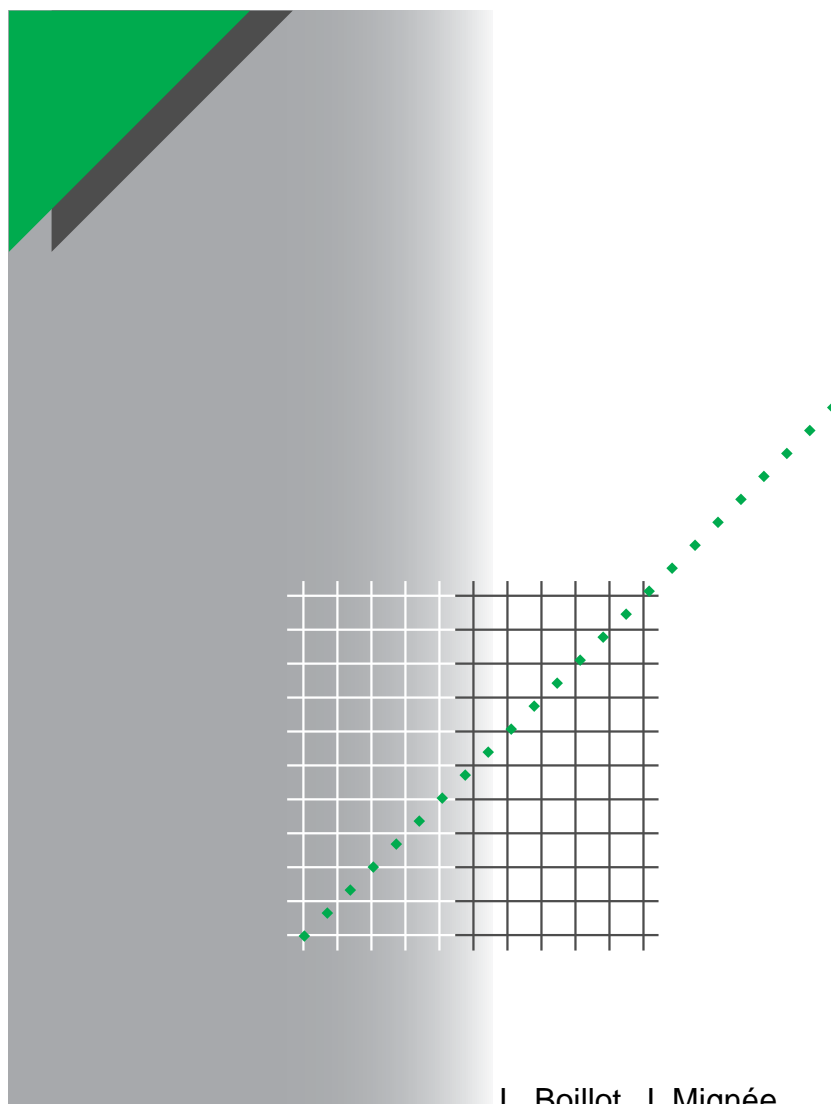


# Cuaderno Técnico nº 140

## Simulación del comportamiento en cortocircuito de los interruptores automáticos limitadores de BT



L. Boillot, J. Mignée

<b>Merlín Gerín</b>
Eunea Merlín Gerín
<b>Modicon</b>
<b>Telemecanique</b>
<b>Square D</b>
<b>Mesa</b>
<b>Himel</b>
<b>Crouzet</b>
<b>Infra+</b>

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

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

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:

<http://www.schneiderelectric.es>

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

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

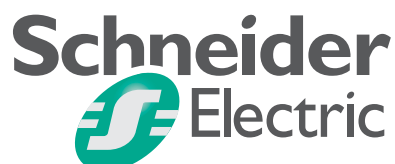
La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria:  
«Reproducción del Cuaderno Técnico nº 140 de Schneider Electric».

