de energías de ruptura y corrientes de cortocircuito presuntas.

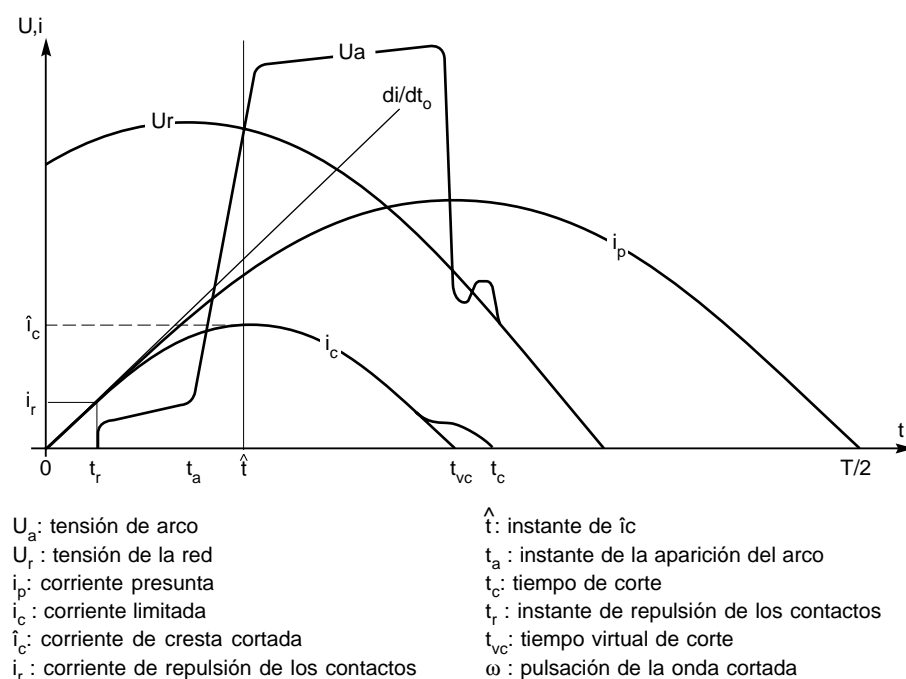


Fig. 21: Ruptura con limitación.