

Agradecimiento

Los autores agradecen al Sr. José Carrasco, de la empresa Circuit Breakers Industries Chile S.A., Viña del Mar, Chile; por su colaboración en la entrega de interruptores para la realización de los ensayos.

Referencias

- [1] CIGRE, Working group 13.01: *Practical application of arc physics in circuit breakers. Survey of calculation methods and application guide*. ELECTRA-CIGRE, N° 118, May 1988, pp 64-79.
- [2] CIGRE, Working group 13.01: *Applications of black box modelling to circuit breakers*. ELECTRA-CIGRE, N° 149, August 1993, pp 40-71.
- [3] W. Gimenez, O. Hevia, E. Vaillard, *Modelo de arco eléctrico con parámetros dependientes de la conductancia*. V^{tas} Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica, Tomo I, pág. 531-538. Julio de 1997, Salamanca, España.
- [4] A.C. Cavalcanti de Carvalho, C.M. Portela, J.S. Teixeira, R. Colombo, *Disjuntores e Chaves Aplicação em Sistemas de Potência*, Editora da Universidade Federal Fluminense, CIGRÉ Comité Nacional Brasileiro-FURNAS, 1995
- [5] K. Nakanishi, *Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers*, Ed. Marcel Dekker Inc, 1991.
- [6] U. Habedank, *On the mathematical description of arc behavior in the vicinity of current zero*. ETZ Archiv, Vol 10, 1988, pp 339-343.
- [7] W. Gimenez, O. Hevia, *Metodología para la modelización del arco eléctrico a partir de oscilogramas de ensayos*. III Seminario Argentino de usuarios del EMTP, Noviembre 1998, Buenos Aires, Argentina.
- [8] J.C. Gómez, R. Bocco, O. Simone, H. Biasi, *Obtención de la simulación de máxima sollicitación en la operación CO del ensayo de capacidad de ruptura de interruptores termomagnéticos*. II Jornadas Rosarinas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Octubre 1985, Rosario, Argentina.
- [9] H.W. Dommel, T. Lui, CanAm EMTP User Group, *EMTP Rule Book*, Vol 1 y 2, 1995.
- [10] H.W. Dommel, CanAm EMTP User Group, *EMTP Theory Book*, BPA, 1987.
- [11] L Dubé, Users Guide to MODELS in ATP. April 1996.

En la figura anterior es posible observar el mejor comportamiento del modelo de Mayr con parámetros variables, sobretodo en la parte anterior y próxima al paso por cero de la corriente que se verifica para tiempo cero. Luego de éste instante la suerte de la apertura o no del interruptor ya está hecha.

Para finalizar, realizando un conjunto de simulaciones variando convenientemente los valores de los parámetros para el modelo de Mayr, es posible determinar la bondad del interruptor para cortar la corriente a la cual fue sometido durante el ensayo. De la misma manera si se utiliza la máxima corriente de corte permitida, se puede llegar a tener la zona de operación del interruptor y una valoración de la probabilidad de tener una apertura exitosa.

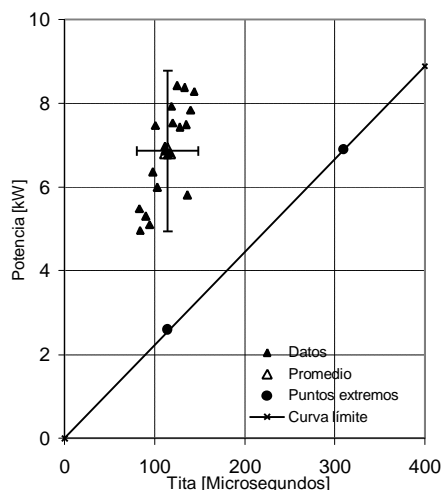


Figura 6. Zona de operación del interruptor.

También es posible aproximar la curva límite de la operación del interruptor a una línea recta de la forma $y=A+Bx$ (con $A=0,01751$ y $B= 0,02216$) que divide a la figura en dos partes: una parte, superior que es la zona de apertura exitosa del interruptor; y otra inferior que es la zona de apertura fallida o reignición del arco. Aunque en realidad habría que hablar de una zona de transición superpuesta a la línea de división.