# **Cuaderno Técnico nº 140**

## **Simulación del comportamiento en cortocircuito de los interruptores automáticos limitadores de BT**

Autores: Louis Boillot, Jean Mignée

Traductor: Manuel Cortes Cherta, Dr. Ingeniero Industrial



# Simulación del comportamiento en cortocircuito de los interruptores automáticos limitadores de BT

Casi todos los interruptores de Baja Tensión llamados «limitadores» utilizan la propia corriente de defecto para asegurar la apertura de los contactos. Su funcionamiento depende de numerosos factores externos que los ensayos deben tener en cuenta.

El empleo de un modelo de simulación evita multiplicar los ensayos con valores reales y permite analizar la eficacia de los aparatos en las configuraciones más diversas.

## Índice

<b>1 Comportamiento físico de un interruptor automático limitador</b>	1.1	La rapidez	<b>p. 5</b>
	1.2	Poner la corriente de defecto a contribución	p. 5
	1.3	Previsión del comportamiento del interruptor automático limitador	p. 6
<b>2 Modelo de simulación de los interruptores automáticos limitadores</b>	2.1	Características de los interruptores automáticos	<b>p. 7</b>
	2.2	El interruptor automático en la red	p. 7
<b>3 Comparación del modelo y las experiencias</b>	3.1	Utilización del modelo	<b>p. 10</b>
<b>4 Conclusión</b>			<b>p. 11</b>

# 1 Comportamiento físico de un interruptor automático limitador

Un interruptor automático baja tensión se llama «limitador» cuando es capaz de reducir fuertemente la corriente de defecto de una instalación, tanto en lo que se refiere al valor de la corriente como a su duración. Un defecto de 22.000 A puede, por ejemplo, quedar limitado a una onda de corriente de 6.000 A, y no durar más de 3 ms.

Con ello se dividen los daños provocados por un cortocircuito por un factor comprendido entre 10 y 100, y la continuidad de servicio de una instalación queda muy mejorada. La limitación debida al interruptor automático depende de la misma corriente y de una tensión de arco que

fuerza el paso por cero de la corriente. Es lo mismo que en el caso de un fusible: la corriente de defecto, por efecto Joule, provoca la fusión del hilo con lo que se obtiene una tensión de arco.

En el caso de un interruptor automático limitador, esta tensión se obtiene por la apertura física de los contactos, que crea un arco de conmutación. Seguidamente se provoca un desplazamiento rápido de este arco hacia una cámara de ruptura, en la cual se subdivide el arco para disipar más energía y al mismo tiempo aumentar su ensión.

## 1.1 La rapidez

La tensión de arco es una característica propia de la arquitectura de la cámara de ruptura de un interruptor automático, pero una tensión de arco elevada no es una condición suficiente para que un interruptor automático sea limitador; también es necesario que esta tensión se introduzca lo más rápidamente posible en el circuito: Si no aparece hasta los 5 ms, el aparato no es limitador, pues no habrá modificado el valor de cresta de la corriente; en efecto, en una red a frecuencia industrial, el valor máximo de la corriente de defecto se alcanza

aproximadamente a los 5 ms del inicio del defecto. Por tanto la característica principal de un interruptor automático limitador es su capacidad para establecer muy pronto una tensión de arco elevada (en un tiempo del orden del milisegundo para un cortocircuito medio).

La rapidez de establecimiento de una tensión de arco está condicionada primero por la rapidez de la apertura de los contactos y seguidamente por la rapidez de desplazamiento del arco hacia la cámara de ruptura.

## 1.2 Poner la corriente de defecto a contribución

En todos los interruptores automáticos, a partir de un umbral de corriente se dispara un mecanismo de enclavamiento que permite asegurar la apertura de los contactos. Esta acción es relativamente lenta, debido la puesta en movimiento progresivo de toda una serie de piezas mecánicas; además esto introduce un retardo de la apertura, constante para cualquier intensidad del defecto.

A fin de remediar este inconveniente, los interruptores automáticos limitadores hacen uso, casi todos, de la acción directa de las fuerzas electromagnéticas debidas a la corriente de

defecto para abrir los contactos. La acción es así tanto más rápida cuanto más importante es el defecto.

