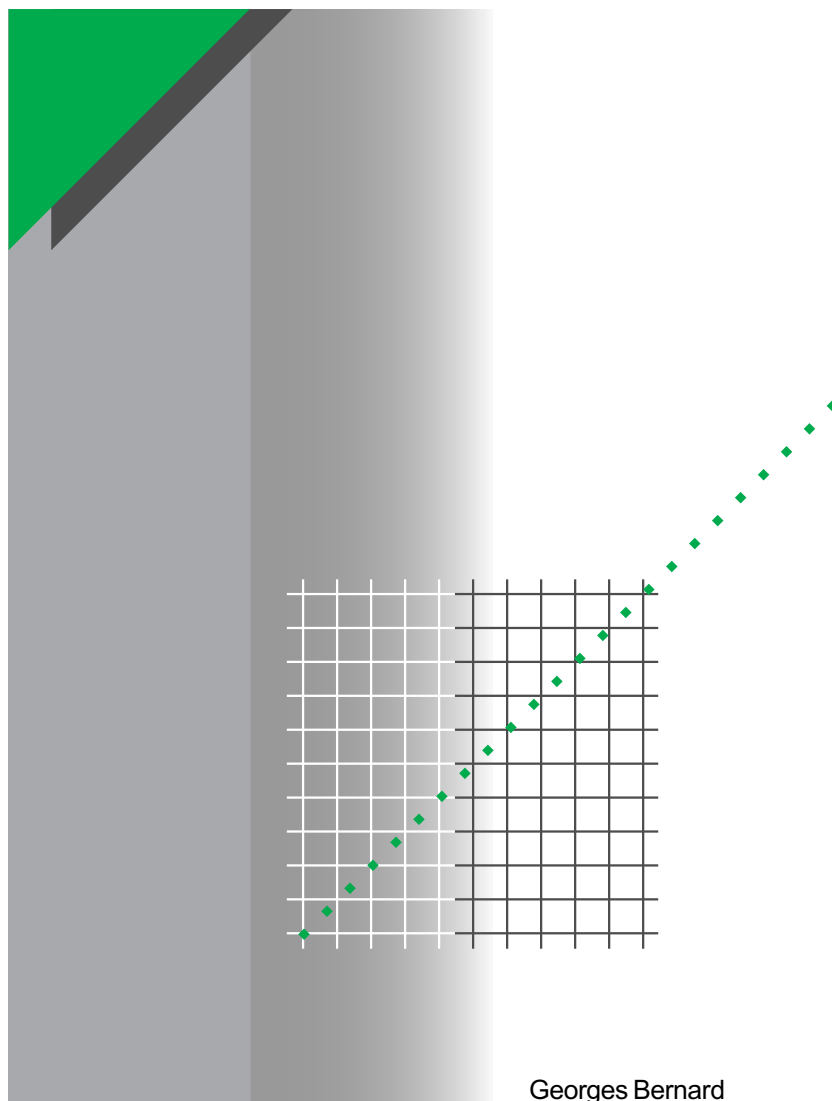


# Cuaderno Técnico nº 171

## La ruptura por auto-expansión



Georges Bernard

**Merlin Gerin**

**Modicon**

**Square D**

**Telemecanique**

**Schneider**  
 **Electric**

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, 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 171 de Schneider Electric, S.A.».



**Georges BERNARD**

Se diplomó como ingeniero IEG-  
Institut Electrotechnique de Grenoble-  
en 1960.

El mismo año entra en Merlin Gerin  
encargándose del Servicio de  
Patentes, y después del Servicio de  
Investigaciones.

En 1966 consigue el doctorado  
mediante una tesis científica sobre la  
medida de la corriente por medios  
ópticos.

En 1961 participa en los estudios  
relativos al corte SF<sub>6</sub>, y trabaja en el  
campo del corte estático e híbrido.

En 1993, dentro de la Dirección de  
Investigación y Desarrollo de Merlin  
Gerin desarrolla nuevos estudios  
sobre el corte para los interruptores  
automáticos del futuro.

# cuaderno técnico nº 171

## La ruptura por auto-expansión

Por: Georges Bernard

Trad.: E. Milà

Edición francesa: diciembre 1993

Versión española: Julio 2000

**Merlin Gerin**

**Modicon**

**Square D**

**Telemecanique**

**Schneider**  
 **Electric**

## Terminología

---

<b>Densidad electrónica</b>	Número de electrones libres por unidad de volumen ( $\approx 10^{17}/\text{cm}^3$ durante el arco de la ruptura).
<b>AT-A y AT-B</b>	<p>Estos términos se emplean en este cuaderno conforme a la legislación francesa (decreto 14 noviembre 1988), correspondiendo a los siguientes valores de tensión:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ AT-A: 1 a 50 kV,</li><li>■ AT-B: &gt; 50 kV.</li></ul> <p>A nivel europeo (Circular 27 julio 1992 de CENELEC -Comité Europeo de Normalización Electrotécnica) se emplean los términos Media Tensión -MT- y Alta Tensión -HT-:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ MT: 1 a 35 kV,</li><li>■ HT : &gt;35 kV.</li></ul>
<b>GIS</b>	Gas Insulated Switchgear: aparellaje herméticamente cerrado (CEI 298).
<b>Interferometría</b>	Método de medida de muy alta precisión basado en los fenómenos de interferencias (interferencia: fenómeno resultante de la superposición de oscilaciones u ondas de la misma naturaleza y de frecuencias iguales próximas).
<b>Organismos de certificación</b>	<p>Los más importantes son:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ ASTA -Association of Short-circuit Testing Authority- en Inglaterra,</li><li>■ CESI -Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano- en Italia,</li><li>■ ESF -Ensemble des Stations d'essais á grande puissance Françaises- en Francia,</li><li>■ KEMA -Keuring Elektrotechnische Materialen Arnhem- en Holanda.</li></ul> <p>Estos organismos son miembros a nivel internacional del SIL -Short-circuit Testing Liaison-.</p>
<b>Estrioscopia</b>	Método óptico que pone de manifiesto las variaciones del índice de refracción de un fluido (gas). Permite observar las variaciones de presión o de temperatura de un gas contenido en un volumen, y conocer también sus movimientos.
<b>SF<sub>6</sub></b>	Hexafluoruro de azufre.
<b>Vacío</b>	Presión inferior a $10^{-1}$ Pascal.

---

# La ruptura por auto-expansión

## Índice

1	Reseña histórica sobre las técnicas de ruptura	Las técnicas de ruptura en AT-A y AT-B	p. 6
		Las técnicas particulares de ruptura en SF <sub>6</sub>	p. 7
2	La ruptura por autoexpansión	La autoexpansión: un nuevo nivel técnico	p. 9
		La realización	p. 9
3	Interruptores automáticos por autoexpansión en el SF <sub>6</sub>	El interruptor automático de la RM6 200 A 24 kV / 16 kA	p. 14
		El interruptor automático SB <sub>6</sub> 2 000 A - 72 kV/31,5 kA	p. 14
4	Conclusión		p. 16
5	Bibliografía		p. 17

La palabra auto-expansión se aplica a diversas técnicas o modos de ruptura, según las documentaciones técnicas y los constructores de interruptores automáticos.

