

5.11.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 5

- [1] K. Nakanishi, Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers, Marcel Dekker Inc, 1991.
- [2] 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
- [3] International Electrotechnical Commission (IEC): “International Standart 56: High-Voltage alternating-current circuit-breakers”, 1995.
- [4] International Electrotechnical Commission (IEC): “International Standart 427: Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers”, 1992
- [5] H.W. Dommel, T. Lui, CanAm EMTP User Group, EMTP Rule Book, Vol 1 y 2, 1995.
- [6] H.W. Dommel, CanAm EMTP User Group, EMTP Theory Book, BPA, 1987.
- [7] Department of Engineering Professional Development, College of Engineering, Introduction to the Electromagnetic Transients Program, University of Wisconsin-Madison/Extension, 1997.
- [8] H. Dommel, “Modelación y Cálculo de Transitorios en Sistemas Eléctricos”. Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1998.
- [9] Grupo de Investigación de Sistemas Eléctricos de Potencia GISEP-CAUE, Introducción al uso del EMTP, Universidad Tecnológica Nacional Fac. Reg. Santa Fe, 1997.
- [10] Grupo de Investigación de Sistemas Eléctricos de Potencia GISEP-CAUE, Curso avanzado para usuarios EMTP, Universidad Tecnológica Nacional Fac. Reg. Santa Fe, 1995.
- [11] R. Bianchi Lastra, Manual de uso del ATP, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería, Octubre 1991.
- [12] O. Hevia: “GTPPLOT a new version of TPLOT”, EEUG, 1998.
- [13] L. Dubé, I. Bonfanti, “Models: A New Simulation Tool in the EMTP”. European Transactions on Electrical Power Engineering/ETEP, vol.2, N°1, January-February 1992, pp. 45-50
- [14] L Dubé, “Users Guide to MODELS in ATP”. April 1996.
- [15] J.A. Martinez Velasco, “Aplicaciones del código Models”. 2^{das} Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, Julio 1991, Coimbra, Portugal.
- [16] U. Habedank, “Application of new arc model for de evaluation of short-circuit breaking test”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 8, N°4, October 1993, pp. 1921-1925.
- [17] U. Habedank, “On the mathematical description of arc behaviour in the vicinity of current zero”. ETZ Archiv, Vol 10, 1988, pp. 339-343.
- [18] 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, pp. 531-538. 3 al 5 de Julio de 1997, Salamanca, España.
- [19] G. Bizjak, P. Zunko, D. Povh, “Circuit breaker model for digital simulation based on Mayr’s and Cassie’s differential arc equations”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 10, N°3, July 1995, pp. 1310-1315.
- [20] W. Widl, P. Kirchesh, W. Egli: “Use of integral arc models in circuit-breakers testing and development”. IEEE Transaction on Power Delivery, October 1988, pp. 1685-1691.

difícil valoración durante el desarrollo del ensayo: el grado de exactitud del circuito de captura y posterior tratamiento de datos y las mediciones de los elementos asociados al circuito, deseables o no, como ser inductancias y capacitancias parásitas y/o distribuidas que siempre están presentes en la rapidez del ensayo. Sin olvidar que ningún programa de simulación es totalmente exacto. La valoración adecuada de lo expuesto anteriormente sólo podrá servir para tener una mejor idea de la bondad de todo el proceso de simulación aquí empleado.

Por su parte, merece un apartado especial el funcionamiento de los modelos aquí tratados, de sobremanera al tener en consideración que no se han modificado en absoluto los valores de los parámetros calculados y que los resultados de las simulaciones sólo responden en consecuencia de la conducta que adopta cada modelo a la hora de representar un ensayo determinado. La utilidad en este aspecto, también se extiende al valor en sí que adoptan los parámetros de las ecuaciones que son de muy difícil acceso por lo usuarios de los programas de simulación y que sólo son conocidos por los fabricantes de interruptores ya que forman parte del “Know-How” del diseño de los mismos.

El análisis comparativo del resultado de las simulaciones resumido en la tabla 5-20, brindará al lector una poderosa herramienta de elección del mejor modelo según el caso que necesite simular.

Ya en el apartado de las aplicaciones prácticas se demostró la aplicabilidad de los modelos de arco para simular la operación de un interruptor en un circuito real. Esto permitirá su implementación en estudios de sobretensiones en el circuito, coordinación de protecciones y todo aquel análisis que involucre a interruptores de potencia, se verá mejorado con el estudio del presente capítulo.

Por su parte, las aplicaciones especiales han demostrado lo bueno de la técnica desarrollada en capítulos anteriores elevando el nivel de tensión hasta 245 [kV] e incluso hasta para distintas combinaciones de gases refrigerantes, lo que brinda una poderosa herramienta para el desarrollo de nuevos tipos de interruptores.

VALORES PARA DISTINTOS TIPOS DE GASES					
Modelo	Estado	Parámetro	Puro SF6 (H870)	Mezcla SF6 + N ₂ (H878)	Unidad
Mayr	Cons.	Potencia	47,98	40,0	[kW]
		Tita	0,331	0,293	[μs]
	Var.	Potencia	$1222200 \cdot g^{0,578268}$	$990806 \cdot g^{0,574854}$	[kW]
		Tita	$0,482732 \cdot g^{0,075246}$	$0,256316 \cdot g^{0,0000212}$	[μs]
Cassie	Cons.	Tensión	4,509	4,451	[kV]
		Tita	0,418	0,385	[μs]
	Var.	Tensión	$14314,5 \cdot g^{0,008691}$	$4504,69 \cdot g^{0,658 \cdot 10^{-10}}$	[kV]
		Tita	$44,0005 \cdot g^{0,695243}$	$0,638265 \cdot g^{0,085837}$	[μs]

Tabla N°5-21: Comparación de los valores de los parámetros para distintas mezclas de gases.

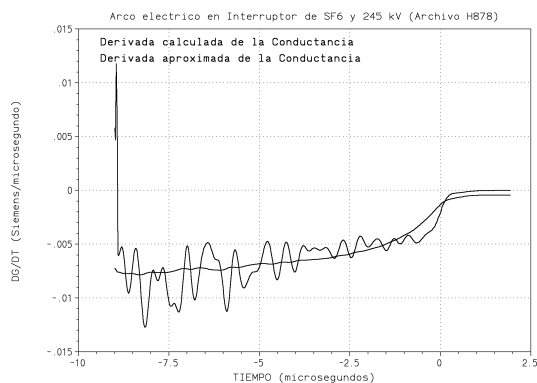
La utilidad de los datos anteriores tiene dos fundamentos: en caso de necesitar simular el comportamiento de un interruptor de SF6 y 245 [kV] éstos son los valores a utilizar junto con los modelos anteriormente detallados y, segundo, se pueden extraer algunas conclusiones de comparar los valores numéricos de éstos parámetros relacionándolos con la mezcla del gas utilizado. En éste último aspecto, se puede decir según los valores anteriores que, la mezcla de SF6 y N₂ tiene menor poder de enfriamiento del arco (40 contra 48 [kW]) pero una rapidez mayor (0,29 contra 0,33 [μs]) que en el caso de emplear sólo SF6.

De la misma forma que lo realizado en el punto anterior se podría llegar a analizar distintas mezclas de gases mediante comparación de los valores que resultan del empleo de los programas aquí desarrollados. Además un aspecto que es muy necesario tener en cuenta es el factor de dispersión del arco eléctrico por el cual es necesario realizar una batería de ensayos en similares condiciones, luego calcular los valores medios y su dispersión y posteriormente extraer algún tipo de conclusión de los valores obtenidos.

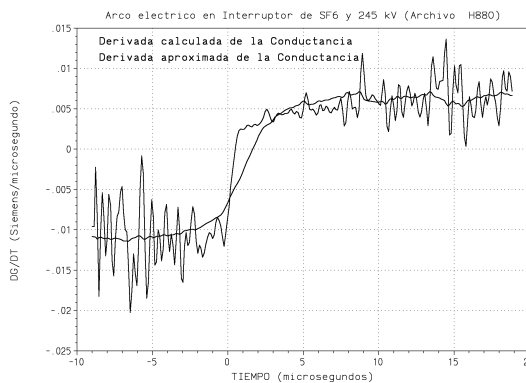
5.10.- CONCLUSIONES

Con las simulaciones se ha podido comprobar el grado de exactitud de la metodología de cálculo de parámetros desarrollada en capítulos anteriores a través del uso de los programas especialmente diseñados. En el mismo sentido y como es lógico, en el resultado final de las simulaciones es posible apreciar la sumatoria y/o la compensación de los errores cometidos a lo largo de todo el proceso de cálculo, a saber: errores en la impresión de los oscilogramas, en su reproducción, durante la digitalización de las curvas, armado de los archivos de datos, entre otros menos apreciables.

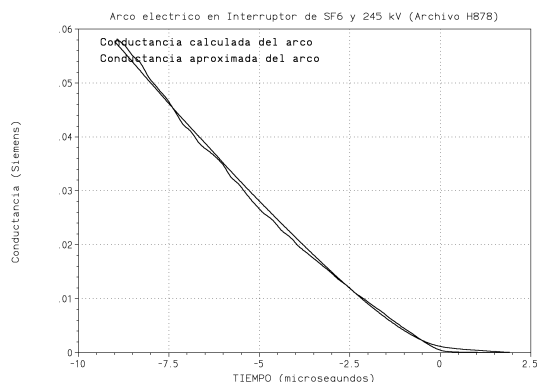
Por su parte, la precisión de los programas de cálculo también influye en el valor final del resultado. A lo anterior, también hay que sumarle dos aspectos muy importantes y de



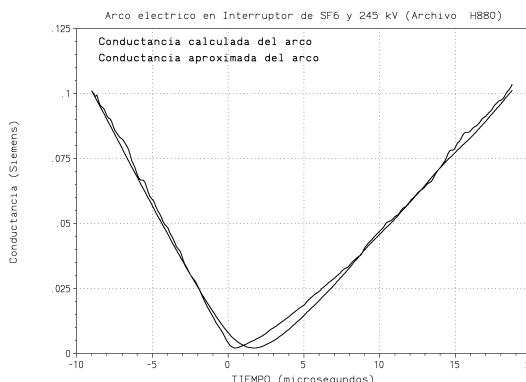
(e) dg/dt calc y aprox apertura



(f) dg/dt calc y aprox reignición



(g) G calc y aprox apertura



(h) G calc y aprox reignición

Figura N°5-30: Variables eléctricas registradas durante el ensayo.

Del análisis de la figura anterior y más precisamente de las aproximaciones que se logran tanto para la derivada de la conductancia como para la conductancia misma, se puede establecer lo apropiado del programa de cálculo utilizado, aunque las restantes posibilidades también son absolutamente válidas. Esto es, todos los programas desarrollados son aplicables a la determinación de los valores de los parámetros de las ecuaciones de Mayr y Cassie independientemente si se trata de una reignición como de una apertura o si se quiere parámetros constantes o variables o si se trata de un interruptor de 145 [kV] o de uno de 245 [kV] de tensión nominal. Debido a todas estas posibilidades, en la figura 5-30 sólo se presenta un ejemplo de los resultados posibles.

5.9.2.- ESTUDIO DE UN INTERRUPTOR DE 245 [kV] Y DISTINTAS MEZCLAS DE GASES

Continuándose con el estudio de interrupciones en 245 [kV] que se comenzara a realizar en el punto anterior, en la tabla 5-21 se presenta sólo un resumen de los valores calculados para dos aperturas exitosas. Estos valores fueron obtenidos para el modelo de Mayr seleccionando los datos entre ± 1 [μ s] alrededor del cero de tiempo y para el modelo de Cassie entre ± 4 [μ s].

