

Si analizamos las figuras N°6 veremos que se repite el pico de tensión descrito anteriormente y si bien pareciera que el mismo problema se presenta en ambos modelos un zoom del paso por cero de la corriente para los parámetros dependientes de la frecuencia, muestra que estamos en presencia de una oscilación muy amortiguada que no se alcanza a apreciar en la escala utilizada para la graficación. Además, también se repite la diferente forma de aproximarse al cero de la conductancia en ambos casos.

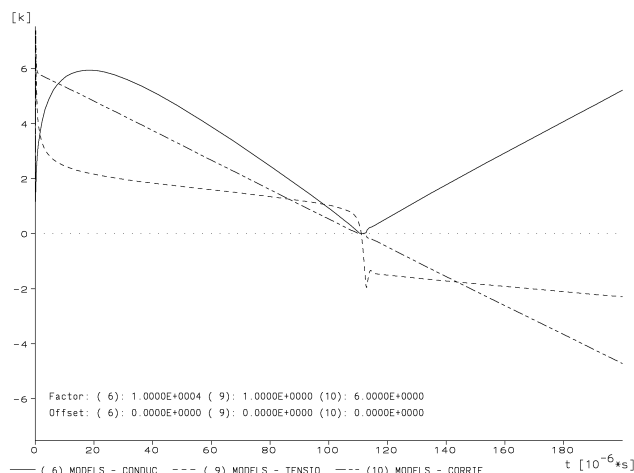


Figura 6b.- Conductancia, tensión y corriente durante el intento fallido de apertura de un interruptor modelado según la ecuación de Mayr con parámetros variables con la conductancia.

Del análisis anterior podemos inferir que el modelo de arco eléctrico con parámetros dependientes de la conductancia no presenta el problema de los picos de tensión que presenta el modelo de parámetros constantes aunque éste último es de aplicación y manejo más simple y en función del estudio a realizar pudiera ser más recomendable su utilización, sobretodo cuando el operador no está familiarizado con el software de simulación utilizado ó con los fenómenos involucrados en el proceso de corte de corriente.

## Referencias

- [1] CIGRE WG 13.01: "Practical application of arc physics in circuit breakers. Survey of calculation methods and applications guide". Electra-CIGRE N° 118, pág. 64-79, May 1988.
- [2] CIGRE WG 13.01: "Application of black box modelling to circuit breakers". Electra-CIGRE N° 149, pág. 40-71, August 1993.
- [3] Martínez Velazco, J.: "Representación avanzada de interruptores mediante el EMTP". 4<sup>tas</sup> Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, Vol N°1, pág. 253-260, Julio 1995, Porto-Portugal.
- [4] CAN/AM EMTP User Group: "Alternative Transients Program (ATP)". Estados Unidos, 1995.
- [5] Carvalho, A., Portela, C., Lacorte, M., Colombo, R.: "Disjuntores e Chaves. Aplicação em Sistemas de Potência". Capítulo 11, CIGRE-FURNAS, Rio de Janeiro-Brasil 1995.
- [6] Habedank, U.: "On the mathematical description of arc behaviour in the vicinity of current Zero". EtsArchiv (1988) N° 11, pág. 339-343.
- [7] Dubé, L., Bonfanti, I.: "MODELS: A New Simulation Tool in the EMTP". ETEP Vol. 2, N°1, pág. 45-50, January/February 1992.
- [8] Schavemaker, P., van der Sluis, L.: "The Influence of the Topology of Test Circuits on the Interrupting Performance of Circuit Breakers". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, N°4, pág. 1822-1828, October 1995.