En este Cuaderno Técnico, después de haber expuesto las notables diferencias que pueden esconderse detrás de un mismo término, tanto sobre los principios de la ruptura como sobre sus particularidades, el autor presenta la ruptura por auto-expansión en SF<sub>6</sub>. Hoy por hoy, solamente Merlin Gerin lo usa en los interruptores automáticos. Para acabar se presentan los modelos de interruptores automáticos cuyas prestaciones muestran todo el interés de este sistema de ruptura.

# 1 Reseña histórica sobre las técnicas de ruptura

En el número de diciembre de 1992 de la «Revue Générale de l'Electricité», J. CLADE, «controler general» de EDF, escribía:

«Los materiales electrotécnicos, desde hace ya un centenar de años, están en la base del desarrollo de las redes eléctricas.

En concreto, los centros de transformación se habrían hecho monstruosos si unos progresos, poco espectaculares en cada momento, pero numerosos y constantes, no hubieran permitido aumentar constantemente el rendimiento de las prestaciones específicas de los materiales».

La aparamenta de mando y de protección, tanto en Baja Tensión -BT- como en Alta Tensión -AT-, no escapa de esta regla.

Si en BT, la ruptura magnética en el aire que se usa desde el principio tiene todavía futuro, la evolución de la ruptura en Media Tensión -MT- o en alta tensión -AT- se apoya en los cambios del medio dieléctrico. En efecto, cada cambio de fluido, motivado por la mejora de estos tres criterios

- rendimiento,
- seguridad,
- fiabilidad,

y por una disminución de los costes, ha implicado una modificación radical de la técnica de ruptura.

La técnica de ruptura, en sí misma, presenta poco interés para el usuario, pero interviene en varios de los criterios que se citan a continuación:

- el coste global (aparato - instalación - explotación),
- el dimensionado,
- los esfuerzos eléctricos generados por la ruptura.

En realidad, para un interruptor automático, la técnica de ruptura es determinante en el plano técnico-económico.

La historia de la aparamenta está, por este hecho, íntimamente relacionada con la de la técnica de ruptura y de los medios dieléctricos utilizados. Para aclarar mejor la situación actual, se impone hacer un repaso sobre las técnicas de ruptura que se han ido utilizando a lo largo del tiempo.

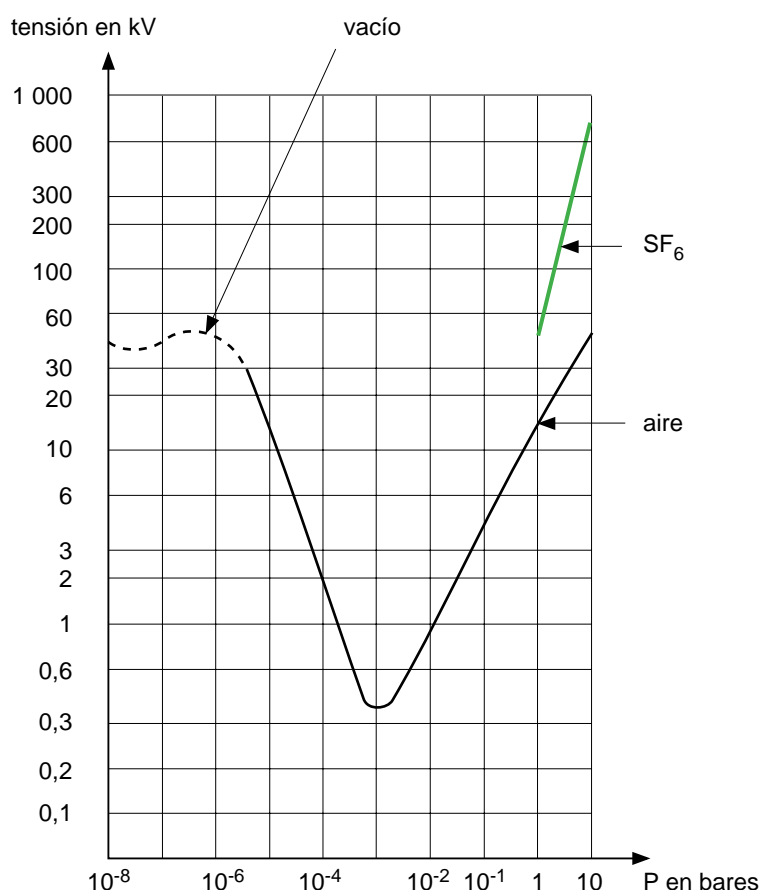
## Las técnicas de ruptura en AT-A y AT-B

Se utilizan diversas técnicas: en aire, en aceite, en SF<sub>6</sub> y en vacío.

## La ruptura en el aire

Con el aumento en tensión y en potencia de las redes, este sistema de ruptura ha recurrido sucesivamente a las técnicas:

- de contactos auxiliares del arco,
- de soplado del arco,
- de alargamiento del arco por efecto magnético (principio del SOLENARC). Esta solución, utilizada hasta los 20 kV, ya casi no se usa hoy en día, debido a las importantes dimensiones de los mecanismos que la componen.



**Fig. 1:** Evolución de la rigidez dieléctrica del aire y del SF<sub>6</sub> en función de la presión, en el interior de un campo débilmente no homogéneo para una distancia de 12 mm entre electrodos.

■ de aire comprimido: la utilización de las propiedades físicas de este dieléctrico (**figura 1**) ha permitido progresos determinantes en la fabricación de interruptores automáticos para muy altas tensiones. Pero los aparatos que utilizan esta técnica son bastante complejos y caros, por tanto ya no se utilizan más que en alta y muy alta tensión en países fríos, porque el aire presenta la ventaja de conservar sus propiedades a muy bajas temperaturas.

#### La ruptura en aceite

Este sistema de ruptura apareció a principios de siglo. Ha permitido las primeras construcciones de interruptores automáticos en AT y, además, una disminución en las dimensiones, gracias a la técnica RVA (Reducido Volumen de Aceite). Estos interruptores automáticos se encuentran todavía en los centros de transformación de MT y AT, en ciertos países como el Brasil y en algunos de la CEI (antigua URSS). Se van sustituyendo, en Europa y en USA, por interruptores automáticos en SF<sub>6</sub> o en vacío.

Su desaparición progresiva se debe especialmente a los peligros inherentes al aceite (es inflamable y explosivo), a los trabajos de ingeniería civil necesarios para su instalación (cubetas de retención) y al mantenimiento preventivo.

#### La ruptura en SF<sub>6</sub> y en vacío

Las técnicas que utilizan este sistema de ruptura, cuya aparición industrial data del principio de los años 60, se caracterizan por la utilización de medios extintores del arco (SF<sub>6</sub> y vacío) con propiedades excepcionales, dentro de recintos de polos de corte sellados, cerrados herméticamente, de pequeñas dimensiones, formando unas piezas de contacto simples.

En efecto, el SF<sub>6</sub> y el vacío presentan dos ventajas:

■ en régimen transitorio, tienen una constante de tiempo de desionización que puede ser cien veces menor que

la del aire comprimido. Esto elimina el riesgo de recebados sin que sea necesario el uso de artificios tales como resistencias o condensadores de amortiguación;

■ en régimen permanente, tienen propiedades dieléctricas destacables, como indica la gráfica de Paschen, representada en la **figura 1**.

#### Evolución y margen de empleo

A medio plazo, sólo quedarán la ruptura en SF<sub>6</sub> y en vacío. Por lo que se refiere a los márgenes de utilización, el SF<sub>6</sub> y el vacío deberán reservarse el mercado de la AT-A, quedando solamente el SF<sub>6</sub> en AT (> 50 kV).