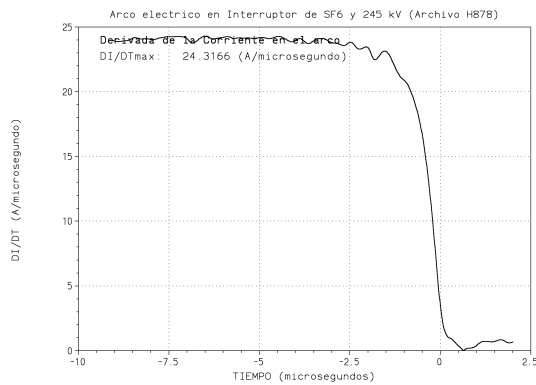
La ampliación de la zona de la reignición muestra la influencia de las ondas de tensión que llegan a los bornes del interruptor y cuyas diferencias provocan esos picos agudos que se pueden ver y que también responden a la forma general según el modelo de Mayr.

5.9.- APLICACIONES ESPECIALES

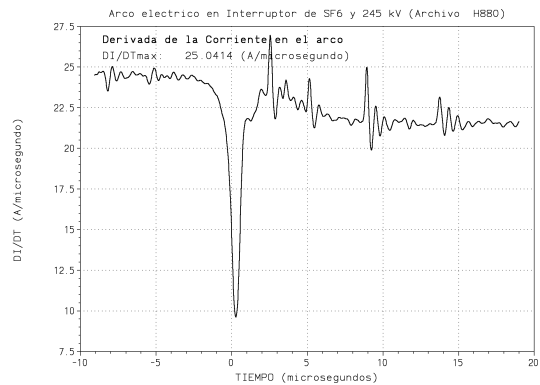
5.9.1.- ESTUDIO DE UN INTERRUPTOR DE SF6 Y 245 [KV]

Hasta el punto anterior sólo se trabajó con dos tipos de interruptores correspondientes a la misma tensión nominal, igual a 145 [kV], y que se diferenciaban por la manera de enfriar y apagar el arco eléctrico, aunque ambos son de la misma generación. En cambio en este punto se trabaja con un sólo tipo de interruptor de boquilla pero cuya tensión nominal es de 245 [kV]. La intención de este ítem es verificar el funcionamiento de la metodología aplicada para representar un arco eléctrico a una tensión superior a la utilizada en los ítems anteriores.

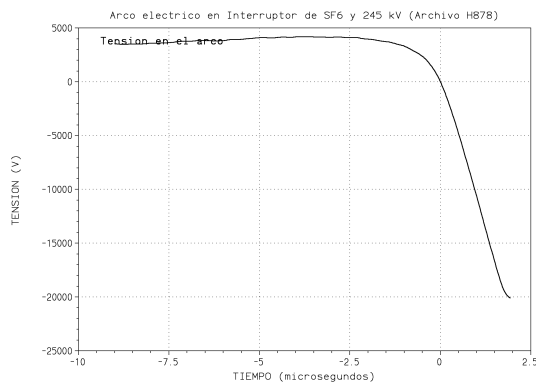
La figura 5-30 presenta sólo una parte de la salida gráfica del programa para el cálculo de los parámetros del modelo de Mayr según el Método Asturiano, ya que es el único utilizable simultáneamente a una apertura exitosa y a una reignición. En esta figura se puede apreciar el comportamiento de la derivada de la corriente y la tensión que se registran durante el ensayo sintético, junto con la aproximación que se obtiene para la derivada de la conductancia y la conductancia según el modelo de Mayr para parámetros variables.



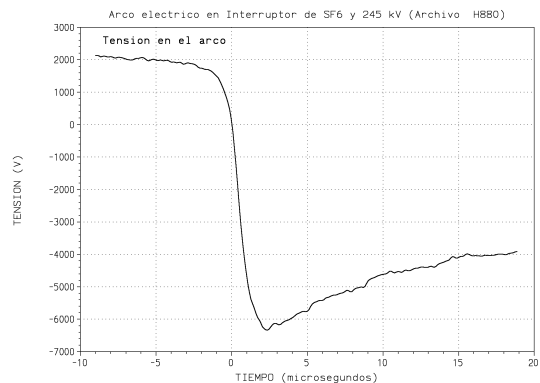
(a) di/dt apertura



(b) di/dt reignición



(c) Tensión apertura



(d) Tensión reignición

Al igual de lo que sucediera anteriormente, para simular la reignición del arco se actuó disminuyendo la potencia del modelo de Mayr.

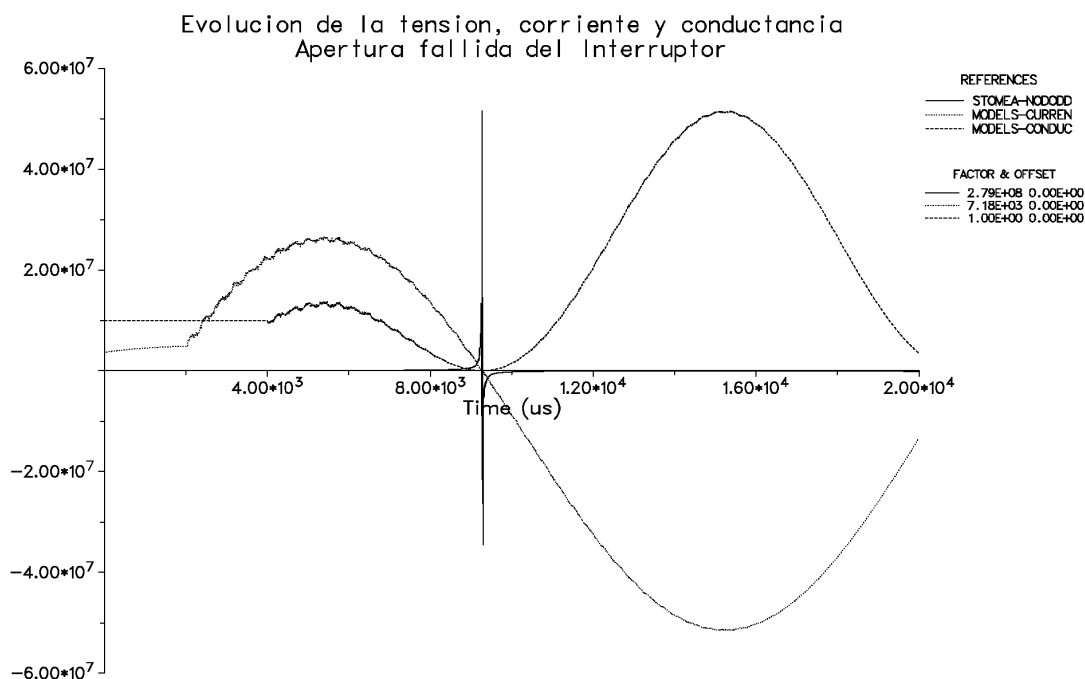


Figura N°5-28: Simulación de la apertura fallida del interruptor.

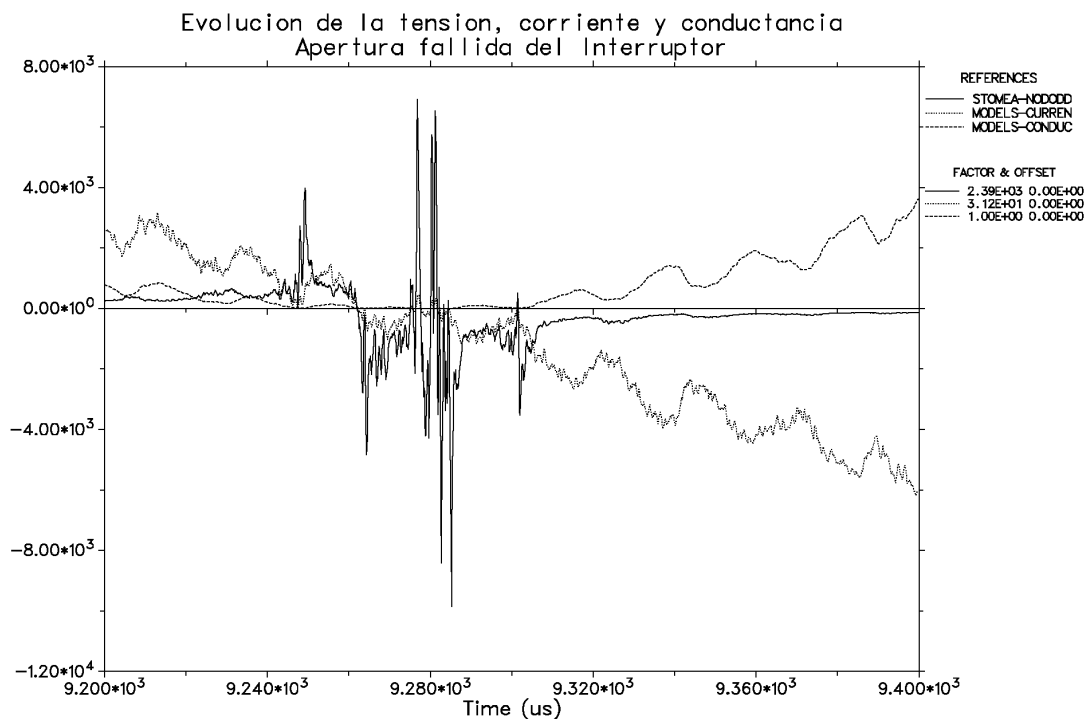


Figura N°5-29: Detalle de la apertura fallida del interruptor.

“STO”. Como puede verse con los valores normales de potencia y constante de tiempo se logra la apertura de la fase fallada.

Las curvas de la figura 5-26 están convenientemente escaladas a fin de representar en una sola figura las tres variables que se representan con línea continua la tensión, con línea a puntos la corriente y con trazos la conductancia. Como comentario de la figura se aclara que la rápida variación de la tensión del arco luego de la apertura surge como la diferencia aplicada en bornes del interruptor de las innumerables ondas de tensión incidentes y reflejadas que circulan por el circuito a partir de la aparición de la falla. Lo anterior fue verificado con la actuación de un interruptor ideal en vez del modelo de arco eléctrico, con lo cual se han obtenido las mismas variaciones de tensión sobre el interruptor.

La figura 5-27 presenta un detalle de la zona donde se obtiene la apertura definitiva del arco eléctrico.

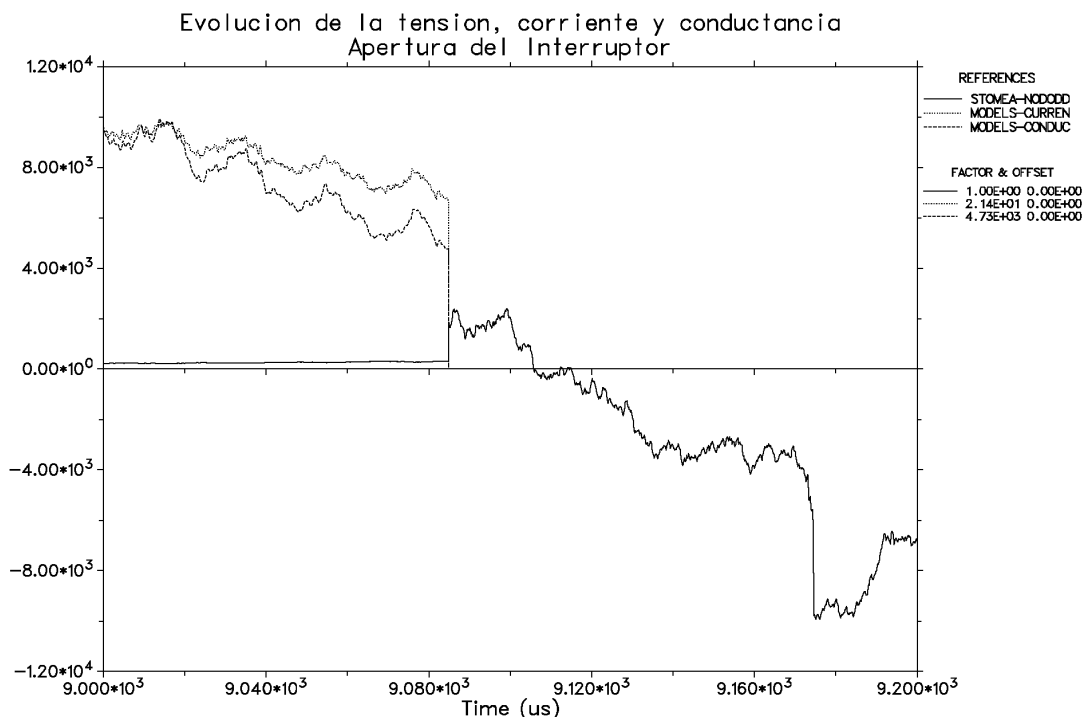


Figura N°5-27: Detalle de la apertura exitosa del interruptor.