Después de la separación de los contactos, las mismas fuerzas electromagnéticas desplazan el arco hacia la cámara de ruptura. Pero, para lograr un desplazamiento aún más rápido, el interruptor automático utiliza una parte de la energía disipada por el arco que acaba de crearse entre los contactos.

El aumento de presión debido al calentamiento brutal del aire contenido en el aparato, así como la evacuación de gases de materiales próximos

al arco, crean un flujo gaseoso violento que arrastra el arco hacia la cámara de ruptura. El enclavamiento mecánico sólo tiene por función confirmar la apertura de los contactos, antes de que las fuerzas electromagnéticas puestas en juego para abrirlos disminuyan demasiado o desaparezcan al anularse la corriente.

Al dar a la corriente de defecto el papel principal en el funcionamiento de un interruptor automático limitador, se obtiene una rapidez de acción adaptada a cada defecto, pero la previsión del comportamiento de un interruptor

automático se hace más difícil: por una parte se utiliza una parte de la energía del defecto para limitar el mismo defecto y de la otra la acción del interruptor automático dependerá de la evolución del defecto dentro de la instalación [paso del defecto de un régimen fase- tierra a un régimen trifásico, o intervención de otro órgano de protección aguas arriba o aguas abajo (interruptor automático o fusible).

### 1.3 Previsión del comportamiento del interruptor automático limitador

Debido a la diversidad de instalaciones, a la utilización de protecciones más o menos redundantes y al carácter aleatorio de los defectos de cortocircuito, sería ilusorio conformarse con los ensayos normativos para asegurarse del buen funcionamiento de un interruptor automático limitador sobre cualquier defecto.

El caso más crítico es el de la utilización de varios interruptores automáticos en filiación: el conocimiento del poder de corte y de las características de limitación de los esfuerzos térmicos de los dos interruptores automáticos no

permiten prever el poder de corte de la asociación. En efecto, cada uno de los dos interruptores automáticos tiene una acción sobre la corriente de defecto y por tanto una acción sobre el comportamiento del otro interruptor automático. Como no es imaginable proceder en el laboratorio a los ensayos que cubran todas las situaciones posibles, Merlin Gerin ha desarrollado una simulación informática del comportamiento de los interruptores automáticos limitadores. Esta herramienta permite simular multitud de ensayos y considerar todos los casos, incluidos los menos probables.

## 2 Modelo de simulación de los interruptores automáticos limitadores

El modelo de simulación creado por Merlin Gerin permite observar el comportamiento de uno o de varios interruptores automáticos ante un defecto en una red monofásica o trifásica, a una frecuencia comprendida entre 0 (corriente continua) y 400 Hz. La red simulada se limita a una fuente de tensión (monofásica o trifásica), y

a una impedancia (resistencia e inductancia) estos dos elementos ajustables para obtener los valores de la corriente de cortocircuito y del factor de potencia deseados. Los interruptores automáticos simulados cierran el circuito sobre un defecto.

### 2.1 Características de los interruptores automáticos

Cada interruptor automático simulado se caracteriza por una veintena de parámetros definidos de una vez por todas, y que automáticamente se toma en cuenta cada vez que el utilizador llama al interruptor automático por su nombre.

Los parámetros comprenden:

- datos geométricos (dimensiones de la cámara de ruptura),
- datos mecánicos (esfuerzos, inercia, enlace entre polos...),
- datos eléctricos (disparador, inductancia, resistencia...).

Estos valores, en su mayoría, se pueden determinar sin tener que poner el interruptor automático en una situación de cortocircuito: de este tipo son las longitudes, las inercias, los esfuerzos, el número de espiras y las impedancias.

Hay dos valores, sin embargo, que se deben obtener por comparación de un oscilograma simulado y de un oscilograma real registrado en una estación de ensayos de cortocircuito: son las características de desplazamiento del arco hacia la cámara de ruptura. Describen el efecto de soplado magnético y aerodinámico del arco, y son necesarios dos valores, puesto que los comportamientos dinámicos del arco no son idénticos para una pequeña corriente de cortocircuito y para una corriente de cortocircuito al límite de la capacidad del interruptor automático.