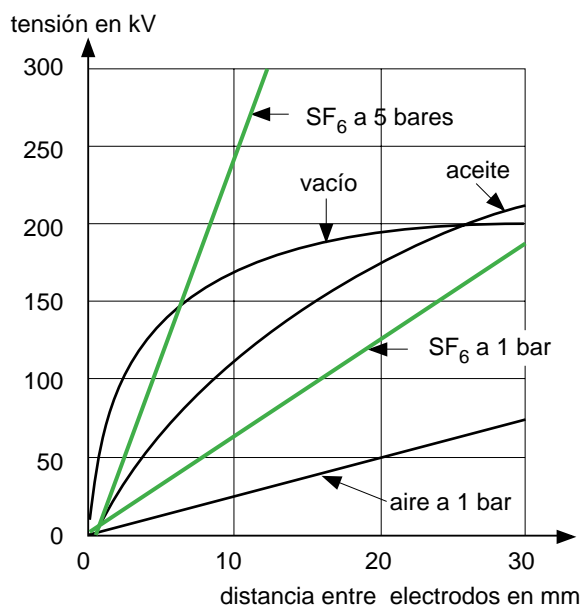
La variación de la rigidez dieléctrica entre electrodos (**figura 2**) muestra en efecto que, aunque el vacío es muy eficiente en AT-A, llega a su límite a 200 kV independientemente de la distancia entre electrodos.

### Las técnicas particulares de ruptura en SF<sub>6</sub>

Siendo el objeto de este Cuaderno Técnico presentar el principio del corte por auto-expansión, es necesario situar este principio entre las otras técnicas que utilizan el SF<sub>6</sub> como fluido de corte.

En 30 años, se ha evolucionado, pasando, poco a poco, de un soplado del arco provocado mecánicamente (doble presión, golpe de pistón) a un soplado provocado por la propia corriente a cortar (arco giratorio, expansión).

Estos términos corresponden a las acciones sobre el arco, diferenciadas o combinadas, cuyo objeto es enfriar el arco. De hecho, no tienen siempre el mismo significado, según los constructores que las utilizan. La tabla de la **figura 3**, en la página 6, muestra cómo se sopla y/o enfría el arco para cada técnica.



**Fig. 2:** Influencia de la distancia entre los electrodos sobre la rigidez dieléctrica.

esquema	aplicaciones:	en este Cuaderno	otras	descripción
		doble presión	neumático	un gas, previamente comprimido en un recipiente de «alta presión», se libera después del corte al abrirse una válvula: el gas sopla el arco al circular a través de los contactos tubulares (toberas) hacia un recipiente a «baja presión».
		golpe de pistón (puffer)	autocompresión autoneumático autosoplado	un gas, comprimido por el movimiento de un pistón solidario con el movimiento de abertura de los contactos, sopla el arco dándole salida a través de un tubo de ventilación.
<p>volumen total de compresión (para el corte de un arco con poca energía)</p> <p>volumen de compresión reducido (para el corte de un arco de gran corriente)</p>		golpe de pistón y expansión térmica (puffer and self pressurise)	autoneumático expansión térmica (autopuffer-thermal blast) auto-expansión	<p>el mismo principio que en el caso anterior pero con dos volúmenes de compresión:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ un volumen que proporciona una baja presión para el corte de pequeñas corrientes, por lo que se requiere una débil energía de mando,</li> <li>■ un volumen «reducido» para el cierre automático de válvulas provocado por la alta presión desarrollada por una energía de arco importante (expansión térmica), por tanto, un refuerzo del soplado.</li> </ul>
		expansión térmica	autosoplado	el arco se refrigera con un soplido obtenido por la circulación de gas a través del tubo, circulación debida al aumento de presión de origen térmico, producida por el arco alrededor de los contactos.
		arco giratorio (rotating arc)		el arco se enfría al girar por la acción de un campo magnético radial producido por la corriente a cortar (fuerzas de Laplace).
		auto-expansión	autosoplado (autopuffer self-blast)	el mismo principio que en el caso anterior, y, además, con un soplado de arco obtenido por la circulación de gas a través de los contactos; circulación debida a la subida de presión de origen térmico producida por el arco alrededor de los contactos.
contacto móvil contacto fijo			zonas de alta presión compresión mecánica y térmica zona de baja presión	movimiento de los contactos móviles movimiento de los gases movimiento del arco

Fig. 3: Las técnicas de corte en SF<sub>6</sub>.



## 2 La ruptura por autoexpansión

### La autoexpansión: un nuevo nivel técnico

Al inicio de la década de los ochenta, para mejorar las gamas existentes de interruptores automáticos y anticiparse a la evolución de los materiales concurrentes, los servicios de marketing de la Sociedad Merlin Gerin, definieron un cuaderno de cargas mucho más exigente que para una simple remodelación de la gama.

Los investigadores y diseñadores de la sociedad fueron invitados a estudiar un cambio importante en las técnicas de ruptura a emplear. En este sentido, se fijaron, además de una reducción significativa de los costes, unos objetivos precisos:

- aumentar la seguridad (fiabilidad, mantenimiento, disponibilidad y seguridad) por reducción del número de piezas en movimiento y disminución de la energía necesaria a la maniobra. Con ello se consiguió:

- un aligeramiento global de las estructuras electromecánicas,
  - una disminución de tamaño.
  - minimizar las perturbaciones inducidas en las maniobras normales y en la ruptura de las corrientes de defecto para las diversas cargas:
  - motores,
  - transformadores,
  - condensadores y líneas en vacío.
  - emplear una nueva técnica de ruptura, si es posible la misma en AT-A y en AT-B, para mejorar la acumulación de la experiencia.
- Para conseguir estos ambiciosos objetivos, los diseñadores dieron preferencia entonces a una técnica dependiente de la «corriente en sí misma», siendo:
- la energía de interrupción (de soplado) obtenida de la misma corriente a interrumpir,

- el poder de ruptura se adapta a la corriente a interrumpir,

- se explotan al máximo las excepcionales propiedades del SF<sub>6</sub>.

La técnica de la autoexpansión responde a los objetivos del mencionado cuaderno de cargas. Es la que se está empleando en la mayoría de interruptores automáticos y corresponde, según los hechos, a un nuevo nivel en el dominio de los aparatos de corte.

### La realización

La autoexpansión asocia:

- el soplado por expansión térmica del SF<sub>6</sub>,
- la conducción del arco y su soplado por efecto electromagnético.