6. Conclusiones

El modelo de interruptor ensayado está en el rango más pequeño de interruptores. Aún así, la aplicación de la técnica desarrollada, teniendo en cuenta que fue creada para interruptores de alta tensión (145 [kV]) de gran capacidad de corte (50 [kA]) y otro medio extinguidor (SF6), produce muy buenos resultados a partir de ensayos efectuados bajo otras condiciones mucho más modestas que para los anteriores.

De esta manera se pudo comprobar la eficacia del Método Asturiano de cálculo de parámetros, el cual respondió de manera excelente, hasta en aquellas situaciones donde los datos registrados poseían excesivo ruido. Respecto a la dispersión de los valores calculados se determinó que aproximadamente es del 15 % para parámetros constantes y algo mayor para variables, brindándose en forma de tabla algunos de los resultados obtenidos.

Se demostró que los valores de los parámetros son independientes del ángulo de conexión, siempre y cuando, la separación galvánica y la apertura total de los contactos pertenezcan al mismo semiciclo de corriente.

En las simulaciones se pudo demostrar la aplicabilidad del modelo de Mayr, con parámetros variables con la conductancia, para representar al arco eléctrico incluso en aquellas zonas en donde la cercanía con el cero de corriente no se cumple estrictamente.

Queda para el futuro la repetición de este trabajo a otro tipo de interruptor o a otro nivel de tensión.

Tabla III. Resumen de los valores de los parámetros para los ensayos de repetición (75° y 120°).

ENSAYOS DE REPETICIÓN: RESUMEN DE VALORES (75° y 120°).					
Modelo	Estado	Parámetro	Valor	Dispersión	Unidad
Mayr	Constante	Potencia	6,961	± 1,08	[kW]
		Tita	114	± 18	[μseg]
	Variable	Potencia	8961,66.g ^{0,49491}	± 3567,03.g ^{0,85129}	[kW]
		Tita	138,397.g ^{0,46638}	± 83,8286.g ^{0,8226}	[μseg]
Cassie	Constante	Tensión	116,12	± 19,32	[V]
		Tita	373	± 185	[μseg]
	Variable	Tensión	443,303.g ^{0,13997}	± 176,856.g ^{0,35088}	[kV]
		Tita	668,611.g ^{0,89250}	± 63,2594.g ^{1,16604}	[μseg]

5. Simulaciones

Utilizando el ATP se procedió a simular el ensayo siguiendo los siguientes pasos: cálculo de los parámetros de las ecuaciones, medición de todos los componentes del circuito eléctrico asociado al test y escritura de los modelos en la sección “Models” del ATP [9-11]. Luego de verificar el funcionamiento de los modelos se procedió a realizar la simulación, cuyo resultado se muestra a continuación para el modelo de Mayr.