Los veinte parámetros son suficientes para prever el comportamiento del interruptor automático frente a cualquier tipo de cortocircuito y a cualquier red, con una precisión ampliamente satisfactoria.

### 2.2 El interruptor automático en la red

Como hemos visto más arriba, la acción del interruptor automático, después de un cortocircuito, se manifiesta por un arco que actúa como una fuerza contraelectromotriz en la red. Es pues, necesario haber implantado, en el modelo de simulación, las leyes que ligan la tensión de arco en el interruptor automático con el valor instantáneo de la corriente. El modelo utiliza las ecuaciones diferenciales clásicas de la red y calcula paso a paso la variación de la corriente. Entre dos pasos de cálculo se recalcula la tensión instantánea del arco del

interruptor automático teniendo en cuenta el valor de la corriente, lo que permite deducir la variación de la corriente durante el pequeño intervalo de tiempo siguiente. El cálculo se desarrolla paso a paso hasta el paso por cero de la corriente, que confirmará la apertura del circuito.

Las leyes de variación de la tensión de arco dependen de la tecnología del interruptor automático simulado, pero siempre se descomponen en cuatro partes independientes:

■ al inicio no hay tensión de arco. los contactos están cerrados,

■ a partir de un instante, que depende de los relés disparadores y de la corriente, los contactos se separan y generan un arco que queda localizado entre los contactos en tanto su distancia de separación no es suficiente. El instante de la separación de los contactos se determina a partir del cálculo del tiempo de repulsión ( $T_{REP}$ ). que es la duración que transcurre entre la aparición de la corriente de defecto y la separación de los contactos.

Esta duración responde a la ecuación:

$$T_{REP} = K \exp \left( -\alpha \frac{di}{dt} \right) = K e^{-\alpha \frac{di}{dt}}$$

siendo K dependiente de la longitud de los conductores enfrentados (o de la bobina de extracción).

En el instante de la separación, los esfuerzos de apertura son iguales a los esfuerzos que mantienen cerrados los contactos y son proporcionales al cuadrado de la corriente.

De aquí se obtiene, pues, el valor del tiempo hasta la repulsión de los contactos, función de la corriente, del esfuerzo motor aplicado al contacto móvil y, conociendo su inercia, la cinemática de su desplazamiento.

Entonces la tensión del arco es prácticamente constante y, cuando la distancia entre los contactos alcanza un valor predefinido que depende de la naturaleza de las pastillas de contacto, (menos de 1 mm en los interruptores automáticos miniaturas) la trayectoria del arco puede desplazarse.

■ El arco abandona los contactos y se desarrolla en la precámara de ruptura. La tensión del arco depende de la longitud del arco y el desplazamiento del arco depende de la evolución de la corriente.

El modelo calcula el desplazamiento del punto de arranque del arco a lo largo de uno de los electrodos que conducen a la cámara de ruptura, suponiendo que las fuerzas que se ejercen sobre el arco son proporcionales al cuadrado de la corriente:

$$x = C(I_p) \iint f(I) dt^2$$

$C(I_p)$ , en  $m/(A^2s^2)$ , es un parámetro característico de la precámara del interruptor automático, cuyo valor varía con la intensidad de la corriente de cortocircuito. Toma un valor próximo a la unidad para el poder de ruptura máximo del interruptor automático y puede tomar los valores de cortocircuito presunto de 1.000 A.

La tensión de arco es la suma de un término proporcional a la longitud del arco y a la corriente instantánea y de un término proporcional a la longitud de arco solamente; esta longitud es igual a la distancia entre las pastillas cuando  $x = 0$  y a la longitud de la cámara ( $L_C$ ) cuando  $x = L$  (figura 1).

■ Cuando el arco se ha alargado suficientemente para entrar en la cámara de ruptura, la tensión del arco pasa a ser una función del número de separadores y de la corriente instantánea:

$$U_{arc} = N \cdot U_{sep} + R_L \cdot L_C \cdot I + U_M \cdot L_C$$

(en esta fórmula se ha despreciado el espesor de los separadores tomando  $L_C$  como longitud del arco). Con:

N: número de separadores,

$U_{SEP}$ : tensión correspondiente a un separador (25 V),

$R_L$ : resistencia lineal de un arco de algunos miles de amperios ( $\approx 1$  W/m),

$L_C$ : longitud de la cámara,

I: corriente instantánea,

$U_M$ : tensión lineal del arco (campo en V/m).