### El soplado por expansión

El arco, que nace espontáneamente entre los contactos al producirse su separación, disipa una energía:

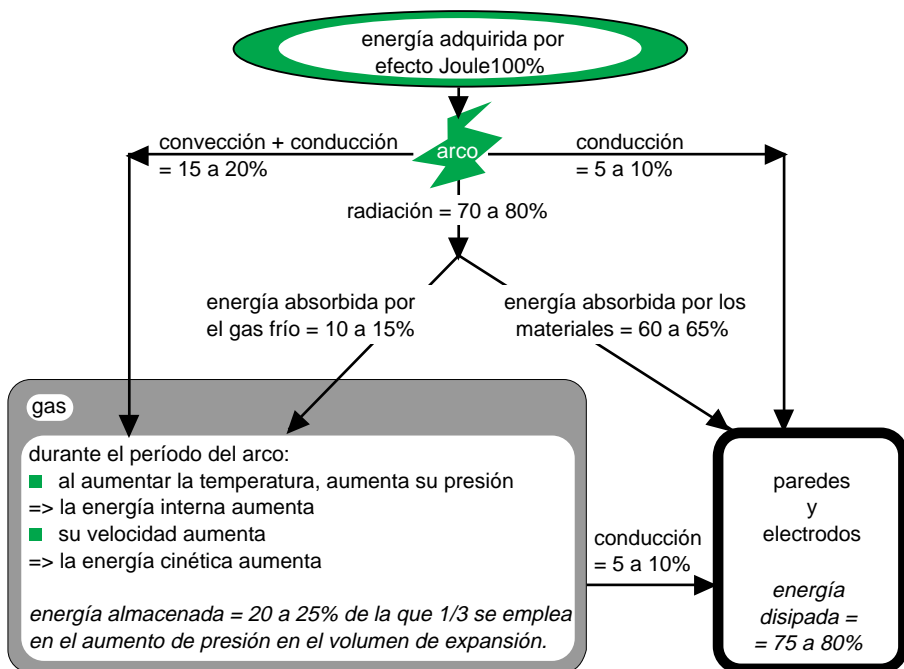


Fig. 4: Flujo de energía durante el corte de la corriente, obtenido con un modelo.

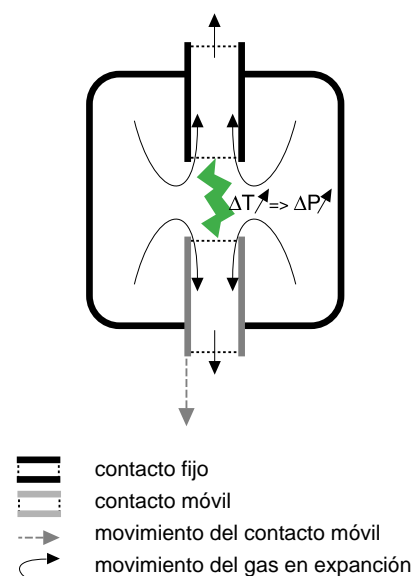


Fig. 5: Principio de corte por expansión en SF<sub>6</sub>.

$$W = \int_0^t (U_a \cdot i) dt$$

siendo:  $U_a$  = caída de tensión de arco  
Esta energía se evacúa, directa o indirectamente, por:

- conducción,
- radiación,
- convección.

La **figura 4** ilustra esta disipación.

En los aparatos con técnica de autoexpansión es alrededor de 1/4 de la energía de arco la que se transmite al  $SF_6$ , que se calienta.

Si los contactos están encerrados en un volumen estanco (volumen aguas arriba, **figura 5**) el aumento de la temperatura provoca el aumento de la presión del gas:

$$\Delta P = \frac{R}{V} \cdot \Delta T$$

siendo R la constante termodinámica de los gases perfectos.

Si al menos uno de los contactos está vacío o es tubular, la sobrepresión provoca el escape del gas hacia las zonas frías en el conjunto del aparato (volumen abajo).

Al escapar, el gas enfría el arco que se ha establecido entre los contactos huecos, utilizando las toberas de escape.

### La conducción del arco

La descripción precedente muestra una situación un poco idealizada. Si no se toman precauciones, el arco puede escaparse de la posición axial, por ejemplo bajo la acción de las fuerzas electrodinámicas (**figura 6**).

Se encuentra, entonces, fuera del trayecto de los gases de escape o al menos en una zona en la que la velocidad es mucho menor, con lo que la influencia es también menor.

Para evitar este defecto, conviene guiar o conducir el arco.

Se pueden usar dos formas de conducción: mecánica y magnética.

- la conducción mecánica

Es la más eficaz, la más segura y la menos delicada de poner en práctica. Deriva directamente (**figura 7**) de la disposición adoptada en los

interruptores automáticos a pistón. Pero presenta, al menos, un cierto número de inconvenientes en el terreno de la ruptura:

- la presencia de la pieza aislante de guiado (tobera) deforma el campo eléctrico y lleva a unas distancias de apertura y a unas velocidades de los contactos importantes, aumentando la energía necesaria para el mando mecánico.

- sólo una pequeña parte del arco se sitúa en el volumen de arriba, en una zona muy descentrada, quedando el resto del arco situado en la tobera.

Por ello, el rendimiento energético se reduce, al igual que la sobrepresión y el soplado, sobre todo para corrientes de pequeña intensidad.

- la conducción magnética

El arco, situado en el campo magnético de un imán permanente o de una bobina, se centra con la componente axial y gira bajo la acción de la componente radial (**figura 8**).

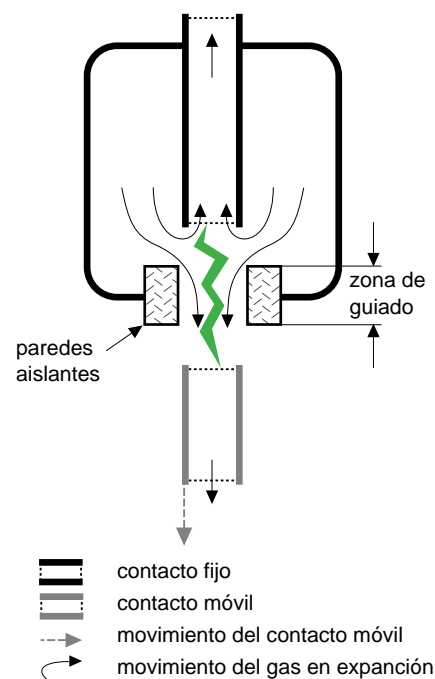
Comparada con la conducción mecánica, presenta ciertas dificultades de estudio y de puesta a punto:

- la barrera magnética es inmaterial, difícil de delimitar y, sobre todo, comporta unas zonas de inestabilidad delicadas que deben

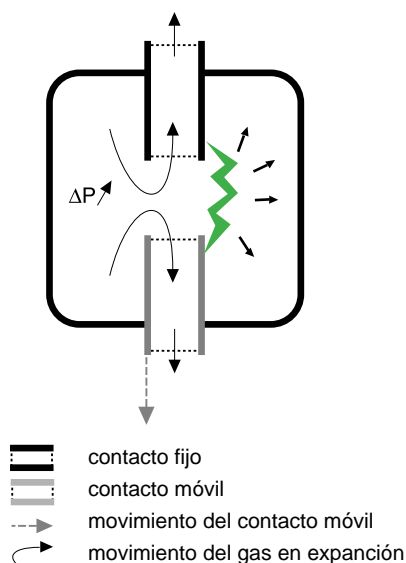
aclararse. Sólo se consigue comprenderlas con cálculos, medidas y simulaciones.

- las distancias entre contactos están limitadas (el campo magnético disminuye fuertemente con el alejamiento de la bobina).