Para ejemplificar sobre la evolución de las variables eléctricas del interruptor para el caso de la no apertura del circuito, se presentan las figuras 5-28 y 5 -29; las cuales nuevamente muestran la utilidad del empleo de modelos de arco para representar reigniciones de los interruptores. En ambas, todas las variables se encuentran convenientemente escaladas con los factores que se muestran en la parte superior derecha de cada figura.

Comparando el comportamiento de la tensión en línea continua en la figura 5-28, se podrá comprobar su forma idéntica con la figura 4-5 donde se mostraba el comportamiento de la tensión según el modelo de Mayr con parámetros constantes. Esto avala el buen comportamiento de este modelo en situaciones reales aunque el resto de los modelos se comportan de igual manera.

- ▷ Existen dos cables subterráneos: “XLPE” y “OF” entre “SFEO” y “CALC2” y “CALC1” y ambos con 5,94 [km] y 4,9 [km] respectivamente, también en 132 [kV].
- ▷ Los dos transformadores de la Estación Transformadora “Santa Fe Oeste” están modelados como elementos resistivos e inductivos mutuamente acoplados – elementos tipo 51, 52 y 53 - a través de la subrutina “BCTRAN” propia del ATP.
- ▷ Los reactores de neutro, son ramas mutuamente acopladas, al igual que los trafos anteriores.
- ▷ Las fuentes son senoidales tipo 14 y el ángulo de desfase entre cada una de ellas es fruto de la utilización previa de un programa para el cálculo del flujo de carga del sistema representado.
- ▷ Las impedancias de las fuentes son representadas empleando inductancias puras despreciando la componente resistiva.
- ▷ Todas las cargas están representadas usando ramas “RL” según puede verse en la figura, independientemente del nivel de tensión que se trate: 13,8 [kV] o 132 [kV].
- ▷ También existen tres watímetros que sirven para calcular la energía aportada el sistema por cada una de las tres fuentes.

La secuencia fue, primero la de calcular los ángulos de desfase de las fuentes para representar lo que sucede en la realidad y a partir de estos realizar la falla en la fase “R” de la línea “STOME-SFEO” para luego ordenar la operación del interruptor.

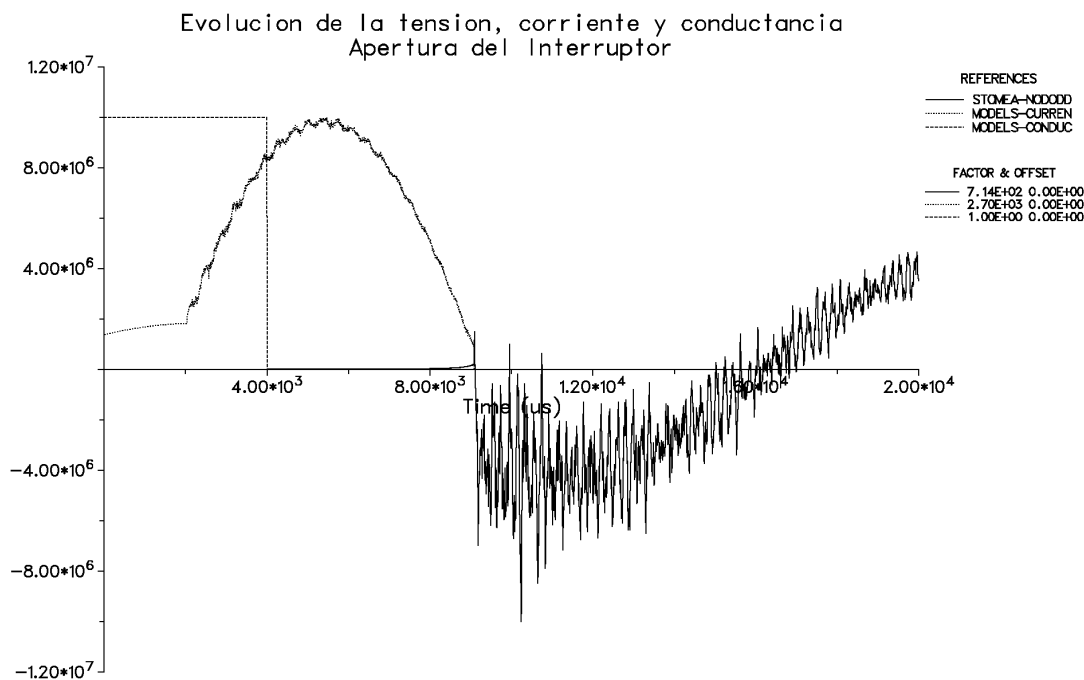


Figura N°5-26: Simulación de la apertura exitosa del interruptor.

La figura anterior representa la evolución de la tensión, la corriente y la conductancia del arco eléctrico que se forma dentro del interruptor que está entre la barra “STOME” y

franca monofásica a tierra sobre la misma línea que una “STOME” con “SFEO” a 132 [kV] de tensión nominal.

El empleo del modelo de Mayr es sólo un ejemplo pudiéndose escoger cualquier modelo de los estudiados y los valores de los parámetros empleados responden a los calculados anteriormente.

El sentido de realizar estas simulaciones es sólo el de demostrar la utilidad y aplicabilidad de lo anteriormente desarrollado en un circuito real aunque aquí no se esté realizando un estudio en particular; quedando esto para futuras ampliaciones del trabajo.

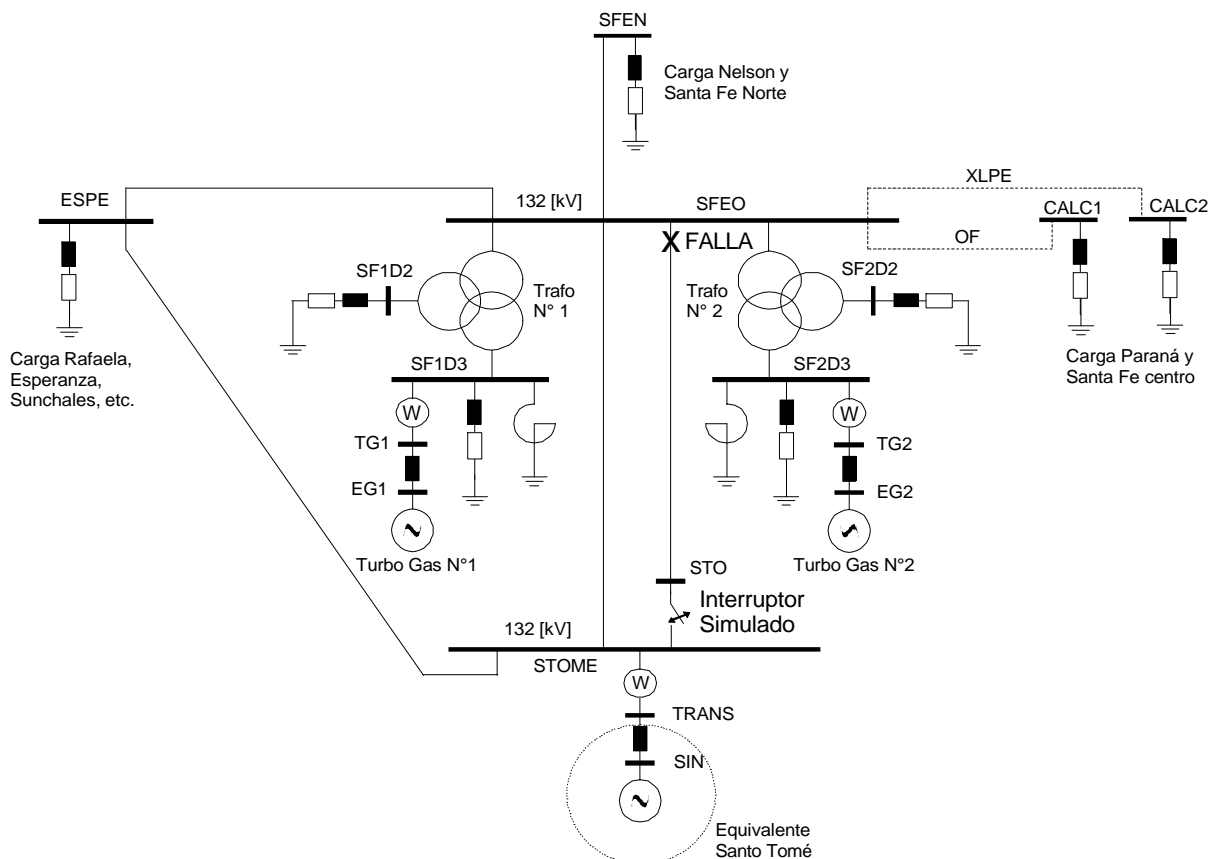


Figura N°5-25: Circuito utilizado en las simulaciones.

El circuito utilizado en las simulaciones responde al circuito real que abastece la ciudad de Santa Fe y ciudades cercanas – Paraná, Nelson, Rafaela, Esperanza, etc. – en la parte central de la provincia de Santa Fe, Argentina. El mismo tiene aporte de energía a través de dos turbinas a gas y de una conexión al Sistema Interconectado Nacional (SIN) en la barra “STOME”.

Algunas características de los modelos utilizados para simular el circuito de la figura 5-25 son:

- ▷ La línea aérea de Alta Tensión (LAT) de “STOME” a “ESPE” de 23,2 [km] de longitud está simulada con parámetros distribuidos constantes y no tiene transposición. Lo mismo ocurre con la LAT “ESPE” a “STOME” de 27,9 [km] y con la de “SFEO” a “SFEN” de 8,9 [km]. Todas las anteriores de 132 [kV].
- ▷ La doble terna de “STOME” a “SFEO”, con 12,8 [km] y 13,1 [km] cada una, está simulada con parámetros distribuidos constantes y transpuesta.

arriba hacia abajo: la curva superior es el modelo de Mayr con parámetros constantes, un poco más abajo se encuentra el Mayr variable, luego el Cassie constante, el Cassie variable, la medición y por último la simulación del modelo combinado.