Esta secuencia termina cuando la corriente pasa por cero; la tensión de arco alcanza entonces la tensión de la red.

El método de cálculo permite tener en cuenta todas las interacciones de la red y del interruptor automático y, en particular, la presencia de otros interruptores automáticos en el circuito; en efecto, en cada instante se recalcula la evolución de la tensión de arco en los bornes del interruptor automático en función de otros parámetros del circuito; nada se determina de antemano.

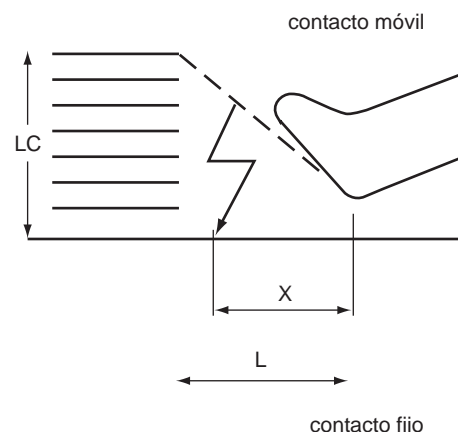


Fig. 1.



### 3 Comparación del modelo y las experiencias

La **figura 2** nos muestra el ensayo de un interruptor automático C32L, del calibre 38 A, en el que las condiciones del ensayo eran las siguientes:

- $U_{ef}$  : 247 V,
- $I_{presunta}$ : 22,8 kA,
- $\cos \varphi =$  0,20,
- ángulo de conexión =  $60^\circ$ .

La **figura 3** representa la simulación del mismo ensayo. Se ve que la corriente de cresta es de 7.363 A frente a 7.383 A reales y que ha tenido lugar al cabo de 1 ms, como en el ensayo real.

El tiempo de ruptura es de 2,4 ms en lugar de 2,3 ms.

Para el choque térmico ( $\int i^2 dt$ ) se obtiene

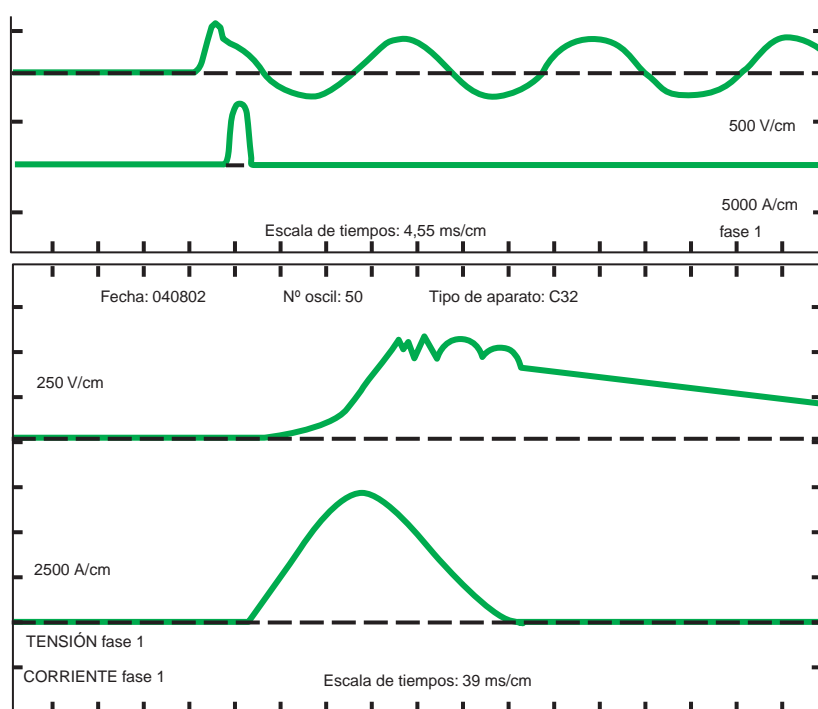
43.872 A<sup>2</sup>s en lugar de 49.200 A<sup>2</sup> s, lo que representa una desviación del 10%.