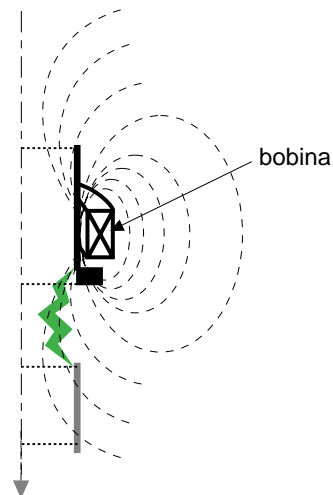
Pero, por el contrario, ofrece unas ventajas determinantes:



**Fig. 7:** Guiado mecánico mediante un aislante.



**Fig. 6:** Ejemplo de un arco no guiado.



**Fig. 8:** Guiado del arco mediante el campo magnético de una bobina (medio corte).

- el campo eléctrico no queda perturbado por la presencia de una pieza aislante y los valores de rigidez dieléctrica son importantes para distancias cortas debido a:
  - la posibilidad de utilizar el SF<sub>6</sub> a baja presión,
  - una ruptura facilitada de corrientes capacitativas,
  - una posibilidad de minimización de las carreras de los contactos y con ello una necesidad de menos energía de mando,
- el cambio de energía arco-gas queda facilitada.
- la rotación del arco

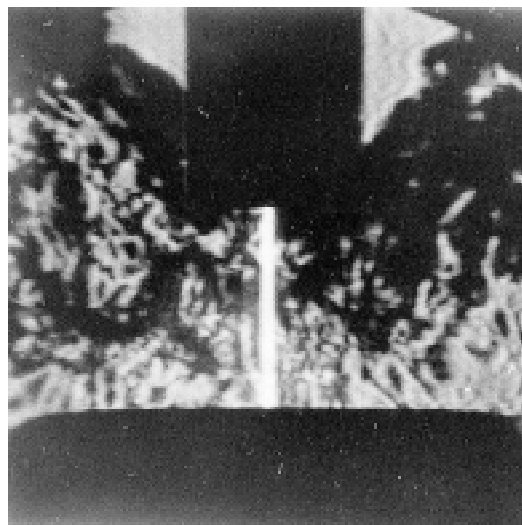
Disminuye considerablemente la erosión de los contactos lo que aumenta el número de maniobras (endurancia eléctrica); esta técnica, muy interesante, se utiliza en los interruptores automáticos y contactores modelos Fluarc y Rollarc (Cuaderno Técnico nº 123). Es una de las consecuencias importantes de la conducción magnética del arco. La asociación de esta conducción al soplado por expansión permite mejorar notablemente las características de los aparatos: los interruptores automáticos por autoexpansión pueden así trabajar en AT contrariamente a los que no utilizan el arco giratorio.

En efecto, la expansión realiza un barrido eficaz de la zona entre los contactos y bajo la acción del chorro de gas:

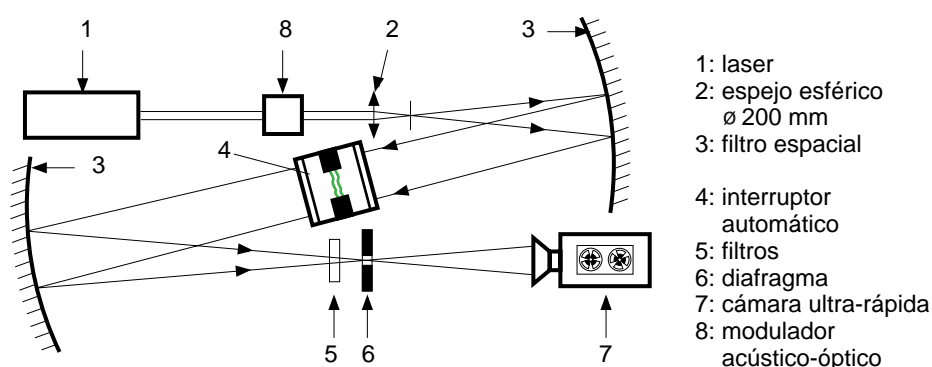
- las partículas metálicas provenientes de los electrodos son evacuadas fuera de las toberas,
- al acercarse al cero de corriente, las raíces del arco son repelidas hacia el interior de los electrodos tubulares (toberas) y se enfrían rápidamente (figura 9).

#### Los medios de puesta a punto

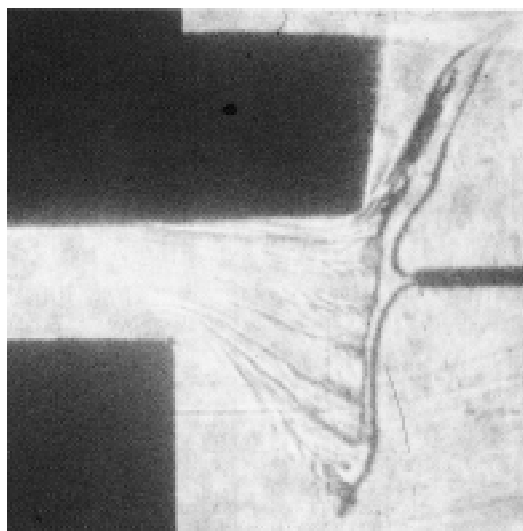
La voluntad de no utilizar más energía que la desarrollada por el propio arco y las fuerzas magnéticas inducidas por la corriente a cortar ha necesitado, en la puesta a punto, el empleo de útiles sofisticados.



**Fig. 9:** Centrado del arco en los instantes próximos al cero de la intensidad.



**Fig. 10:** Dispositivo óptico de estrioscopia.



**Fig. 11:** Visualización de la circulación de gas cuando se abren los contactos (a la derecha de la fotografía están los filamentos resistivos destinados a calentar el gas ambiente).

A título de ejemplo:

■ para el estudio de los desplazamientos gaseosos y la visualización del arco, ha sido necesario apoyarnos en la óptica. Los desplazamientos de gas, en presencia o no del arco eléctrico se han visualizado por estrioscopia. Esta técnica utiliza la desviación aportada por un medio de índice de refracción variable al trayecto de un haz luminoso que lo atraviesa. De los múltiples montajes posibles, los diseñadores han utilizado el de la **figura 10**.

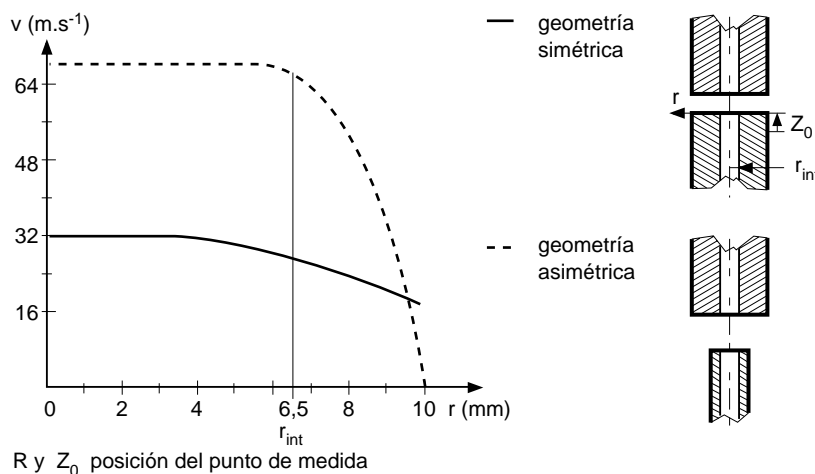
El modulador acústico-óptico situado a la salida del láser de argón permite aumentar artificialmente las prestaciones de una cámara mecánica de prisma giratorio. Si se utiliza sin el prisma, el modulador tiene el mando directamente del tiempo de exposición y de la cadencia de las exposiciones (típicamente 0,5 y 20  $\mu$ s respectivamente). De esta manera es posible observar el centrado del arco y su alargamiento hacia las toberas al aproximarse al cero de corriente (**figura 9**).

El estudio estrioscópico en gases fríos (sin arco eléctrico) ha permitido ver con claridad las zonas de turbulencia, de desprendimiento de las ondas de choque y, como muestra la **figura 11**, las líneas de desplazamientos gaseosos.