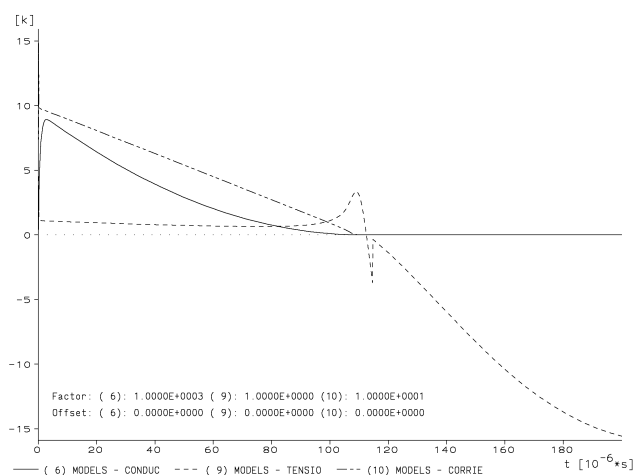


Figura 5a.- Conductancia, tensión y corriente durante la apertura exitosa de un interruptor modelado según la ecuación de Mayr con parámetros constantes.

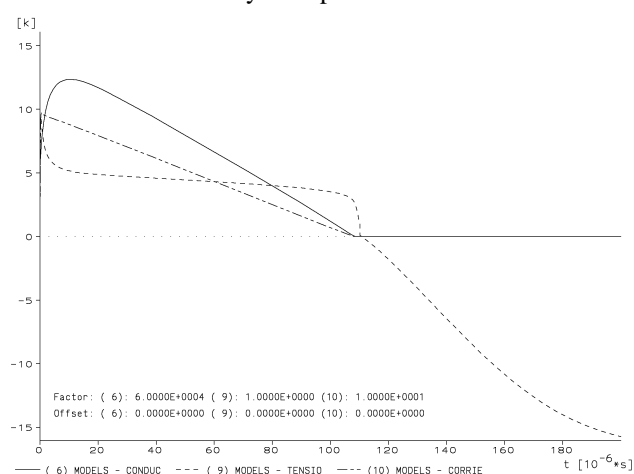


Figura 5b.- Conductancia, tensión y corriente durante la apertura exitosa de un interruptor modelado según la ecuación de Mayr con parámetros variables con la conductancia.

En el intento de simular la apertura fallida del interruptor solo se ha modificado en término constante de la potencia para el modelo con parámetros variables aunque se obtienen resultados parecidos en caso de actuar sobre los otros valores. Los valores utilizados para la apertura fallida son:

$$P_{\text{var.}} = 2.0 \times 10^6 \times g^{1.100847} \text{ W} \quad \text{y} \quad P_{\text{const.}} = 1.0 \times 10^3 \text{ W}$$

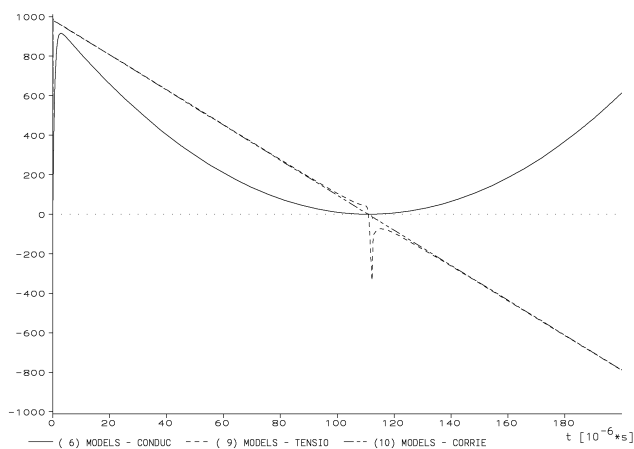


Figura 6a.- Conductancia, tensión y corriente durante el intento fallido de apertura de un interruptor modelado según la ecuación de Mayr con parámetros constantes.

De una simple observación se aprecia la óptima aproximación de variables que se logra al considerar los parámetros de la ecuación de Mayr como funciones de la conductancia del arco eléctrico, si bien los errores no son acumulativos, la aproximación final de la variación de la conductancia no presenta grandes disparidades como se hubiera podido esperar con solo examinar las cuatro primeras figuras.