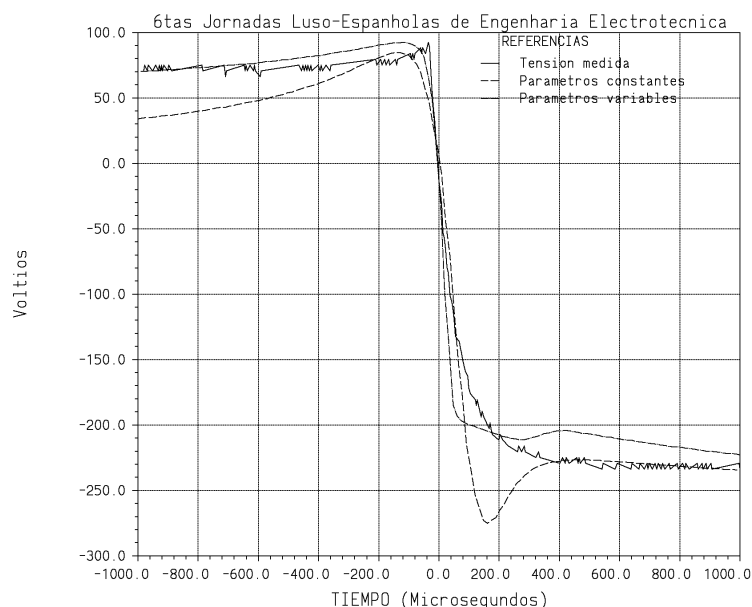


Figura 5. Comparación de la medición con las simulaciones realizadas

En la simulación anterior es posible destacar el buen comportamiento y representatividad de los valores de los parámetros hallados para el modelo de Mayr, ya que los mismos fueron calculados a partir de una región (desde -500 [μseg] hasta +250 [μseg]) mucho más pequeña de la que en realidad se simula; con lo cual la validez de la simulación se extiende más allá de la región usada para los cálculos.

generales de evolución: el primer grupo rápidamente consigue valores importantes de potencia para conductancias pequeñas, mientras que el segundo tiene una evolución más paulatina para valores mayores de conductancia. Analizando posteriormente éste agrupamiento con los oscilogramas de cada grupo se pudo observar una posible causa de ésta diferencia, en la forma general de acercamiento de la tensión al momento del cero de corriente: el primer grupo tiene un acercamiento más pronunciado mientras que el segundo no lo tiene tan acusado.

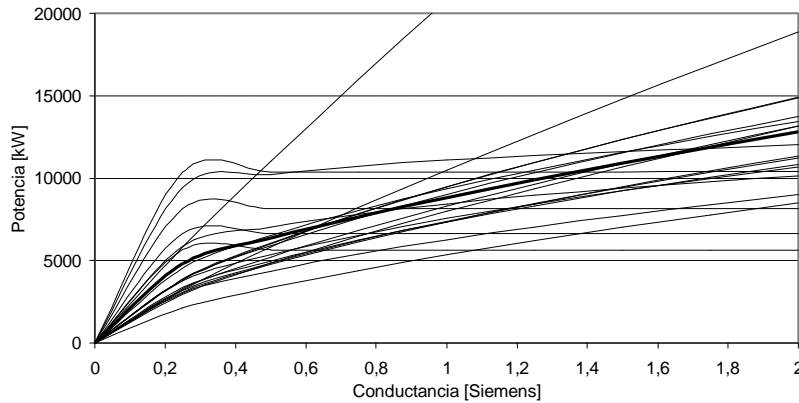


Figura 3. Evolución de las potencias para todos los ensayos de repetición.

Por su parte, la evolución de la constante de tiempo de la ecuación de Mayr tratada como variable con la conductancia no presenta mayores diferencias entre ellas, pero sí una gran dispersión de valores para conductancias elevadas. Al igual de lo ocurrido anteriormente, la curva de mayores valores de ordenadas corresponde al ensayo “Gab27”, tal cual puede verse a continuación.

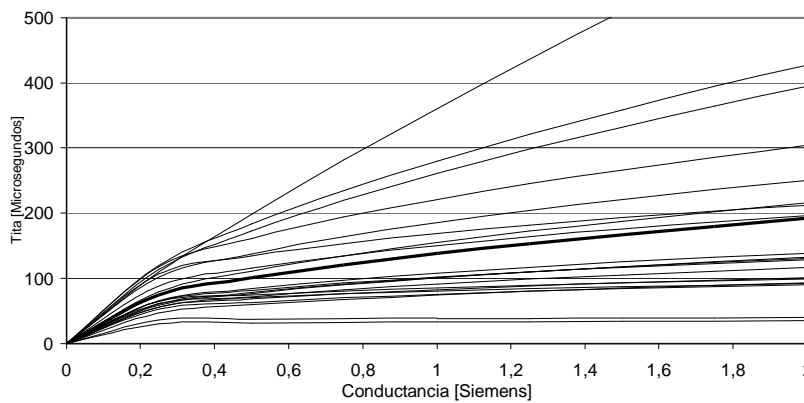


Figura 4. Evolución de la constante de tiempo para todos los ensayos de repetición.

Tabla II. Valores de los parámetros para el modelo de Cassie (75°).