Dejando de lado el modelo de Cassie constante, que es aquel que equivocadamente simula una reignición, el resto de las simulaciones fueron capaces de representar la apertura del interruptor. Como sucediera también en el caso de la reignición, los modelos con parámetros constantes son los que tienen una aproximación más pobre con los datos reales: el Cassie constante presenta una reignición, el Mayr constante es el que da valores antes del cero más grandes que los reales y luego de la apertura presenta una loma que dura un par de microsegundos, mientras que el modelo combinado da valores por debajo del resto y de la medición real. Por su parte los resultados de las simulaciones empleando modelos con parámetros variables son prácticamente iguales a los datos registrados: el de Mayr presenta un breve alejamiento antes del cero de tiempo y el de Cassie se superpone en varias ocasiones con los datos reales para el tiempo mostrado.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se ha elaborado la tabla siguiente en donde se trató de valorar la calidad de las simulaciones como sigue: a la peor aproximación se le asigna sólo un signo “+”, a la que le sigue dos signos y así hasta la mejor de todas, a la cual se le asignan cinco signos.

CALIDAD DE LAS SIMULACIONES			
MODELO	REIGNICIÓN	APERTURA	TOTAL
Mayr constante	++	++	++++
Mayr variable	+++++	++++	+++++
Cassie constante	+++	+	++++
Cassie variable	++++	+++++	+++++
Combinado	+	+++	++++

Tabla N°5-20: Calidad de las simulaciones.

De la tabla anterior se desprende que si el usuario del programa de simulación no conoce de antemano si necesita simular una reignición o una apertura, el comportamiento de los modelos es similar siempre y cuando sus parámetros tengan el mismo tratamiento. En caso de utilizar parámetros variables, se mantiene la igualdad en la calidad del comportamiento de los modelos. Si el usuario ya conoce cual es comportamiento del arco, la tabla anterior servirá de ayuda para la elección del modelo y del tratamiento de parámetros más adecuado.

5.8.- APLICACIONES PRÁCTICAS

En este ítem solo se ofrece una demostración de la utilidad del empleo de los modelos de arco eléctricos que fueron estudiados anteriormente en el estudio de cualquier situación relacionada con el funcionamiento de un sistema de transmisión y/o distribución. Para esto se presenta en la figura 5-25 un circuito eléctrico real en donde se ha simulado la operación de un interruptor de SF6 con el modelo de Mayr y parámetros constantes; para despejar una falla

parámetros calculados, todos los modelos fueron capaces de representar la reigñición del oscilograma estudiado.

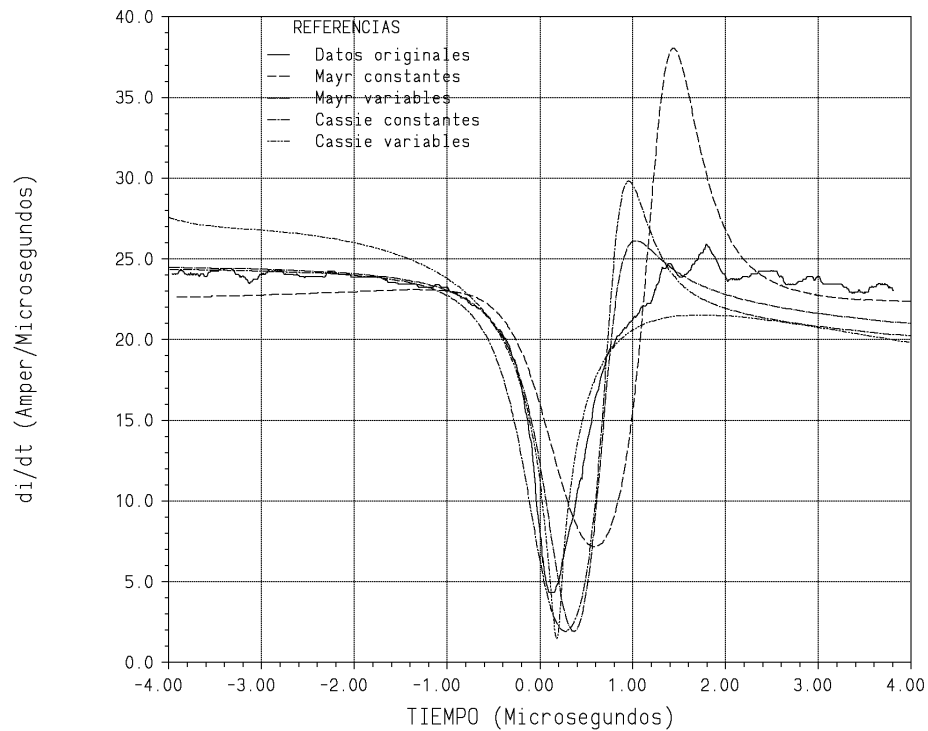


Figura N°5-23: Comparación entre modelos para simular una reigñición.

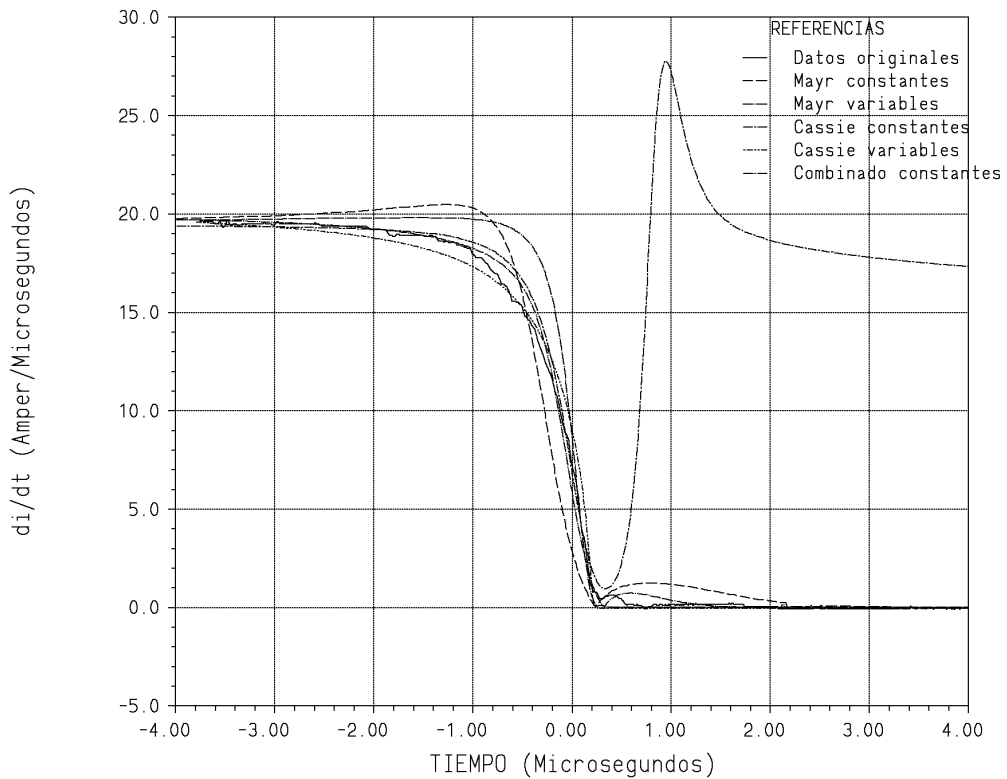


Figura N°5-24: Comparación entre modelos para simular una apertura

Aclarando un poco la figura anterior, que agrupa el comportamiento de los modelos en estudio para simular una apertura exitosa, se tiene que para un tiempo igual a $-1 [\mu s]$ y de

empleo del modelo de Cassie también puede incluir el período de baja corriente para el caso de una reignición.

La representación se ha obtenido usando los siguientes valores de los parámetros: $A_p = 193166$, $B_p = 0,618439$, $A_q = 18,4157$ y $B_q = 0,656144$, que responden al cálculo realizado con el Método Asturiano.

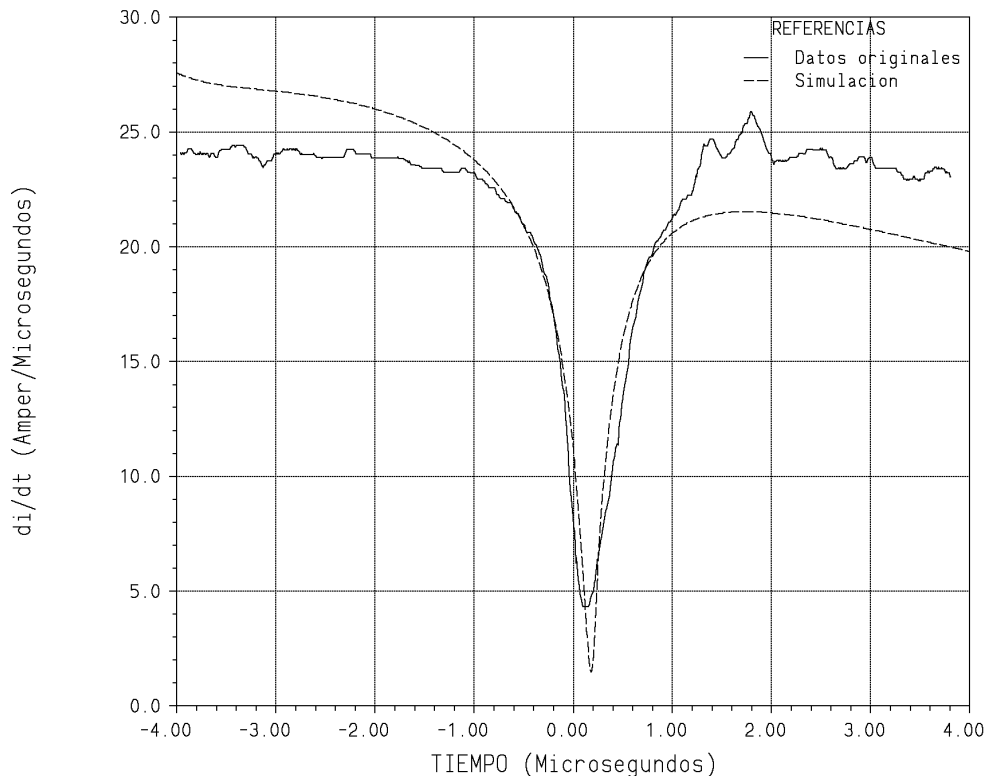


Figura N°5-22: Simulación de una reignición usando el modelo de Cassie con parámetros variables.

5.7.- RESUMEN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MODELOS

En la figura 5-23, se presenta una comparación del funcionamiento de los modelos estudiados para simular el oscilograma D2-P817, excepto la curva que corresponde al modelo combinado ya que, por asumir valores más grandes que el resto: el pico luego del cero supera el valor 50 de ordenada, distorsionaba la figura y ésta perdía calidad en la representación de la reignición.

Analizando dicha figura es posible determinar un orden de mérito entre los modelos, a saber: el modelo de Mayr con parámetros constantes es el que presenta mayores divergencias respecto de la medición, luego lo sigue el de Cassie con parámetros constantes. Los modelos con parámetros variables son los que mejor logran representar las mediciones y de entre ellos, es el modelo de Mayr el que mejor se aproxima a los datos reales. Como se mencionara en el párrafo anterior, el modelo combinado fue el de peor comportamiento.

De la figura también se concluye que los picos que tienen los modelos para luego del momento de la reignición, es posible reducirlos empleando parámetros variables con la conductancia. También hay que decir que, habiendo utilizado estrictamente los valores de los

5.6.3.2.1.- Utilizando el modelo de Mayr

Los valores de los parámetros en esta simulación fueron: $A_p = 12001900$, $B_p = 0,984826$, $A_q = 4,35189$ y $B_q = 0,403691$, y responden estrictamente a los valores calculados según el Método Asturiano.