Para poder valorar la calidad del software desarrollado para la obtención de los parámetros se procedió a comparar los valores obtenidos con un programa de aproximación de curvas de origen comercial dando los siguientes valores

		Software Propio	Software Comercial
Parámetros variables	Potencia [kW]	$P_0 = 21.259,849704 \cdot g^{1,100847}$	$P_0 = 21.259,914 \cdot g^{1,1008472}$
	Const. de tiempo [μseg]	$\Theta = 34,288692 \cdot g^{0,816465}$	$\Theta = 34,288702 \cdot g^{0,81646514}$
Parámetros constantes	Potencia [kW]	$P_0 = 102,823675$	$P_0 = 102,82384$
	Const. de tiempo [μseg]	$\Theta = 0,633892$	$\Theta = 0,63389224$

Tabla I.- Resumen de los valores de los parámetros según el método escogido.

Evidentemente surge del análisis de la tabla anterior que la aproximación lograda para la determinación de los valores de los parámetros es muy buena y aunque pareciera innecesario el desarrollo de un programa especial habiendo otro similar, el desarrollo se justifica a partir de una serie de opciones gráficas y de cálculo que son propias de los métodos para la determinación de los parámetros como así también dependientes de la fórmula escogida de variación de los parámetros (subrutinas de suavizado, por ejemplo) y además crea el archivo de datos para el E.M.T.P..

### Conclusiones

Para mostrar la aplicabilidad de un modelo de arco eléctrico con parámetros dependientes de la conductancia se procedió a incluir dicha variación en código Models en el EMTP/ATP sobre la base del modelo presentado en [7] y simular el ensayo de un interruptor con el siguiente circuito asociado [8]:

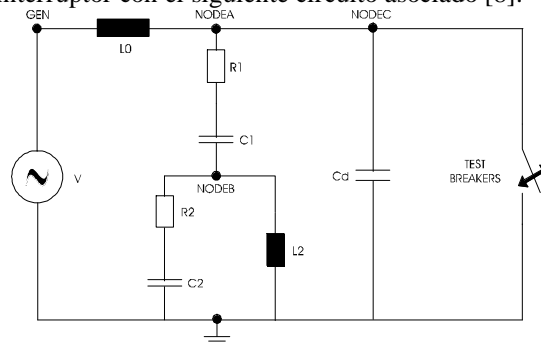


Figura 4.- Circuito utilizado para las simulaciones.

Con este circuito primeramente se simuló la apertura del interruptor modelado con parámetros constantes cuyos resultados se presentan en la figura 5 a y donde se puede apreciar un pico de la tensión entre los contactos del interruptor luego del paso por cero de la corriente que no se verifica en el modelo con parámetros variables, figura 5b; además, si bien la forma de la corriente es similar en ambos casos, la forma de aproximarse al cero de la conductancia difiere entre ambas situaciones.

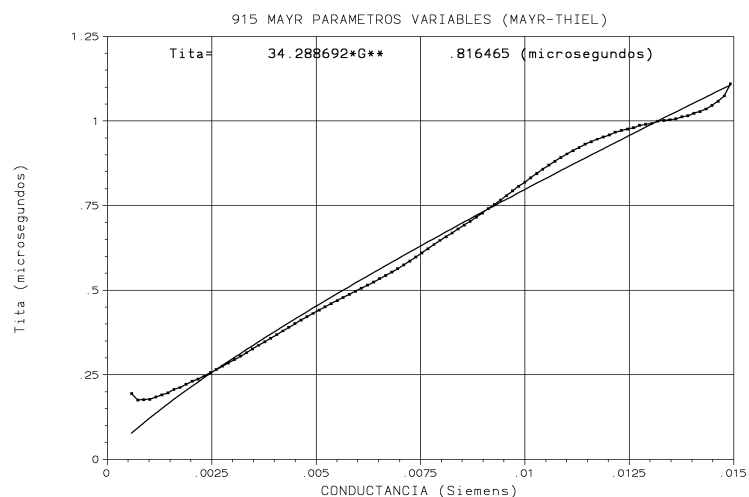


Figura 2b.- Determinación de la constante de tiempo como función de la conductancia.