VALORES DE PARÁMETROS DEL MODELO DE CASSIE (75°)						
Oscilo.	Uo [V]	Θ [μ seg]	A	α	B	β
Gab1	94,3989	312	550,426	0,347504	546,983	0,784728
Gab2	98,6923	267	291,588	0,047459	638,833	0,896932
Gab3	102,144	407	395,699	0,098206	635,984	0,921110
Gab4	121,228	523	355,024	0,091689	694,253	0,914254
Gab5	132,966	110	394,525	0,101832	635,089	0,901177
Gab6	90,3558	136	322,936	0,065146	633,441	0,939983
Gab7	97,1930	543	343,440	0,076981	698,039	0,943537
Gab8	94,5830	411	367,141	0,086391	544,522	0,873392
Gab9	150,250	695	447,413	0,131495	723,197	0,908395
Gab10 (*)	96,7609	42	844,129	0,213787	649,017	0,853607

Nota: El “(*)” significa que el tiempo total de cálculo para éste registro fue reducido hasta desde - 500 [μ seg] hasta + 500 [μ seg] solamente para el cálculo de los parámetros como constantes.

4. Resultados obtenidos

Si bien en las tablas anteriores se muestran sólo los resultados numéricos de la primera batería de ensayos (Gab1 hasta Gab10), aquí se analizarán las dos baterías con distinto ángulo de conexión conjuntamente, ya que no han mostrado grandes divergencias entre los valores calculados para cada una de ellas.

Los valores de los parámetros de la ecuación de Mayr considerados como constantes, se presentan en forma conjunta a modo de gráfica de $Po = f(\Theta)$, en la figura siguiente para los dos ángulos de disparo ensayados.

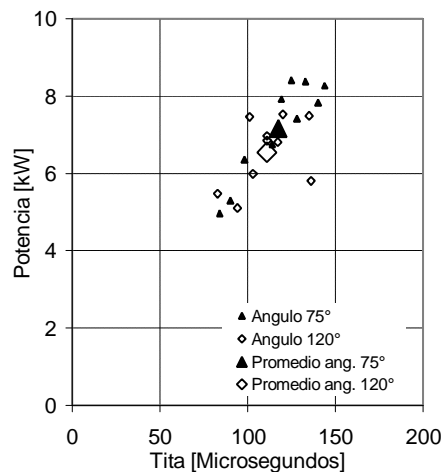


Figura 2. Gráfica de $Po=f(\Theta)$ para los dos ángulos de conexión.

En la fig.2, se puede observar los valores de los parámetros que resultaron del cálculo, para los cuales no existe una gran dispersión, estando los valores promedios para cada batería, muy próximos entre sí. Además, la forma general de la distribución de los puntos para ambos casos resultan coincidentes.

Para efectuar un análisis del comportamiento de los parámetros como variables con la conductancia, se presenta las figuras siguientes, en donde se observa la evolución de todas las potencias de las pruebas registradas, juntamente con el valor promedio calculado. Dejando de lado el comportamiento de la potencia para los archivos “Gab7” y “Gab27”, que son las curvas que tienen mayores valores, es posible agrupar el resto de curvas en dos formas

seguida y bajo las mismas condiciones generales del circuito y del ambiente. La finalidad de estos ensayos fue calcular y evaluar la dispersión de los parámetros de los modelos matemáticos de Mayr y de Cassie para la simulación del arco eléctrico que se ha registrado. La tensión total del sistema fue de 238 [V] mientras que la corriente aplicada fue de 348 [A], siendo el coseno ϕ igual a 0,18. La primera batería de ensayos fue realizada manteniendo un ángulo de conexión igual a 75° y la segunda a 120° , siendo ésta última la condición de sollicitación máxima durante el ensayo de capacidad de ruptura [8].