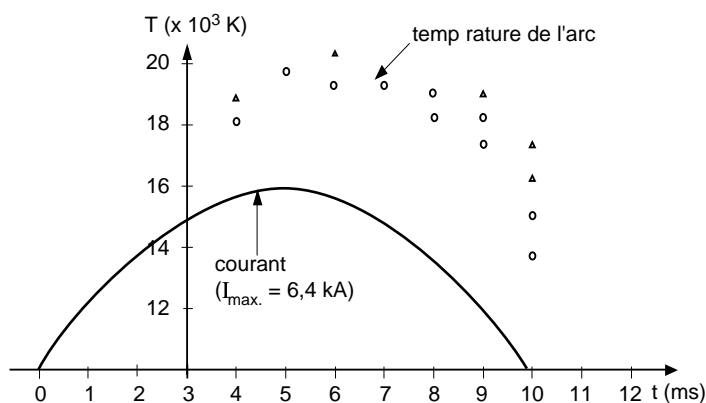
El método de interferometría diferencial, mucho más sencillo de emplear que los montajes clásicos (Michelson, Mach-Zender ...) y menos sensible a los defectos de alineación y a las vibraciones, permite comparar las velocidades de escape de los gases en diversas geometrías, simétricas y asimétricas (**figura 12**).

La presencia de un arco disminuye bastante el interés de ciertos métodos precedentes, en particular la interferometría, debido a la aparición de regiones fuertemente turbulentas. Las bandas de interferencias se deforman, se interrumpen, y hasta desaparecen completamente.

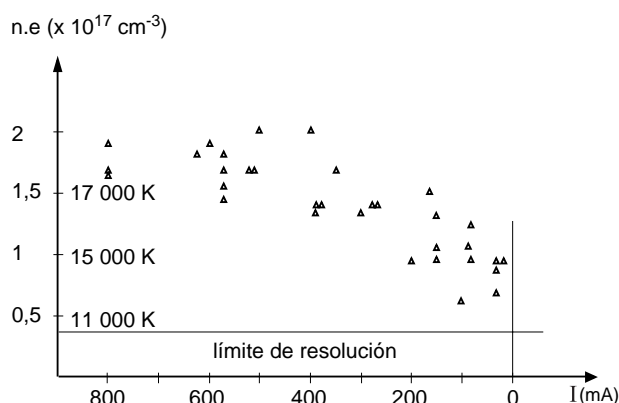
En cambio, se pueden realizar otras observaciones directas sobre el arco: la medida de su radiación o de su temperatura por espectrografía. La notable reproductibilidad obtenida



**Fig. 12:** Velocidad radial de desplazamiento del  $\text{SF}_6$ , medida con el interferómetro diferencial.



**Fig. 13:** Temperatura del arco.



**Fig. 14:** Densidad electrónica  $n$  del arco cerca del cero de intensidad.

sobre la maqueta de estudio ha permitido la obtención de las **figuras 13 y 14**. Estas experiencias han permitido observar la temperatura y la densidad electrónica justo en los instantes cerca del paso por cero de la corriente.

■ para optimizar ciertos parámetros termodinámicos que influyen sobre la ruptura se ha utilizado la informática científica.

En efecto, las diferentes mediciones u observaciones realizables no pueden tener en cuenta el conjunto de fenómenos por su propia complejidad. Además, la mayoría de estas medidas no son precisas y no pueden efectuarse sobre las maquetas concebidas para el ensayo. No se prestan a un estudio con variación de parámetros.

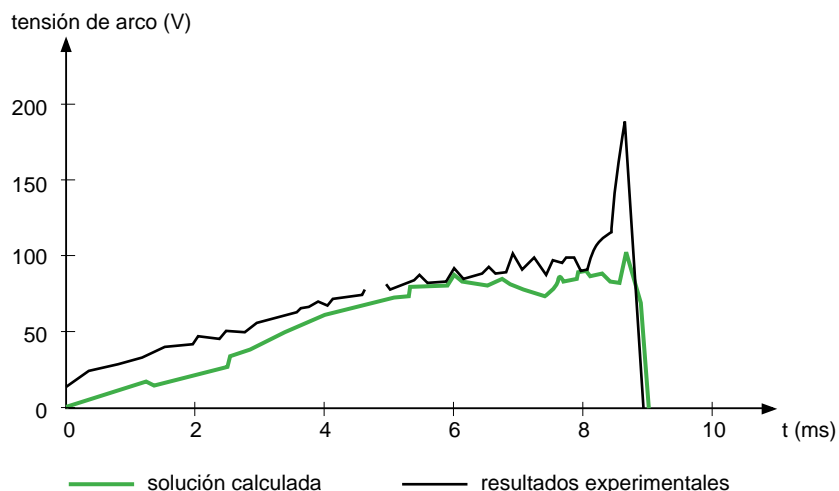
Para experimentar las principales magnitudes: velocidad, presión de los gases, temperatura,... en función de la geometría del aparato y de la corriente que lo recorre, se ha diseñado un modelo termodinámico.

Las mediciones, tanto con el gas frío como en presencia de arco, sirven para «catar» el modelo (y con ello mejorar el conocimiento de los fenómenos físicos en juego!).

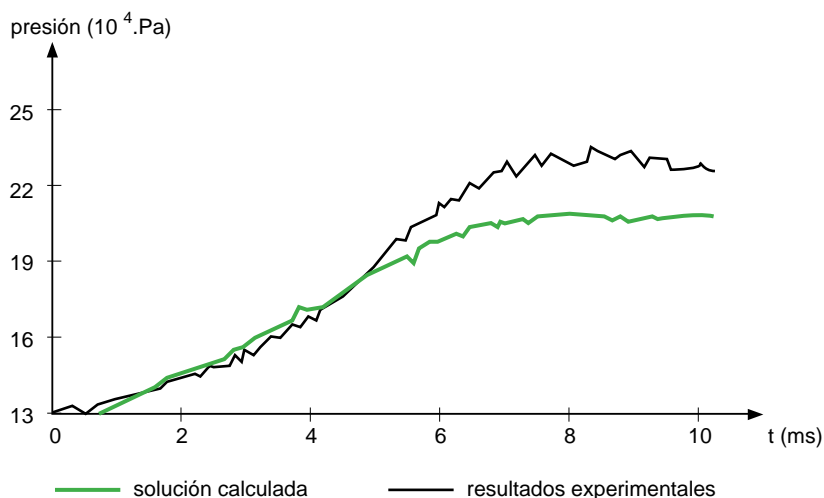
Los resultados de cálculo pueden verificarse indirectamente y recuperarlo eventualmente para su comparación con la experiencia, cuando ello es posible. Es el caso para la tensión de arco y la presión, magnitudes ambas calculables y medibles (**figuras 15 y 16**).

La concordancia entre mediciones y cálculos permite alcanzar un grado de confianza suficiente cuando los resultados se obtienen, por ejemplo, en los campos de la velocidad o el escape, prácticamente inaccesibles a la experimentación.

Esta modelización conduce, además, a una reducción sensible de los tiempos y costes de desarrollo.



**Fig. 15:** Comparación entre los resultados de las experiencias y de los cálculos científicos (programa NS2) con tensión de arco.



**Fig. 16:** Comparación entre los resultados de las experiencias y los cálculos científicos (programa NS2) sobre el aumento de la presión en el volumen aguas arriba.