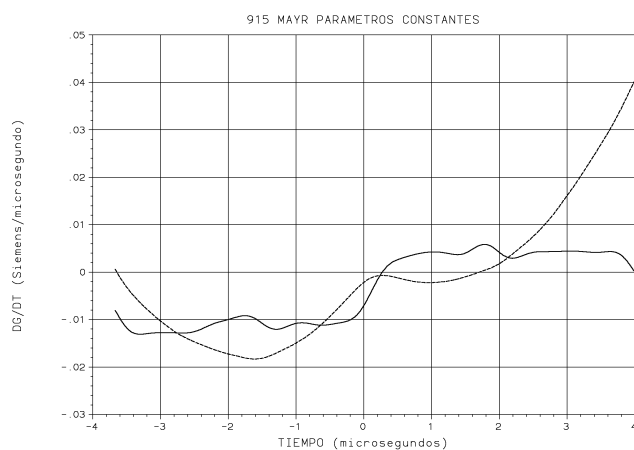


Figura 3a.- Variación de la derivada de la conductancia alrededor del cero de corriente para parámetros constantes.

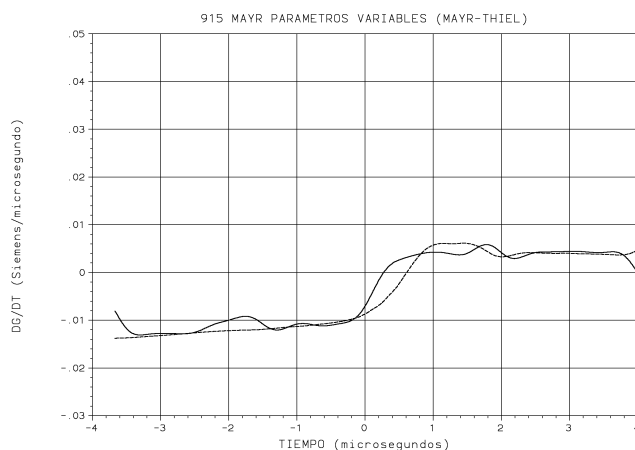


Figura 3b.- Variación de la derivada de la conductancia alrededor del cero de corriente para parámetros variables con la conductancia.

En las seis figuras presentadas anteriormente la línea continua representa a los valores calculados a partir de la digitalización del oscilograma del ensayo y la línea de puntos o trazos corresponde a los valores obtenidos para parámetros constantes y variables respectivamente.

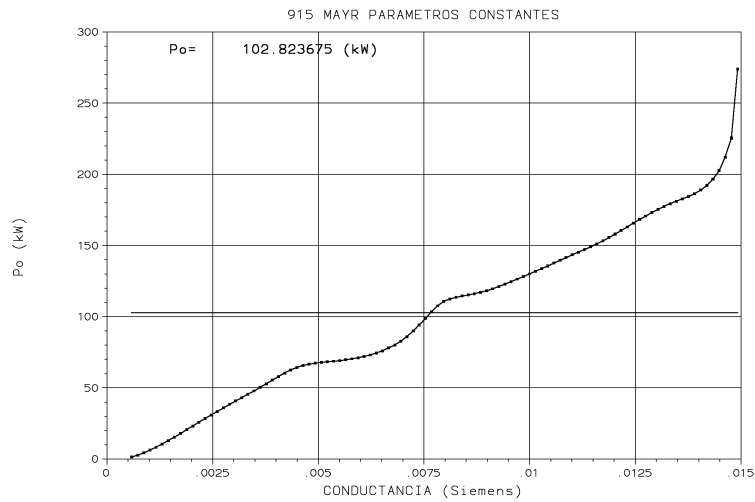


Figura 1a.- Determinación de la potencia como parámetro constante.