Por último, la energía del arco ( $\int u i dt$ ) es de

2.885 Julios en vez de 2.700 Julios, o sea, una desviación del 6%.

Estos resultados son satisfactorios. En efecto, en la práctica, dada la dispersión entre los ensayos de un mismo aparato con las mismas condiciones y también entre los resultados de distintos aparatos con las mismas condiciones de ensayo, se considera que las desviaciones del 25% en el choque térmico y en la energía del arco son admisibles.

Para la corriente de cresta se admiten desviaciones del 15%.



#### RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE

ESCALAS (val. med.):  $V_{ef}$  (V): 247/494

$I_{ef}$  (A): 22870;  $\cos \varphi$ : 0,20

#### RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORTE

NORMA: NFC 63120; CICLO: 1,0; N° APP.: 32

TIPO APARATO: C32L; CALIBRE: 38 A.

	F. 1	F. 2	F. 3	Valor medio
$I_{m\acute{a}x}$ (A)	7383	0	0	
$a t =$ (ms)	1.0	0.0	0.0	
tiempo de ruptura (ms)	2.3	0.0	0.0	
$U_{arc}$ final medio (V) (- 1ms)	519	0	0	
$U_{r-ef-restabl.}$ (V) (CEI)	247	0	0	247
Desvío % $U_r/U_{med}$	0.00	0.00	0.00	
$\int U I dt$ (kJ)	2.7	0.0	0.0	
$\int I^2 dt$ (A <sup>2</sup> .s)	49.2	0.0	0.0	
Fecha: 04.08.82				
Nom.:				
NQ Oscilog.: 60				

**Fig. 2:** Ensayo real de un interruptor automático C32L.

3.1 Utilización del modelo

Para el diseño de un aparato de ruptura, el modelo de interruptor automático desarrollado por Merlin Gerin permite optimizar la arquitectura interna del aparato y conocer, por adelantado, las posibilidades funcionales que los técnicos esperan obtener, cuando aún se halla en estado de diseño.

■ Después de la puesta a punto del aparato será posible afinar los parámetros característicos que han sido estimados según el diseño.

Será en ese momento que se probará el comportamiento del aparato, por simulación, en las diferentes configuraciones de utilización posibles y se deducirán:

- la curva de las exigencias térmicas limitadas,
- la curva de las intensidades de cresta limitadas,
- las capacidades de ruptura a diversos niveles de tensión,
- las capacidades funcionales cuando se asocia con otros interruptores automáticos, con contactores o con fusibles,

■ las prestaciones en corriente continua y en alterna a 60 Hz y a 50 Hz.

Todos estos resultados necesitaban, cuando se debían obtener por ensayos de laboratorio, una cantidad considerable de interruptores automáticos (muchos de estos ensayos son destructivos) y un tiempo de ocupación de meses. En cambio, desde que se utiliza el modelo, sólo se realizan en verdadera magnitud los ensayos solicitados por los organismos de normalización ; estos sirven para verificar la coherencia con los resultados obtenidos por simulación y para formalizar la documentación oficial solicitada por algunos clientes.

El modelo permite además satisfacer mejor el cuaderno de cargas de los nuevos aparatos; permite economizar más del 50% de los ensayos en los laboratorios de ruptura y obtener, antes de la comercialización de un nuevo interruptor automático, el conjunto de las características técnicas que interesan a los futuros utilizadores.