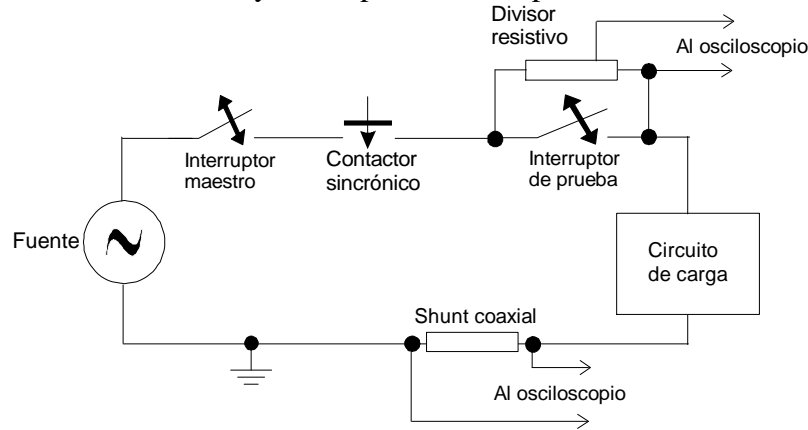


Figura 1. Detalle del circuito eléctrico y de medición empleados en los ensayos.

Para la determinación de los valores de los parámetros tanto del modelo de Mayr como el de Cassie, se utilizó el método Asturiano de cálculo ya que fue el único que mostró la capacidad de utilizar los datos registrados.

Tabla I. Valores de los parámetros para el modelo de Mayr (75°).

VALORES DE PARÁMETROS DEL MODELO DE MAYR (75°)						
Oscilo.	Po [kW]	Θ [μ seg]	A	α	B	β
Gab1	7,43	128	9449,87	0,655200	154,587	0,479180
Gab2	7,84	140	7970,16	0,720429	91,4206	0,351321
Gab3	4,97	84	5638,19	$0,526947^{-5}$	150,586	0,383475
Gab4	8,42	125	11079,0	0,116235	221,569	0,455648
Gab5	8,28	144	10371,6	$0,179393^{-2}$	279,775	0,611284
Gab6	6,76	114	7332,04	0,563393	101,216	0,372769
Gab7	8,38	133	10477,4	0,850241	100,767	0,391693
Gab8	5,31	90	5333,95	0,672793	33,0002	0,068624
Gab9	7,93	119	9474,34	0,649119	102,213	0,327079
Gab10	6,36	98	7541,61	0,499486	80,3185	0,197014

El tiempo total registrado fue de 20 [mseg] pero solamente se han utilizado para el cálculo, los puntos ubicados desde -500 [μ seg] antes del paso por cero de la corriente hasta $+250$ [μ seg] después para el modelo de Mayr. En cambio, para el modelo de Cassie se han utilizado desde -1500 [μ seg] hasta $+500$ [μ seg], a menos que se indique en particular el tiempo utilizado.

Los primeros intentos para simular la conducta del arco eléctrico fueron realizados por A. M. Cassie y por O. Mayr; a partir de 1930 [1-4]; los cuales, partiendo de suposiciones distintas arribaron a las siguientes ecuaciones,

$$\text{Cassie: } \frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{v^2}{V_0^2} - 1 \right) \qquad \text{Mayr: } \frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{v \cdot i}{P_0} - 1 \right)$$

siendo: g la conductancia dinámica, Θ 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. En forma general se puede afirmar que el modelo de Mayr es aplicable para representar regiones de pequeñas corrientes próximas al cero, mientras que el modelo de Cassie lo es para regiones de grandes corrientes [5].

Posteriormente varios autores [3,4] propusieron a P_0 , V_0 y Q como funciones de la conductancia dinámica buscando una mejor manera de representar la variabilidad del arco eléctrico con una variación del tipo exponencial de la siguiente forma:

$$P_0 = A \cdot g^a \quad \text{ó} \quad V_0 = A \cdot g^a \quad \text{y} \quad Q = B \cdot g^b$$

donde las constantes A , B , a y b son constantes propias del arco eléctrico. En otras palabras, el problema central de la simulación del arco eléctrico es determinar el valor de estos cuatro parámetros, dos por ecuación.