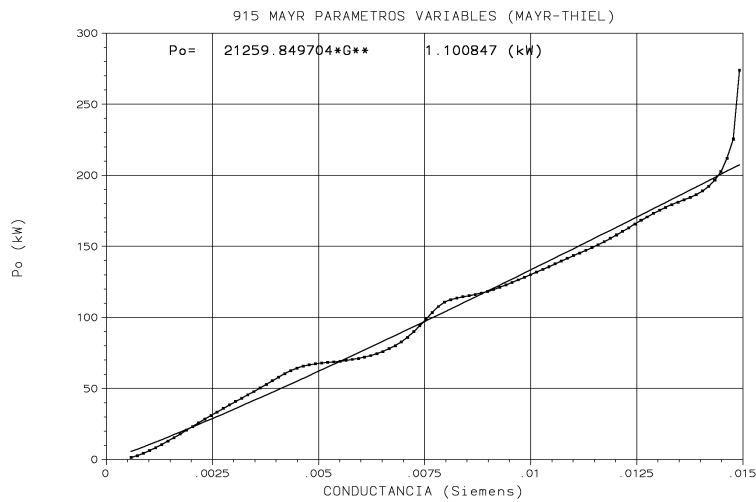


Figura 1b.- Determinación de la potencia como función de la conductancia.

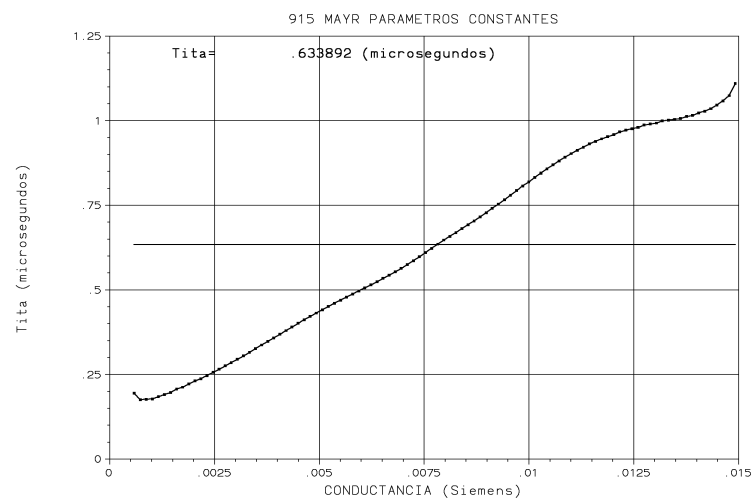


Figura 2a.- Determinación de la constante de tiempo como parámetro constante.

de las condiciones físicas existentes dentro de la cámara de interrupción. Con esto, la corriente y todos los demás parámetros eléctricos pierden validez en su representación en caso de ser considerados como constantes.

Por ello varios autores [5,6] propusieron a  $P_0$  y  $\Theta$  funciones de la conductancia dinámica de la forma:

$$P_0 = P_0(g) \quad \text{y} \quad \Theta = \Theta(g)$$

buscando una mejor manera de representar la variabilidad del arco eléctrico con una variación del tipo exponencial de la siguiente forma:

$$P_0 = A \cdot g^\alpha \quad \text{y} \quad \Theta = B \cdot g^\beta$$

donde las constantes A, B,  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes dependientes del tipo del medio extintor, de su presión y de las características geométricas de la cámara de interrupción. En otras palabras, el problema central de la modelización del arco eléctrico pasa por determinar el valor de estos cuatro parámetros.

### 3.1 Determinación de los parámetros del arco eléctrico

Si bien existen varios métodos para hallar el valor de los parámetros, la determinación de estos valores de  $P_0(g)$  y  $\Theta(g)$  deben ser calculados utilizando oscilogramas de corriente y de tensión y tomando suposiciones adicionales que deben ser hechas para cada caso en particular. El método de Amsinck [5,6] supone que los parámetros tienen la misma dependencia respecto de la conductancia antes y después del cero de corriente y es aplicable para la determinación de los parámetros de un arco eléctrico que se produce en una interrupción seguida de una reignición térmica, es decir, renacimiento del arco a muy pocos microsegundos del primer paso por cero de la corriente.