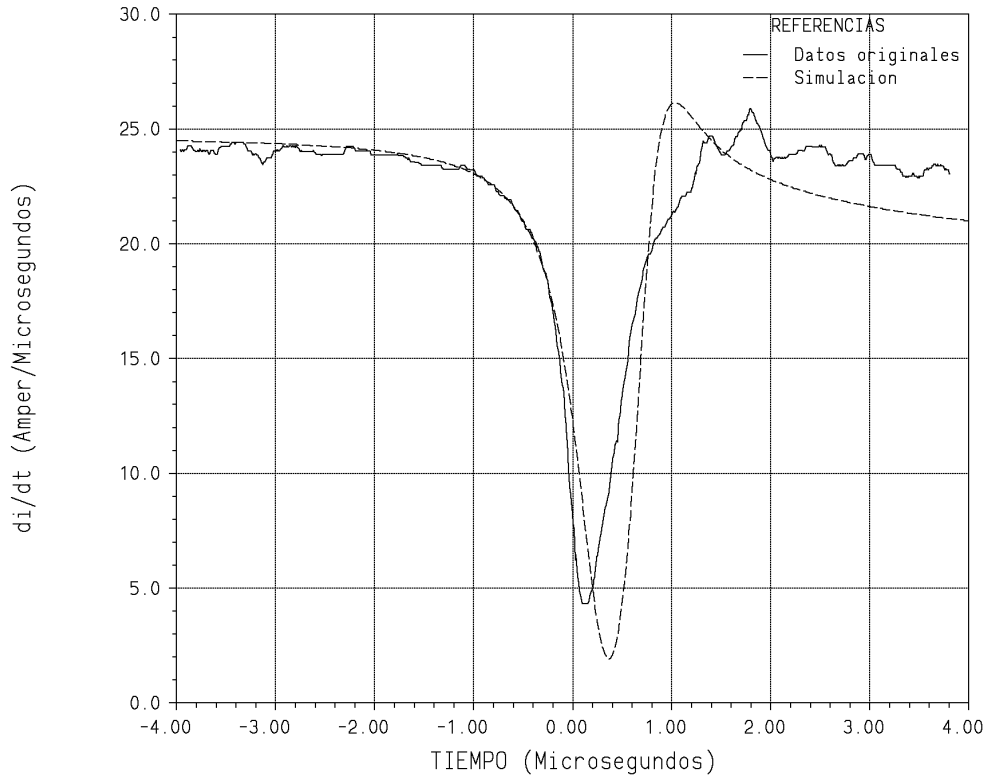


Figura N°5-21: Simulación de una reignición usando el modelo de Mayr con parámetros variables.

La utilización del modelo de Mayr con parámetros variables para simular una reignición, muestra un muy buen comportamiento a la hora de representar los valores medidos durante el ensayo real. Las formas generales de ambas curvas son similares entre sí y se observa una pequeña falta de sincronismo entre los valores mínimos, fruto de la superposición en el mismo dibujo de curvas de distintos orígenes y no del valor de los parámetros o del funcionamiento del modelo. Ya en la parte final de la simulación, para tiempos superiores a 0,5 [μ s], la calidad de la representación es menor pero siempre se mantiene muy próximo a los valores reales, con lo cual el modelo de Mayr con parámetros variables funciona excelentemente para el caso de ser utilizado en una reignición.

5.6.3.2.2.- Utilizando el modelo de Cassie

En la utilización del modelo de Cassie, siempre hay que tener en cuenta que la mejor región para su aplicación es la de alta corriente y no precisamente la que se está tratando de representar aquí. Por otra parte, al utilizar los parámetros de la ecuación como variables con la conductancia, se está intentando mejorar su calidad de representación en la zona de aplicación del modelo, es decir afuera de los límites de la figura, en detrimento de la calidad de la simulación para el período de corriente cero. A pesar de lo anterior, y muy por el contrario de lo que se hubiese podido esperar antes de realizar la simulación, la representación de las mediciones para el intervalo de tiempo entre ± 1 [μ s], resulta excelente con lo cual el rango de

Del análisis de la figura se puede concluir la muy buena aproximación que logra la simulación con respecto a los valores reales, sobre todo en el instante próximo a la anulación de la corriente. Para este caso si se hubiera aumentado muy poco el valor Aq , que gobierna la constante de tiempo del modelo, se hubiera obtenido una mejor aproximación para el pico situado un instante antes del tiempo cero, pero la simulación responde a los valores calculados.

5.6.3.1.2.- Utilizando el modelo de Cassie

De la observación de la figura 5-20, que muestra el comportamiento del modelo de Cassie para simular la derivada de la corriente registrada, se puede concluir la excelente metodología utilizada para el cálculo de los parámetros como así también la calidad del modelo para simular el evento en estudio. Para esta simulación, los valores de los parámetros calculados y utilizados fueron: $A_p = 16127,2$, $B_p = 0,331602^{-9}$, $A_q = 44,1962$ y $B_q = 0,698652$.

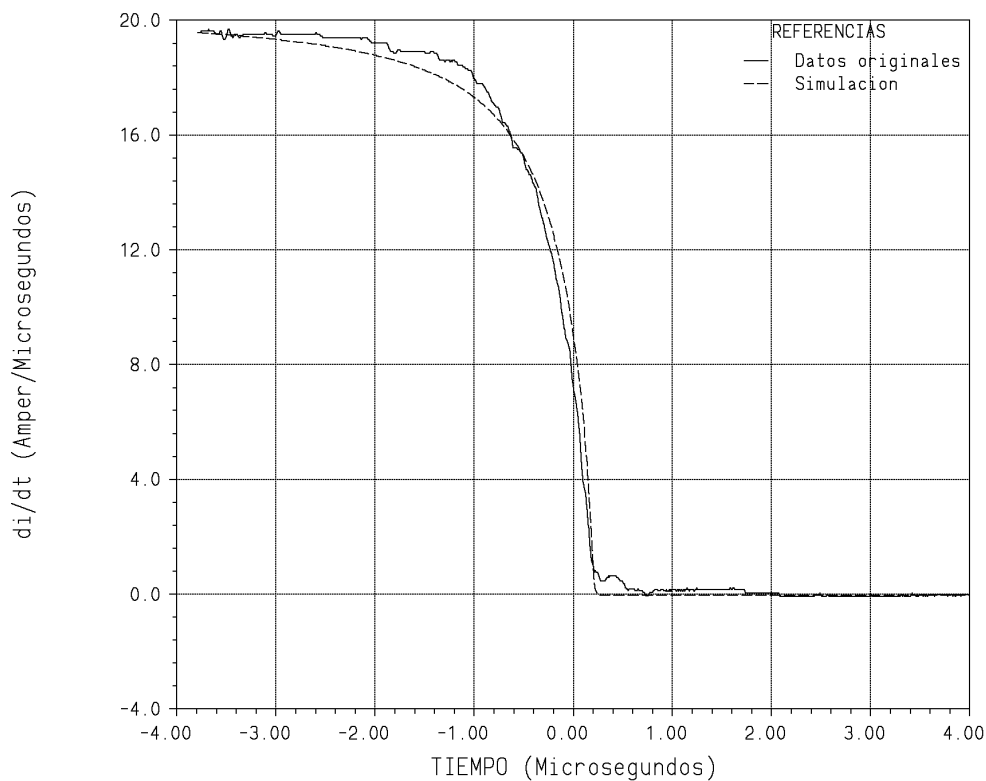


Figura N°5-20: Simulación de una apertura usando el modelo de Cassie con parámetros variables.

5.6.3.2.- SIMULACIÓN DE UNA REIGNICIÓN

Nuevamente aquí se compara la derivada de la corriente registrada durante el oscilograma D2-P817, que puede verse en la figura 5-2, con los resultados dados por los modelos en estudio. Cabe aclarar que la elección de este oscilograma no responde a ninguna cuestión en particular y hubiera podido ser cualquiera donde esté presente la reignición del arco eléctrico.

5.6.3.- SIMULACIONES EMPLEANDO PARÁMETROS VARIABLES

Para las simulaciones con parámetros variables se han mantenido los valores del circuito eléctrico asociado al ensayo igual que el ítem anterior, y el funcionamiento de los modelos matemáticos también responde a lo ya explicado. Con lo cual aquí sólo se representará un breve tiempo de 8 microsegundos alrededor del paso por cero de la corriente. Por otra parte, los valores de los parámetros de los modelos matemáticos (A_p , B_p , A_q y B_q) responden estrictamente a los cálculos realizados y se mantienen de esta forma independientemente del resultado de la simulación. Si bien el instante que se trata de representar mejor es el centro de la figura, existe la posibilidad de cometer un pequeño error de sincronismo entre las curvas fruto del origen distinto de las mismas, pero en ningún caso es superior a un cuarto de microsegundo.

5.6.3.1.- SIMULACIÓN DE UNA APERTURA

Al igual de lo ocurrido para el caso estudiado de parámetros constantes, aquí el oscilograma a reproducir es el D1-P4949, que se mostró en la figura 5-1. Por otra parte, los valores de los parámetros usados para las simulaciones resultan del empleo del Método Asturiano de cálculo

5.6.3.1.1.- Utilizando el modelo de Mayr

En la figura siguiente se puede observar el comportamiento del modelo de Mayr con parámetros variables con la conductancia, en la representación de una apertura de un interruptor, con los siguientes valores de parámetros: $A_p = 2192130$, $B_p = 0,718828$, $A_q = 2,37719$ y $B_q = 0,329407$.

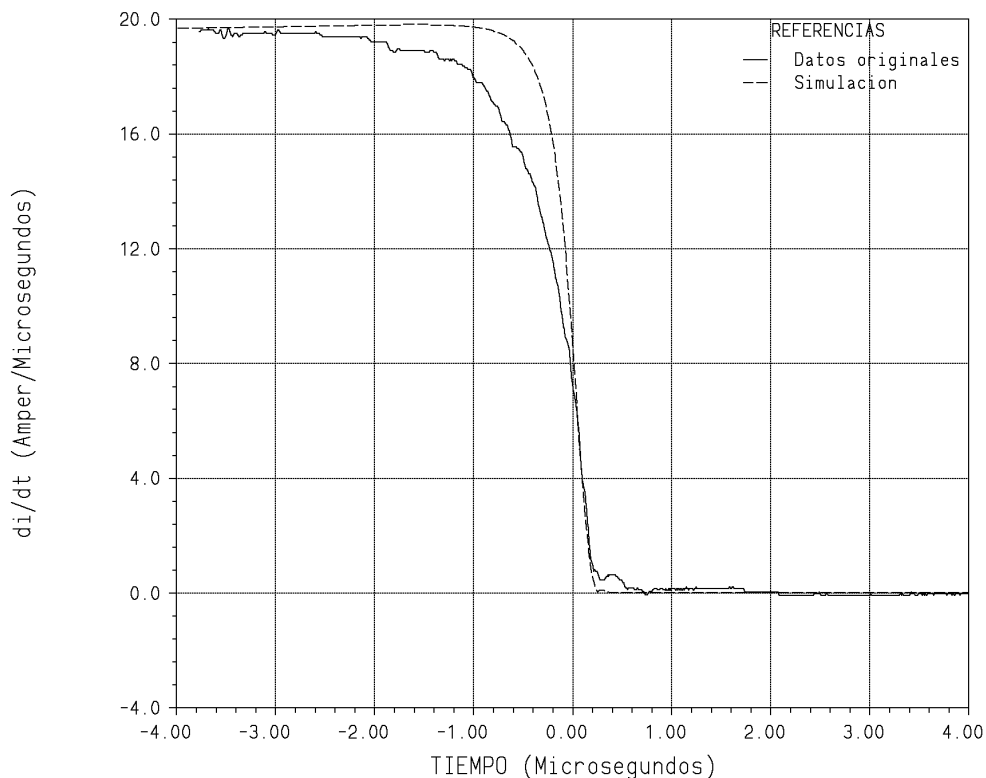


Figura N°5-19: Simulación de una apertura usando el modelo de Mayr con parámetros variables.