### 3 Interruptores automáticos por autoexpansión en el SF<sub>6</sub>

El dominio de la técnica de la autoexpansión ha permitido la comercialización, tanto en AT-A como en AT-B, de productos adaptados a las necesidades. El interruptor automático de la RM6 y el interruptor SB<sub>6</sub> son una demostración de ello.

#### El interruptor automático de la RM6 200 A 24 kV / 16 kA

El bloque RM6 es un equipo «todo SF<sub>6</sub>» (aparamenta GIS dentro de la norma CEI 298), con funciones integradas, de reducidas dimensiones. Está diseñado para permitir una continuidad de servicio máxima de las redes de distribución en anillo.

Consta de dos interruptores de anillo y un interruptor automático (o un interruptor-fusible) cuya función es realizar una derivación sobre el anillo y asegurar la conexión y la protección de un transformador MT/BT (**figura 17**).

El interruptor automático integrado en la RM6 tiene como características asignadas 200 A, 24 kV. La aplicación de la técnica de la autoexpansión le aporta una serie de ventajas técnicas determinantes:

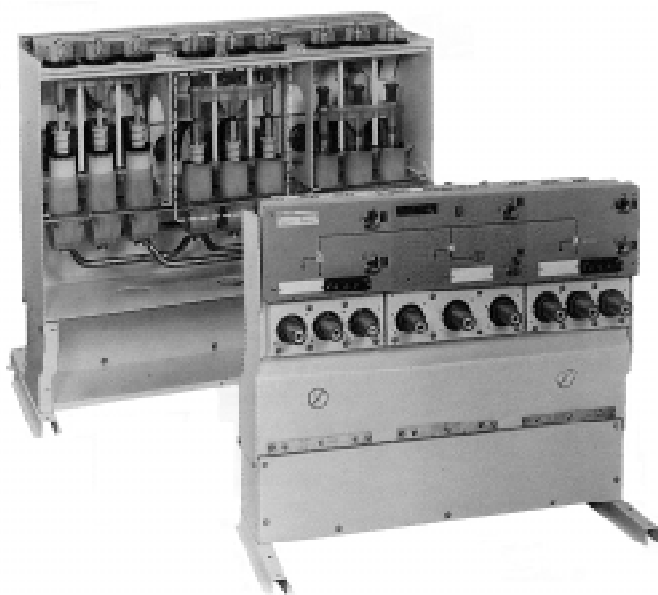
- está ubicado, al igual que los interruptores de anillo, en un recinto lleno de SF<sub>6</sub> a presión atmosférica (**figura 17**),
- el número de piezas es muy reducido, por ejemplo una pieza única garantiza las funciones:
  - paso de corriente,
  - interrupción (contacto móvil del interruptor automático),
  - aislamiento y puesta a tierra (interruptor automático abierto),
- la energía total de accionamiento (cerrado-abierto) no llega a los 100 julios,
- el volumen es menor que el del conjunto interruptor+fusible. Se instala en el sitio del interruptor de «salida».

Los objetivos propuestos, (capítulo 2), se han conseguido en el cuadro de esta aplicación de AT-A con un interruptor automático simple, compacto, económico y que tiene un poder de corte de 16 kA a 24kV ó 20 kA a 17,5 kV.

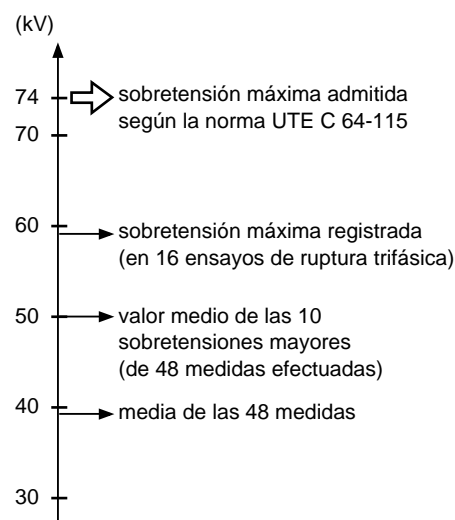
En lo que se refiere al objetivo de «sobretensión mínima de maniobra», el rendimiento obtenido después de la conexión a tensión de un transformador poco cargado es mucho mejor que lo que exige la norma CEI 298 (**figura 18**) y sitúa al interruptor automático de la RM6 entre los mejores productos del mercado.

#### El interruptor automático SB6 2000 A - 72 kV/31,5 kA

Este interruptor automático, destinado a equipos de centros de transformación de AT-B, se puede utilizar en los centros clásicos de intemperie (**figura 19**) o estar integrado en un centro bajo envolvente metálica (centro «blindado»).



**Fig. 17:** Equipo de protección con interruptor automático, para distribución AT-A y una vista con la tapa quitada que muestra el interruptor automático colocado en el centro (RM6 - Merlin Gerin)



**Fig. 18:** Resultado de las pruebas efectuadas según la norma UTE C 64-115 con un interruptor automático de autoexpansión en SF<sub>6</sub> (interruptor automático de un equipo RM6 - Merlin Gerin).

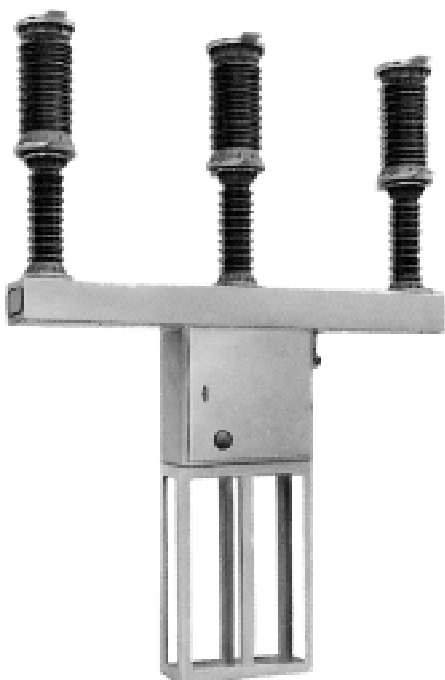


Aún así, la simplicidad de este interruptor automático se nota, a título de ejemplo:

- en el plano electromecánico, por una energía de accionamiento (cerrado-abierto) de 520 J, (valor tradicional en AT-A), resultando de un interés evidente por su fiabilidad debido a lo corto de su carrera y a lo libiano de su parte móvil,

- en cuanto a la ruptura, por una conexión muy «suya» de líneas en vacío, como lo muestra la **figura 20**, en la que no se aprecia ninguna sobretensión visible, a pesar de la elección de un instante de abertura muy desfavorable (0,5 ms antes del cero de la alimentación). Lo decisivo es el crecimiento muy rápido de la rigidez dieléctrica entre contactos junto con la distancia de abertura. La distribución del campo eléctrico así como la ausencia de piezas aislantes (sin el tubo de soplado) en el espacio entre contactos permite conseguir este resultado.

Este ensayo de ruptura de una línea en vacío es parte de las pruebas de certificación previstas por las normas para un interruptor automático.



**Fig. 19:** Interruptor automático para un centro de transformación de AT-B (interruptor automático SB6 - Merlin Gerin).

## Ensayos de desarrollo y certificación

Antes de comercializar un interruptor automático, su constructor debe:

- realizar numerosos ensayos durante su desarrollo. Y esto a pesar de haber hecho prototipos y haber simulado en ellos los fenómenos físicos que contribuyen eficazmente a la puesta a punto y así a la reducción del número de ensayos,

- verificar que, durante los ensayos, se han respetado las normas, mediante el empleo de un banco de pruebas acreditado por uno o varios organismos nacionales (léxico).