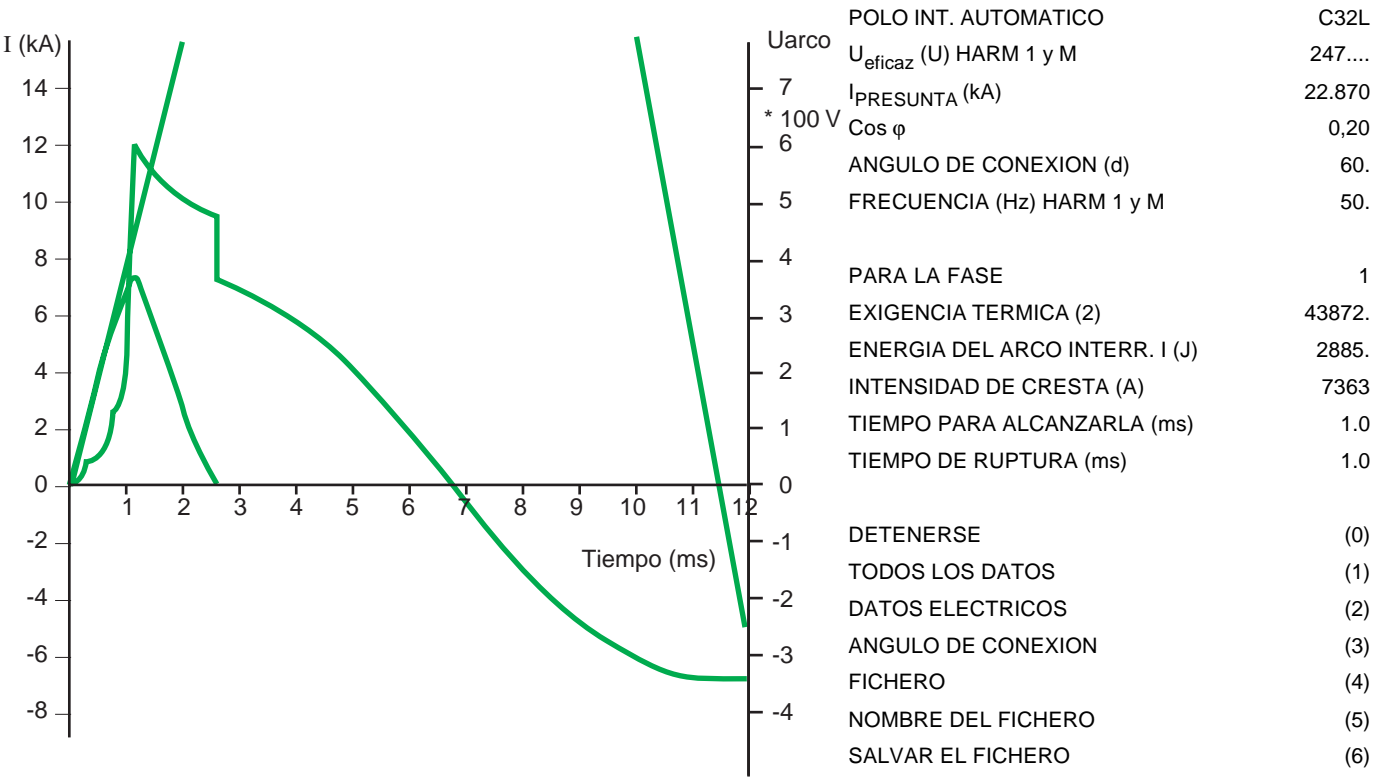


Fig. 3: Simulación del comportamiento de un interruptor automático C32L.

## 4 Conclusión

La simulación, a partir de un modelo informático, del funcionamiento de un interruptor automático presenta, pues, una serie de ventajas que justifican los esfuerzos de investigación que hacen los grandes constructores de aparataje eléctrica en este campo.

Como acabamos de ver, estas ventajas se extienden tanto al diseño como a la puesta a punto de los aparatos y a la exploración de las diversas condiciones de utilización.

El caso antes descrito muestra el ejemplo de un interruptor automático miniatura.

Una variante de este modelo simula el funcionamiento de los interruptores automáticos Compact de 125 A a 1.000 A.

El mismo principio hace posible el estudio de las interacciones entre interruptores automáticos o entre estos y otros aparatos, al producirse un cortocircuito. Así se puede estudiar el caso de dos interruptores automáticos conectados en serie o de un interruptor automático y un contactor, etc. Se puede, así mismo, imaginar la simulación de una red completa de distribución de electricidad. Algunos prometedores trabajos están actualmente en curso siguiendo esta línea de investigación.