5.6.2.2.3.- Utilizando el modelo combinado

El resultado de la simulación empleando el modelo de arco combinado Mayr + Cassie puede verse en la figura siguiente y para su análisis la dividiremos a partir del cero de tiempo. Para tiempos negativos se logró una muy buena coincidencia entre los valores de cálculo con los medidos; en cambio, para tiempos positivos la calidad de la representación del evento no es buena aunque la forma general de la evolución de la simulación responde al comportamiento de los modelos vistos anteriormente.

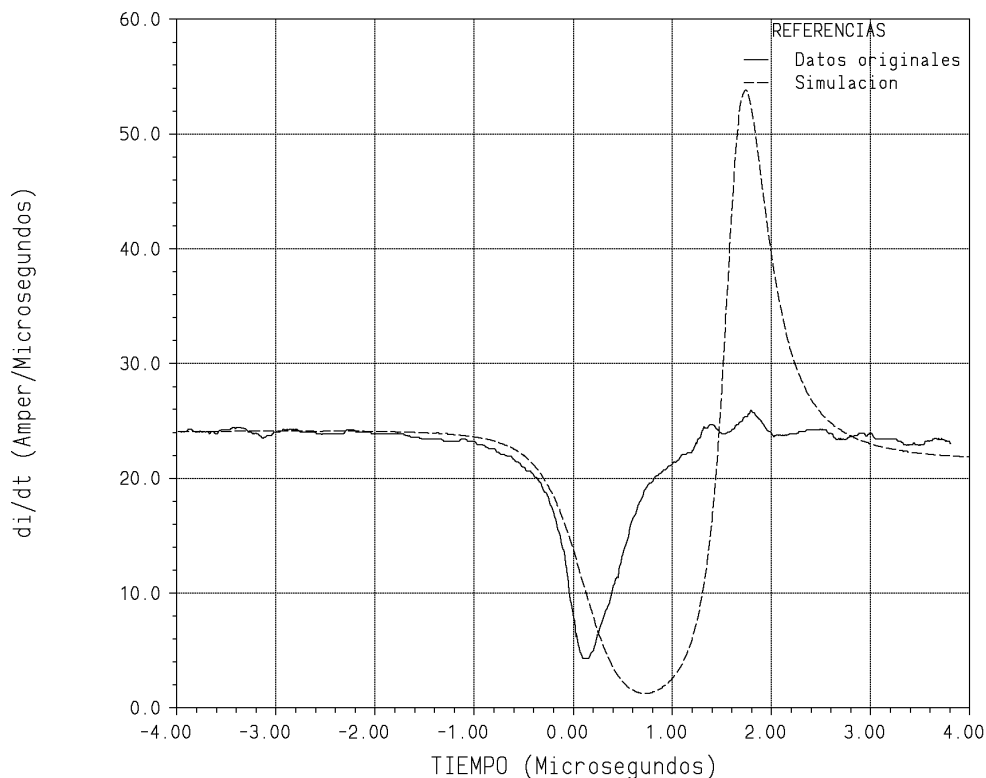


Figura N°5-18: Simulación de una reignición usando el modelo combinado con parámetros constantes.

Si bien los valores de los parámetros que han sido utilizados en ($P_o = 32$ [kW], $Q_{mayr} = 0,34$ [μ s], $U_o = 1980$ [V] y $Q_{cassie} = 1,3$ [μ s]) pueden ser modificados para acercarse más a los valores reales, una disminución de las constantes de tiempos provocará un acercamiento de los valores mínimos de derivada de conductancia pero incrementará la magnitud y agudeza del pico existente para tiempos positivos. Si, por otra parte, se decide actuar sobre P_o o U_o , habrá que combinar de forma eficiente ambos valores para lograr obtener una mejora en la simulación que siempre es posible.

Resumiendo, con algunas consideraciones respecto a la calidad de la simulación para después del cero de tiempo, el modelo de arco representado como una combinación de los modelos de Mayr y de Cassie, fue capaz de reproducir la reignición del arco en el ensayo simulado.

5.6.2.2.2.- Utilizando el modelo de Cassie

En la figura siguiente se puede observar la forma de la evolución general de la derivada de la corriente obtenida debido al uso del modelo de Cassie para representar la región próxima al cero de corriente. Debido a la combinación de la característica del modelo, que es más apropiado para simular regiones de alta corriente y de la región a partir de la cual se han calculado los valores de los parámetros, ± 4 [μ s], no sería descabellado suponer la ineficacia del modelo para representar tiempos próximos al cero. No obstante, hasta $+0,5$ [μ s] los resultados de la simulación son prácticamente los mismos que los registrados presentándose una divergencia para 1 [μ s] al igual que en el caso anterior y originada exclusivamente en el comportamiento del modelo y no en los valores de los parámetros utilizados para el cálculo que fueron: $U_0 = 3456$ [V] y $Q = 0,394$ [μ s]. Aumentando progresivamente el valor de la constante de tiempo y en muy pequeño valor, es posible mejorar la calidad de la simulación ya que el valor mínimo se eleva mientras que se suaviza el pico de la simulación.

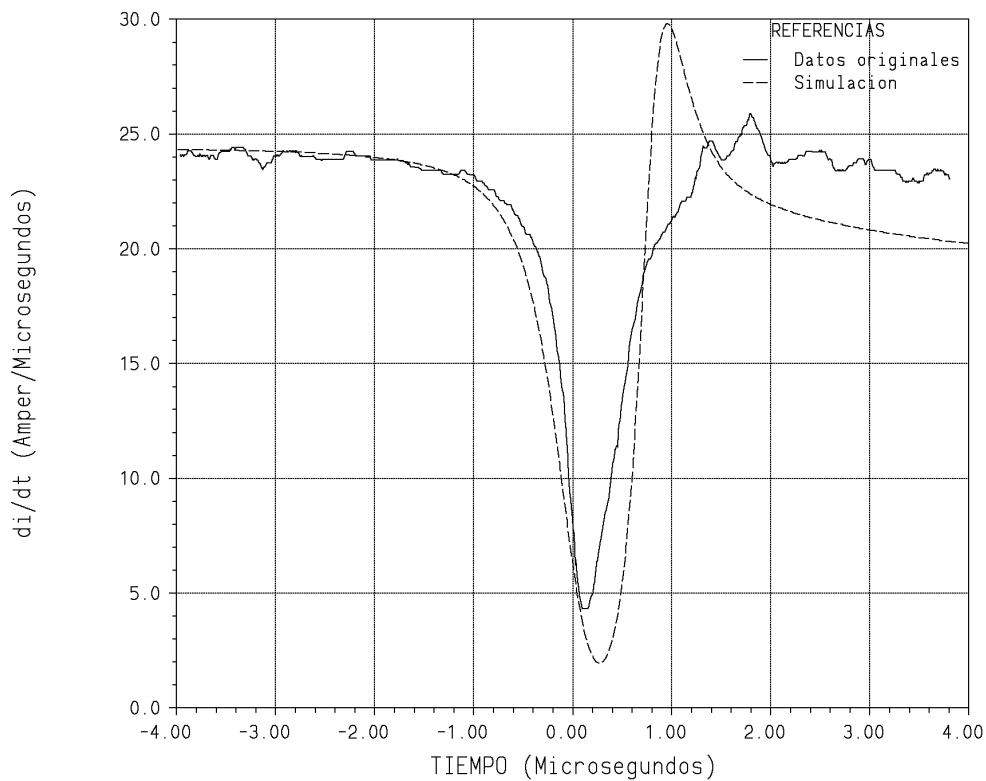


Figura N°5-17: Simulación de una reignición usando el modelo de Cassie con parámetros constantes.

Finalmente, el modelo de Cassie empleado con parámetros constantes también fue capaz de reproducir el ensayo con reignición.

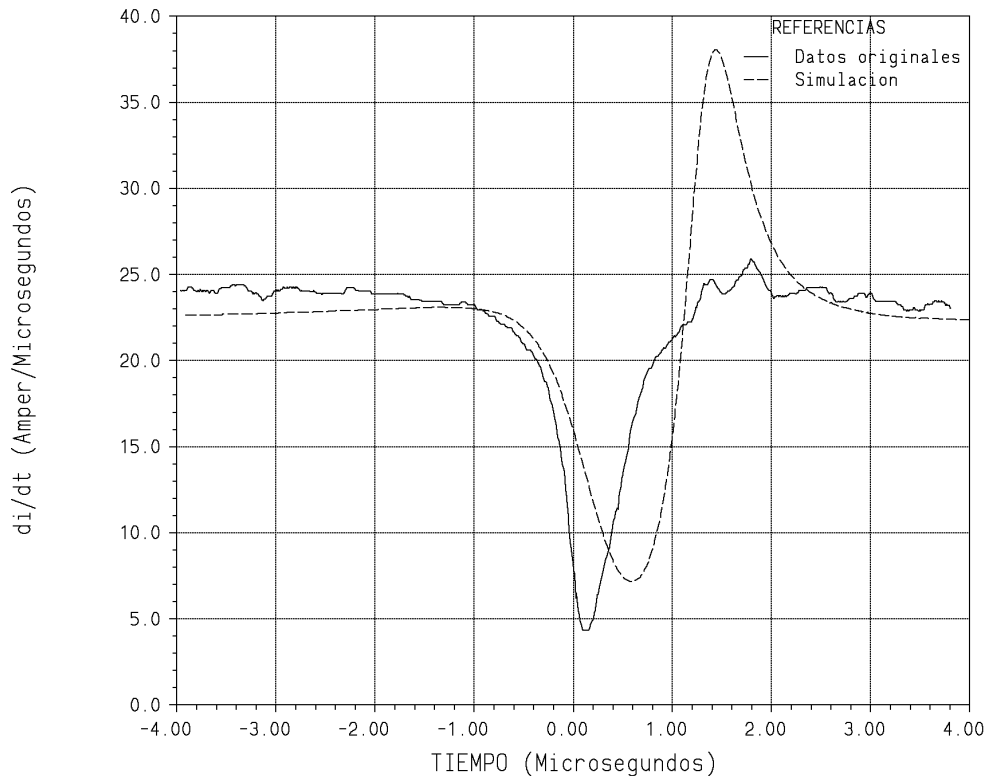


Figura N°5-16: Simulación de una reignición usando el modelo de Mayr con parámetros constantes.

El análisis de la figura anterior se realizará partiendo la simulación en tres partes. La primera de ellas es desde -4 hasta -1 [μ s] antes del cero de corriente. Aquí el comportamiento del modelo es opuesto al del registro en el sentido de que, mientras los valores registrados de derivada de corriente van en disminución, el resultado de la simulación va en aumento. Este incremento en los valores de la simulación con su aproximación al cero de tiempo es una característica propia del modelo de Mayr. La segunda parte, entre ± 1 [μ s], la simulación ya se aleja un poco más de los valores registrados pero la reignición se presenta de igual manera sólo que medio microsegundo después que el real. Por último, en la tercera parte, que va a partir de 1 [μ s] el resultado de la simulación se aleja notoriamente de los reales, sobre todo en la primera parte en donde se obtiene un pico en la forma de origen exclusivo al comportamiento del modelo con los valores de los parámetros calculados.

Jugando adecuadamente con los valores de los parámetros es posible acercar los valores mínimos, empleando una constante de tiempo de valor inferior a la utilizada pero esto trae como consecuencia que el pico posterior a la reignición crece mucho más de lo que los mínimos se acercan. Por otra parte, hay que tener presente que los valores empleados de los parámetros sólo son aplicables en la región a partir de la cual fueron calculados, es decir, para la parte central entre ± 1 [μ s]. También hay que tener en cuenta la existencia, tal vez, de falta de sincronismo entre las curvas fruto del origen distinto de ellas y que ya fuera mencionado oportunamente.