Estos ensayos permiten obtener un certificado de conformidad con diversas normas.

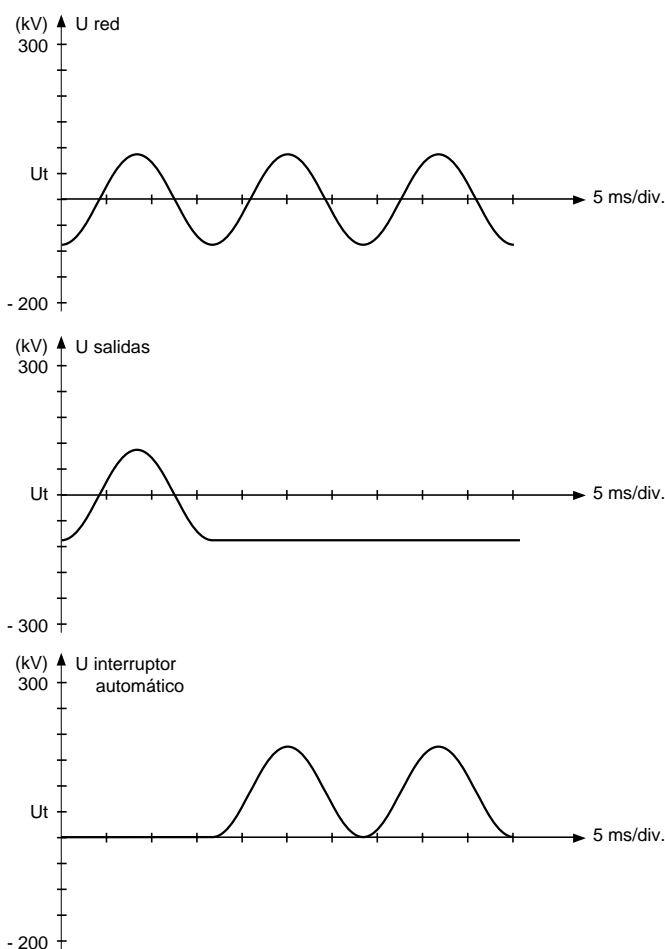
En AT-A y en AT-B las normas de referencia son las CEI 56, 694 y

ANSI C37-04 y siguientes. EDF exige en otros casos ensayos suplementarios según sus propias especificaciones.

A título de ejemplo, para poder poner a la venta el interruptor automático SB6, se han necesitado un centenar de ensayos de corte para conseguir la relación completa de permisos.

- más allá de los certificados oficiales, la experiencia lleva a los constructores serios a efectuar numerosos ensayos complementarios. Éstos deben de comprobar que, para configuraciones particulares de la red o para ciertas cargas, el interruptor automático no falle.

Cuando se trata de una nueva técnica de ruptura, estos ensayos son todavía mucho más numerosos.



**Fig. 20:** Prueba de corte de una línea no cargada hrcha con un interruptor automático de autoexpansión en SF6; el sistema de medida tiene una banda pasante de 10 Mhz (interruptor automático SB6 - Merlin Gerin).

## 4 Conclusión

La técnica de ruptura por autoexpansión de SF<sub>6</sub> permite la fabricación de interruptores automáticos de corte suave y auto-adaptables, simples y fiables. El principio de «con la propia corriente» y la no utilización de artificios sustitutivos, tales como: autoválvulas o protectores de sobretensiones, resistencia, condensador, hacen de la autoexpansión la técnica de ruptura que consigue que uno se olvide del interruptor automático. Recordemos sus cualidades:

- ruptura limpia (con cualquier carga),
- buena fiabilidad (pocas piezas en movimiento y poca energía de accionamiento),
- bajo mantenimiento y poca presión de SF<sub>6</sub>,
- endurancia eléctrica elevada,
- pequeñas dimensiones.

No hay ninguna limitación teórica o tecnológica que se oponga hoy a la utilización de esta técnica en AT-A o

en AT-B. El principal freno a su generalización es su duración y el coste de su desarrollo y de sus pruebas.

Los interruptores automáticos de SF<sub>6</sub>, que utilizan el principio de la auto-expansión asociada a los sistemas digitales de protección, mando y control de redes son, y serán más todavía en el futuro, los garantes de una disponibilidad mejor de la energía eléctrica.



## 5 Bibliografía

### Normas

- ANSI 037: Circuits-breakers switchgear substations and fuses standards.
- CEI 56: Interruptores automáticos de corriente alterna de alta tensión.
- CEI 298: Aparellaje bajo envolvente metálica para corriente alterna de tensiones asignadas superiores a 1 kV e inferiores o iguales a 52 kV ( $\approx$  NF C 20-312).
- CEI 694: Cláusulas comunes a las normas de aparellaje de alta tensión (NF C64-010).
- UTE C 64-115: Interruptores automáticos tripolares: reglas complementarias especiales para el corte de corrientes de transformadores en vacío.

### Cuadernos Técnicos Merlin Gerin

- El proceso de corte con un interruptor automático Fluarc o un contactor Rollarc por medio de arco giratorio en SF<sub>6</sub>.  
Cuaderno Técnico nº 123 - C. DUPLAY

### Publicaciones diversas

- Pressure transients in a self-blown circuit-breaker. Eight International Conference on gas discharges. Oxford, september 1985.  
H. DELECROIX et A. GLEIZES.
- La expansión: una técnica con futuro para los interruptores automáticos con SF<sub>6</sub>.  
Jornadas de estudio SEE sobre aparellaje de corte en AT y MT. Marzo 1987.  
G. BERNARD et P. MALKIN.
- Un interruptor con SF<sub>6</sub> que utiliza el principio de auto-expansión. IEEE trad. PWRD, Vol. 3, nº 4, octubre 1988.  
G. BERNARD, P. MALKIN et W. LEGROS.
- Use of an auto-expansion circuit-breaker in a Ring Main Unit. IEE Proc. Vol. 135, Part. C, nº 3, 1988. G.

BERNARD, G. PERISSIN et J. MARZOCCA.

- An SF<sub>6</sub> auto-expansion breaker : the correlation between magnetic arc control and critical current. IEEE Summer meeting, july 1989.

G. BERNARD, A. GIRARD, P. MALKIN et P. SCARPA.

- La ruptura por autoexpansión en alta tensión. Una nueva aproximación a la reducción de peso y a la fiabilidad.

GIGRE, 1990.

M. BARRAULT, G. BERNARD, A. GIRARD, A. DELAHOUSSE, O. FILLEAU et J.C. HENRY.

- Simulación digital de la interacción arco eléctrico-desprendimiento de gases en los interruptores automáticos de AT-A y AT-B.

Tesis doctoral.

INPG, Grenoble, 1990.

P. CHEVRIER.

- Los interruptores automáticos de autoexpansión son el fruto de estudios profundos.

RGE, nº 11, diciembre 1992.

M. BARRAULT, G. BERNARD, P. CHEVRIER, O. FILLEAU, J.P. KERSUSAN, J. MAFTOUL, S. ROWE, et P. SCARPA.

- Post-arc current measurements down to the ten milliamperes range. IEEE Winter meeting, Colombus, january and february 1993.

M. BARRAULT, G. BERNARD, J. MAFTOUL et S. ROWE.