2. Cálculo de los parámetros

El método más difundido es el propuesto por Amsinck, el cual sólo se puede aplicar a una medición en el cual se produzca una reignición del arco eléctrico durante el ensayo respectivo [2,4,6]. También existen otros métodos menos difundidos que permiten calcular los parámetros como el método de Stoke que necesita dos ensayos con reigniciones y diferentes pendientes de la corriente, el de Ruppe que utiliza al menos dos ensayos distintos o también se pueden emplear circuitos especiales durante los ensayos como lo hace Rijanto.

2.1. El Método Asturiano

Este nuevo método consiste en determinar los parámetros de la ecuación a partir de los valores registrados de tensión y corriente (o su derivada) para lo cual se calcula la derivada de la conductancia para cada valor de tiempo t generando una tabla de valores de $g'_m(t)$ [7]. Luego, estimando un par de valores de P_0 y Q , y, si se efectúa un ajuste por mínimos cuadrados del conjunto de puntos calculados con la ecuación de Mayr con los medidos, se obtiene el par de valores de P_0 y Q que mejor representan a las mediciones. De la misma manera se pueden seguir los pasos anteriores pero esta vez para la ecuación de Cassie para la cual también se obtendrán los valores de U_0 y Q que mejor aproximan la derivada de la conductancia estimada o calculada con la registrada.

La principal ventaja de utilizar éste método es que no tiene ningún requisito para su aplicación, lo cual lo transforma en un método de uso más general que los actualmente disponibles.

3. Los ensayos realizados

Estos ensayos fueron realizados sobre un interruptor tipo MCB, de apertura en aire, marca HY-MAG®, modelo SA1-G3 y constaron de dos baterías de 10 ensayos realizados de forma

Análisis de los parámetros de un modelo de arco para ser aplicado a interruptores de B.T.

Walter F. Giménez ⁽¹⁾, Orlando P. Hevia ⁽¹⁾, Gabriel Campetelli ⁽²⁾
Juan Carlos Gómez ⁽²⁾

⁽¹⁾ G.I.S.E.P. – Fac. Reg. Santa Fe
Universidad Tecnológica Nacional
Lavaisse 610. (3000) Santa Fe,
Argentina.

E-mail: wgimenez@frsf.utn.edu.ar

⁽²⁾ I.P.S.E.P. - Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Río Cuarto
Ruta N°36, Km 601. (5800) Río Cuarto,
Argentina

E-mail: gcampetelli@ing.unrc.edu.ar

Resumen

Este trabajo investiga los valores de los parámetros del arco eléctrico en un interruptor de baja tensión calculados con un nuevo método, analizando su dispersión estadística producida por fenómenos variables y no controlables, a partir de un conjunto de pruebas realizadas en laboratorio. También se presenta un nuevo comportamiento de los parámetros de los modelos de Mayr y Cassie, para simular los ensayos realizados, usando el Alternative Transients Program (ATP) analizando además, su grado de representatividad del arco eléctrico. Mediante simulaciones, se determina a posteriori la capacidad de apertura del interruptor ensayado.

Palabras clave: Arco eléctrico, Parámetros, Simulación, ATP, Interruptores.

1. Introducción

Actualmente, las técnicas de estudio del funcionamiento de interruptores por modelos se pueden agrupar en tres grupos: modelos llamados caja negra, modelos físicos de arcos eléctricos y modelos basados en fórmulas y diagramas prácticos [1-3]. De ellas, la técnica de simulación del arco eléctrico mediante modelos de caja negra se basa en el empleo de oscilogramas de corriente y de tensión de la apertura de interruptores para relacionarlas con una ecuación diferencial previamente escogida, para deducir un modelo matemático capaz de reproducir el arco e implica generalmente los siguientes pasos: elección de una ecuación para representar el arco, ensayos de laboratorio para obtener oscilogramas de tensión y corriente, determinar los parámetros de la ecuación a partir de los oscilogramas y por último, realizar las simulaciones del ensayo realizado (empleando programas de simulación como el EMTP/ATP –Electromagnetic Transients Program o el Alternative Transients Program-, NETOMAC, ACSL -Advanced Continuous Simulation Language- entre otros).