A pesar de la diversidad de los criterios que se puedan obtener del análisis anterior y del propio resultado de la simulación, el modelo de Mayr utilizado con parámetros constantes fue capaz de reproducir la reignición registrada en el oscilograma D2-P817.

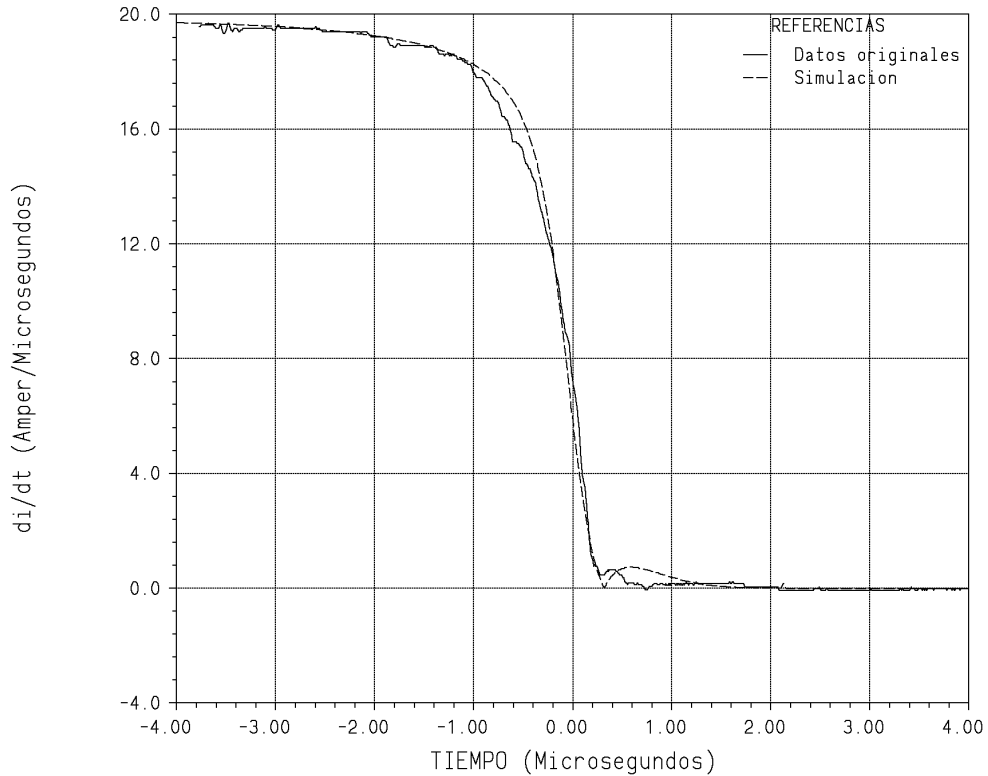


Figura N°5-15: Simulación de una apertura usando el modelo combinado con parámetros constantes.

Para realizar esta simulación se utilizaron los siguientes valores de parámetros: $P_o = 17,8$ [kW], $Q_{mayr} = 0,22$ [μ s], $U_o = 3620$ [V] y $Q_{cassie} = 1,3$ [μ s], con lo cual se obtuvo la excelente aproximación mostrada anteriormente. Por lo tanto, el modelo combinado para representar la apertura del arco eléctrico resulta muy adecuado.

5.6.2.2.- SIMULACIÓN DE UNA REIGNICIÓN

Para este caso, de estudio de una reignición, se trata de reproducir la derivada de la corriente del oscilograma D2-P817, que se mostró en la figura 5-2, y que aquí también se reproduce junto a la simulación.

5.6.2.2.1.- Utilizando el modelo de Mayr

Para esta simulación los valores de los parámetros de la ecuación de Mayr fueron: $P_o = 39,8$ [kW] y $Q = 0,348$ [μ s], valores obtenidos según el Método Asturiano de cálculo aplicado entre ± 1 [μ s].

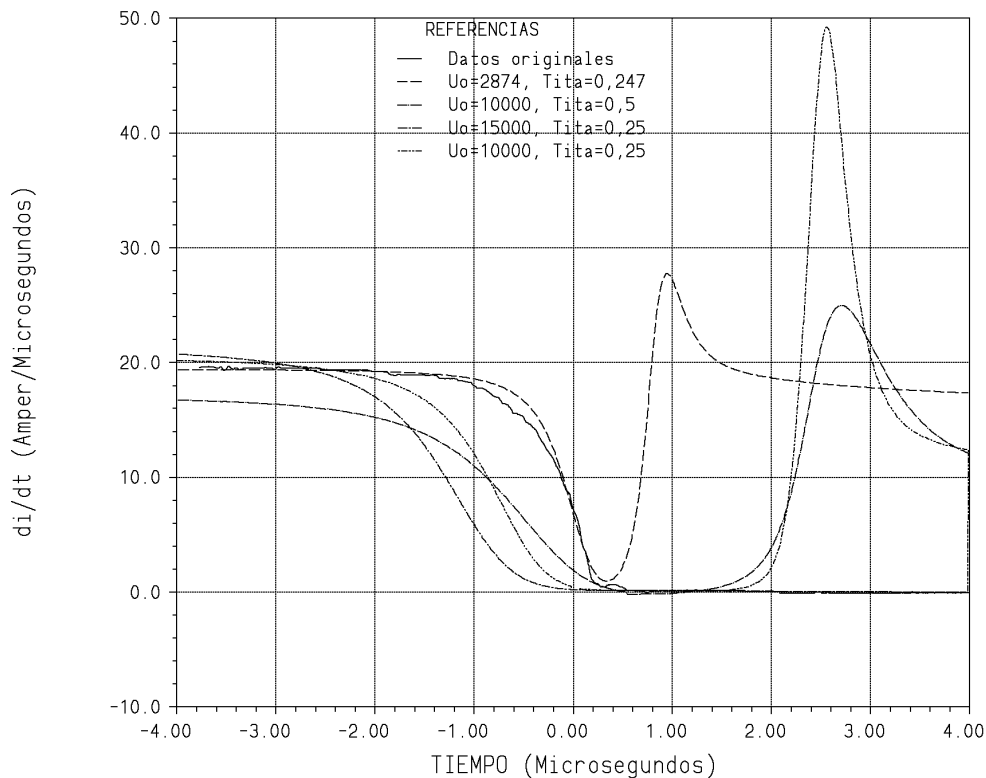


Figura N°5-14: Simulaciones variando los parámetros del modelo de Cassie con parámetros constantes.

De todo lo anterior surge que para la correcta utilización del modelo de Cassie con parámetros constantes para representar una apertura de un interruptor, hay que actuar de manera combinada sobre los valores de los parámetros calculados en busca de la mejor representación del evento. Teniendo en cuenta que una constante de tiempo menor estrecha y aumenta el pico luego de tiempo cero y aumentando la magnitud de la tensión se puede llegar a modificar una reignición por una apertura.

Por lo tanto, el comportamiento del modelo para este caso es discutible ya que se está tratando de emplear a un modelo matemático que es más apto para el período de elevadas corrientes y lejos del cero de tiempo, para representar el momento o no de la reignición que justamente es cuando la corriente se anula por completo, aunque sea por sólo un instante. Además hay que tener en cuenta que los valores calculados de los parámetros del modelo, han sido realizados con todos los datos disponibles, es decir entre ± 4 [μ s].

5.6.2.1.3.- Utilizando el modelo combinado

La utilización del modelo combinado para simular la apertura del interruptor ensayado muestra una muy buena aproximación entre los valores de la derivada de la corriente calculados con los registrados y puede verse en la figura posterior.

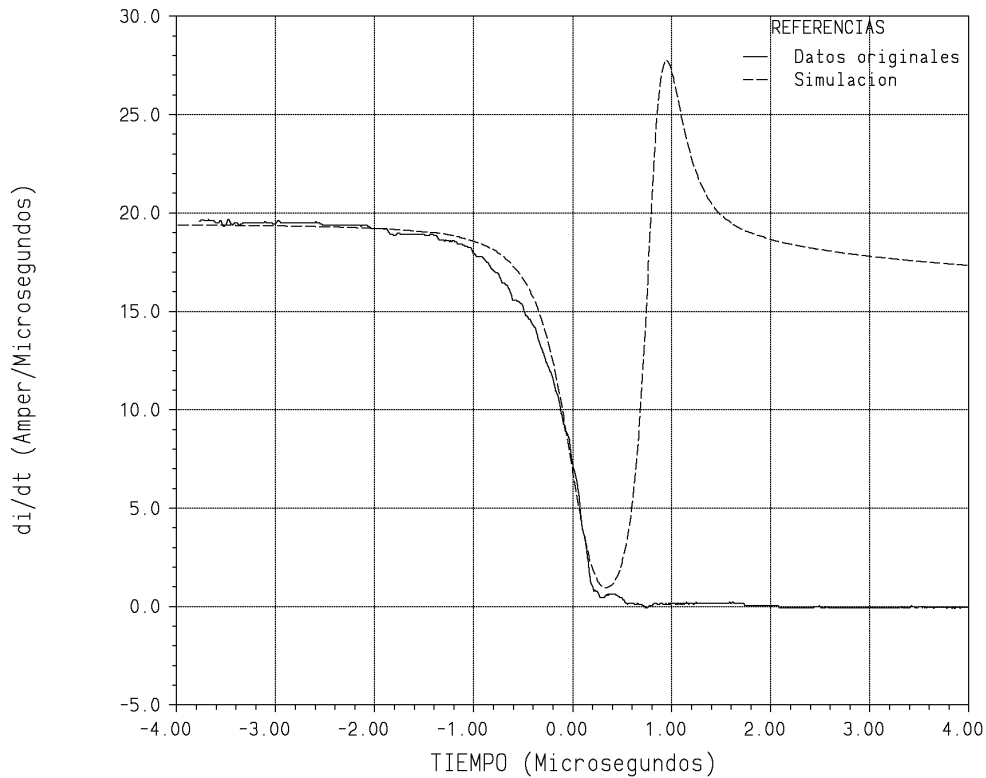


Figura N°5-13: Simulación de una apertura usando el modelo de Cassie con parámetros constantes.

Para lograr un mejor resultado, se trató de modificar los valores calculados de los parámetros para tratar de representar convenientemente la apertura del interruptor, por eso se presenta la figura siguiente en la cual se superponen cuatro simulaciones más la curva real registrada.

Para la primera simulación ($U_o = 2872$ y $Q = 0,247 \text{ } [\mu s]$, representada por una línea a trazos) se volvieron a calcular los valores de los parámetros pero esta vez ente $\pm 1 \text{ } [\mu s]$; resultando que se mantuvo en líneas generales el mismo comportamiento de la simulación. Por otra parte, se puede demostrar que, si se disminuye el valor de la constante de tiempo, el único efecto que se logra es el de agudizar el pico posterior a tiempo cero y agrandar su valor; con lo cual hay que actuar también sobre el valor de U_o . Aumentando el valor de U_o hasta 10000 [V] y el de Q hasta $0,5 \text{ } [\mu s]$, es posible simular la apertura del interruptor pero el resultado de la simulación se aleja de la medición.

Si se sigue aumentando el valor de U_o hasta 15000 [V] y se disminuye Q hasta $0,25 \text{ } [\mu s]$, se obtendrá nuevamente una reignición del arco pero ésta vez en un tiempo posterior que para los valores originales, mientras que la magnitud del pico es similar. Por último, en línea de trazos con doble punto, se muestra la simulación utilizando 10000 [V] para la tensión y $0,25 \text{ } [\mu s]$ para la constante de tiempo.