Para determinar los parámetros se parte del ensayo del interruptor donde se obtiene una tabla de conductancia del arco en función del tiempo para unos microsegundos antes y después del cero de corriente, a la cual, aplicando la ecuación de Mayr para dos puntos  $t_A$  y  $t_B$ , y considerando  $P_0$  y  $\Theta$  como función de  $g$ , se llega a que:

$$P_0(g_1) = \frac{g'_A i_B^2 - g'_B i_A^2}{g_1 (g'_A - g'_B)}$$

y

$$\Theta(g_1) = \frac{g_1 (i_B^2 - i_A^2)}{i_A^2 g'_B - i_B^2 g'_A}$$

Repetiendo este proceso para varios valores de  $g$  y con una regresión adecuada, se pueden obtener  $P_0(g)$  y  $\Theta(g)$ .

### 4. Discusión sobre la determinación de los valores de los parámetros de los modelos

Para ejemplificar respecto a la representatividad de una u otra selección de parámetros se realizó una comparación entre ellos utilizando un oscilograma real de un ensayo sobre un interruptor de SF6 de boquilla de 145 kV de tensión nominal. Partiendo de registros de derivada de corriente y de tensión, que son los que se miden directamente durante el ensayo, se calcula la variación de la conductancia próxima al cero de corriente y luego con un software de desarrollo propio se determinan los restantes valores de los parámetros según la dependencia escogida.

A continuación se presentan una serie de figuras con la aproximación de la derivada de la conductancia, la potencia y la constante de tiempo obtenida para una dependencia constante de los parámetros, subíndice "a", y las mismas variables pero con una dependencia funcional, subíndice "b". Siempre escogiendo como ecuación diferencial la propuesta por Mayr y con determinación de parámetros según el método de Amsinck aunque existen otros que se están investigando.

los dos modelos anteriores.

Por su parte el E.M.T.P./A.T.P. tiene varias formas de distinta complejidad para poder representar de manera más exacta el funcionamiento del interruptor creciendo esta complejidad con la exactitud de la representación. Dichos modelos son [3,4]:

- ▷ El más sencillo considera una acción de apertura ideal que es completamente independiente de la red y en el cual no se considera la existencia del arco eléctrico.
- ▷ Un modelo más representativo se logra al considerar a la conductancia del arco del interruptor como una resistencia o conductancia variable en función del tiempo. Este tipo de modelo es capaz de representar la influencia del arco sobre el sistema pero no sirve en sentido inverso, es decir: no tiene validez para considerar la influencia de la red sobre el arco.
- ▷ Tal vez el modelo más interesante en la actualidad es aquel que es capaz de representar al interruptor como una resistencia, o una conductancia, dinámicamente variable en función de los valores inmediatamente anteriores de tensión y de corriente del arco. La solución de la ecuación escogida para representar al arco eléctrico, es calculada a cada paso de integración suponiendo que la constante de tiempo y la conductancia del arco, permanecen constantes durante el paso de integración elegido.

El uso de un modelo u otro está determinado principalmente por el alcance del estudio a realizar y por el grado de complicación que el usuario del EMTP está dispuesto a aceptar ya que es sumamente fácil caer en la tentación de utilizar modelos complicados para representar un efecto cuando en realidad se está perdiendo precisión por no emplear todos los elementos de la red con igual perfección. En realidad, el punto óptimo entre facilidad y calidad de representación lo obtendrá el usuario en base a su experiencia.

## **2. Modelos básicos del arco eléctrico**

Los primeros intentos para modelar la conducta del arco eléctrico durante el proceso de corte de la corriente, fueron realizados por A. M. Cassie y por O. Mayr; a partir de 1930 [1,5]. El primero de ellos consideró al arco eléctrico como un canal de densidad de corriente y temperatura constante, con un fuerte campo eléctrico y con un área transversal que varía directamente con la corriente; donde la pérdida de energía por convección es proporcional a la energía almacenada por unidad de volumen y la conductancia proporcional a la sección. El segundo, en cambio, propuso que la transferencia de calor al medio se realiza en toda la periferia por conducción y que la conductancia varía exponencialmente con la energía almacenada, permaneciendo la sección y el tamaño del arco constante.

En forma general se puede afirmar que el modelo de Mayr:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left( \frac{v \cdot i}{P_0} - 1 \right)$$

es aplicable para representar regiones de pequeñas corrientes próximas al cero, mientras que el modelo de Cassie lo es para regiones de grandes corrientes [3]:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left( \frac{v^2}{V_0^2} - 1 \right)$$

siendo:  $g$  la conductancia dinámica,  $\Theta$  su constante de tiempo,  $P_0$  la pérdida de potencia en forma de calor,  $V_0$  la tensión considerada como constante y  $v$  e  $i$  la tensión y corriente instantáneas en el arco

## **3. Modelo avanzado del arco eléctrico**

Se puede observar que los modelos anteriores están descriptos por sólo dos parámetros constantes:

- ▷  $\Theta$  y  $P_0$  para el modelo de Mayr
- ▷  $\Theta$  y  $V_0$  para el modelo de Cassie

ya que  $v$  e  $i$  se pueden medir y/o calcular, pero su validez se vuelve criticable si tenemos en cuenta que en la realidad la conductancia no puede ser considerada constante como consecuencia de la rapidez de las variaciones

## MODELO DE ARCO ELÉCTRICO CON PARÁMETROS DEPENDIENTES DE LA CONDUCTANCIA PARA EL EMTP/ATP.

Ings. Walter Giménez, Orlando Hevia, Elbio Vaillard.

Grupo de Investigación de Sistemas Eléctricos de Potencia - GISEP,  
Universidad Tecnológica Nacional, Fac. Reg. Santa Fe.  
Lavaise 610. (3000) Santa Fe, Argentina.  
Tf: (54) 42 - 601579. Fax: (54) 42 - 690348  
E-mail: cgimenez@arcride.edu.ar

### RESUMEN

Este trabajo presenta las herramientas disponibles y la metodología a seguir para la simulación de un interruptor de potencia mediante la técnica llamada "Black Box" en el Electromagnetic Transients Program, a partir de oscilogramas de un ensayo real.

Discute sobre la calidad de la representación de dos tipos de modelos distintos: uno con parámetros constantes y otro con parámetros dependientes de la conductancia, con un ejemplo.

También analiza las formas de la determinación de los parámetros para ambos casos y la aproximación que se obtiene mediante un programa propio de determinación de parámetros respecto de otro software.

**Palabras clave:** EMTP/ATP, Arco eléctrico, Modelización, Interruptores.

### 1. Introducción

Para obtener una buena representación del comportamiento de los interruptores se debe contar con modelos adecuados capaces de representar al arco eléctrico no solo en estudios particulares de TTR, por ejemplo, sino también en investigaciones respecto a la relación o mutua influencia entre el arco eléctrico y la red asociada a él, que permitan predecir su aptitud en condiciones límites de funcionamiento como en el caso de faltas kilométricas.

Las herramientas actualmente disponibles para el estudio del funcionamiento de interruptores de potencia se pueden agrupar en tres áreas [1,2,3]:

- ▷ Modelos llamados "Black Box (o Caja Negra)" que consideran al arco eléctrico como un bipolo y determinan una función de transferencia usando una fórmula matemática escogida previamente, aproximando el resto de parámetros mediante técnicas adecuadas a oscilogramas de tensión y de corriente de ensayos ya realizados.
- ▷ Modelos físicos de arcos, que incluyen una descripción matemática en detalle de los procesos involucrados en el corte de corriente calculados a partir de leyes de conservación de la energía y teniendo en cuenta las propiedades físico-químicas del gas aislante y modelos detallados de mecanismos de intercambio de calor por convección y conducción mayoritariamente.
- ▷ Modelos basados en fórmulas y diagramas que establecen una relación entre los parámetros intervinientes que son derivados a partir de ensayos o cálculos realizados con