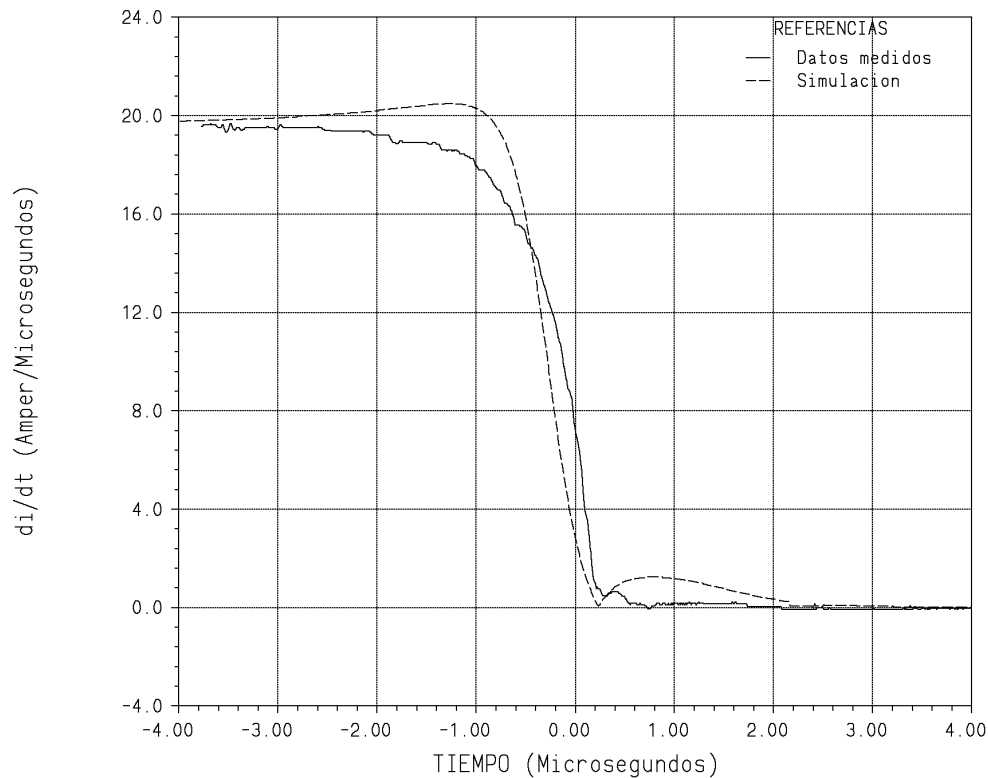


Figura N°5-12: Simulación de una apertura usando el modelo de Mayr con parámetros constantes.

Si se tiene en cuenta dos aspectos: que los valores de los parámetros fueron calculados para el intervalo de tiempo comprendido desde -1 [μs] hasta $+1$ [μs] y es aquí donde son más representativos, y segundo la buena representación de la apertura mostrada en la figura anterior que se logra al usar estrictamente los valores de los parámetros calculados, sin lugar a duda se podrá coincidir en la conveniencia de emplear el modelo de Mayr con parámetros constantes para simular la apertura de un arco eléctrico.

5.6.2.1.2.- Utilizando el modelo de Cassie

El comportamiento del modelo de Cassie para representar una apertura del interruptor con los parámetros del modelo de arco calculados como constantes en el intervalo ± 4 [μs] y a partir del oscilograma D1-P4949, puede verse en la figura siguiente.

El resultado de la simulación puede dividirse en dos partes: la primera hasta un tiempo igual a cero y la segunda, a partir de éste. Para la primera parte, tiempos negativos, la forma general de la curva de la derivada de la corriente prácticamente se superpone a la registrada con lo cual el comportamiento del modelo es excelente según puede verse. En cambio, para tiempos mayores que cero, mientras que durante el ensayo se produjo la apertura del interruptor el modelo simula una reignición del arco eléctrico. Con lo cual, el modelo de Cassie para simular este ensayo, con los valores de los parámetros: $U_o = 3456$ [V] y $Q = 0,394$ [μs] no representa el comportamiento registrado.

o reignición le corresponde al interruptor ensayado, existe un interruptor maestro que trabaja de respaldo y que no se muestra en la figura anterior.

5.6.2.- EMPLEANDO PARÁMETROS CONSTANTES

El circuito eléctrico empleado para las simulaciones responde estrictamente al utilizado durante los ensayos y que fuera presentado en el ítem anterior. Además se han incluido las capacitancias parásitas del circuito de medida. El funcionamiento de los modelos matemáticos que se mostró en el capítulo anterior, se utiliza de similar forma durante las simulaciones de todo el ensayo, aunque en realidad, a continuación sólo se presentará un breve intervalo de tiempo alrededor del paso por cero de la corriente que es el registrado en los oscilogramas que se han mostrado anteriormente.

Los valores de los parámetros empleados en cada simulación responden estrictamente a los valores determinados con los programas de cálculo y se brindan oportunamente; utilizando para el modelo de Mayr el intervalo entre ± 1 [μ s] y para el de Cassie ± 4 [μ s]. Con lo cual, en más de una ocasión no se obtendrá el mejor comportamiento de la simulación o del modelo matemático. Esta situación surge a causa de la necesidad de reproducir un solo oscilograma en particular y no el conjunto de ellos, con lo cual se generalizarían los comportamientos de los arcos registrados.

Además, hay que resaltar y tener en cuenta que aquí se apreciarán de forma inequívoca la sumatoria y/o compensación de todos los errores cometidos durante los procesos de medición, registro, impresión, fotocopiado, escaneado, digitalización, cálculo, aproximación, simulación, etc.; sumados a los propios defectos de los modelos bajo estudio. A los que hay que sumarles, según sea el caso, una pequeña falta de sincronismo entre las curvas fruto del origen distinto de las mismas; que puede llegar a ser hasta de un cuarto de microsegundo aproximadamente.

De entre las posibles variables eléctricas que se pueden utilizar para la representación del arco, se escogió comparar entre sí la derivada de la corriente ya que es éste uno de los dos valores que se registran durante el ensayo además de ser quien gobierna la existencia o no de reignición durante el ensayo.

5.6.2.1.- SIMULACIÓN DE UNA APERTURA

Para el caso de la simulación de una apertura, se escogió de manera casual el oscilograma D1-P4949 que ya se mostró en la figura 5-1.

5.6.2.1.1.- Utilizando el modelo de Mayr

La simulación empleando el modelo de Mayr con parámetros constantes para el caso de una apertura muestra una coincidencia bastante buena entre el resultado de la simulación y los valores medidos durante el ensayo. La primera parte de la simulación, antes de la reignición, posee un pico cuya existencia es debida al comportamiento del modelo y no se obtienen grandes variaciones actuando sobre los valores de los parámetros. Inmediatamente después de la anulación de la corriente, los valores que asume la simulación se apartan provisoriamente de los registrados, anulándose esta diferencia para tiempos próximos a $+2$ [μ s].

Los valores de los parámetros de la ecuación de Mayr fueron: $Po = 35,1$ [kW] y $Q = 0,327$ [μ s].

RESUMEN DE VALORES PARA ± 4 [μ S]					
Modelo	Estado	Parámetro	Valor	Dispersión	Unidad
Mayr	Constante	Potencia	209,6	$\pm 91,00$	[kW]
		Tita	0,943	$\pm 0,251$	[μ s]
	Variable	Potencia	$83,7168 \cdot g^{0,812292}$	$\pm 577494 \cdot g^{1,934458}$	[kW]
		Tita	$15,5819 \cdot g^{0,599004}$	$\pm 0,0947 - 42,508 \cdot g + 5563,1 \cdot g^2$	[μ s]
Cassie	Constante	Tensión	3,759	$\pm 0,694$	[kV]
		Tita	0,981	$\pm 0,571$	[μ s]
	Variable	Tensión	$10,2961 \cdot g^{0,0253159}$	$\pm 13,9028 \cdot g^{0,473240}$	[kV]
		Tita	$36,2426 \cdot g^{0,718350}$	$\pm 0,0408 + 24,684 \cdot g - 8694,1 \cdot g^2 + 636111 \cdot g^3$	[μ s]

Tabla N°5-19: Resumen de los valores de los parámetros para el intervalo de ± 4 [μ s].

5.6.- SIMULACIONES DE LOS ENSAYOS

5.6.1.- CIRCUITO UTILIZADO

El ensayo de los interruptores de SF6 y la consecuente obtención de los oscilogramas, fue mediante la utilización de un circuito de ensayo sintético similar al mostrado en el capítulo 4, figura 4-1; del cual se reproduce su circuito de alta tensión que se muestra a continuación estando los valores de los elementos en concordancia con los valores reales.

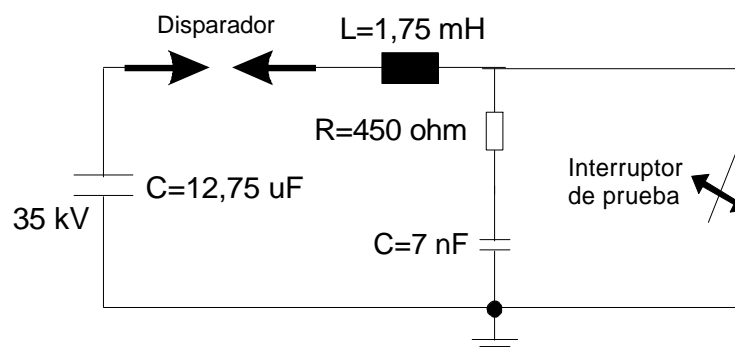


Figura N°5-11: Detalle del circuito eléctrico usado en los ensayos.

La secuencia de operación del circuito anterior es: primero se carga una pila de capacitores hasta llegar a una tensión nominal de 35 [kV], luego se cierra el interruptor a estudiar y por último se cierra el circuito de disparo, con lo cual comienza a fluir la corriente a través del circuito eléctrico. Con el transcurrir de los microsegundos se intenta despejar la falta simulada con el cortocircuito en bornes del interruptor a través de su apertura, con lo cual se registra el arco eléctrico que se forma entre sus contactos. Si bien la acción de apertura

VALORES CORRESPONDIENTES AL INTERRUPTOR D1				
Modelo	Parámetro	Rango	Promedio	Unidad
Mayr	Potencia	150 380	251	[kW]
	Tita	1,03 1,44	1,17	[μ s]
Cassie	Tensión	2,76 4,92	3,57	[kV]
	Tita	0,39 2,39	1,05	[μ s]

Figura N°5-17: Resumen de los valores de los parámetros para el interruptor D1.

VALORES CORRESPONDIENTES AL INTERRUPTOR D2				
Modelo	Parámetro	Rango	Promedio	Unidad
Mayr	Potencia	148 436	239	[kW]
	Tita	0,67 1,19	0,98	[μ s]
Cassie	Tensión	2,57 4,95	3,61	[kV]
	Tita	0,35 1,95	1,06	[μ s]

Figura N°5-18: Resumen de los valores de los parámetros para el interruptor D2.

5.5.- GENERALIZACIÓN DE VALORES PARA EL INTERVALO ± 4 [μ S]

A continuación se presenta la generalización de valores realizada en el Anexo II de este trabajo para el cálculo de los valores de los parámetros de los modelos de Mayr y de Cassie con comportamientos constante y variable.

El proceso para el cálculo de los valores incluidos en la tabla 5-19 fue el siguiente: primero se ha tenido en cuenta el tipo de interruptor, luego el método de cálculo aplicable a cada oscilograma y por último el modelo matemático a utilizar. Así se han agrupado las distintas posibilidades de forma que el resultado final no es similar al obtenido en el ítem anterior. Por su parte, el grado de dispersión se obtuvo de la misma forma.

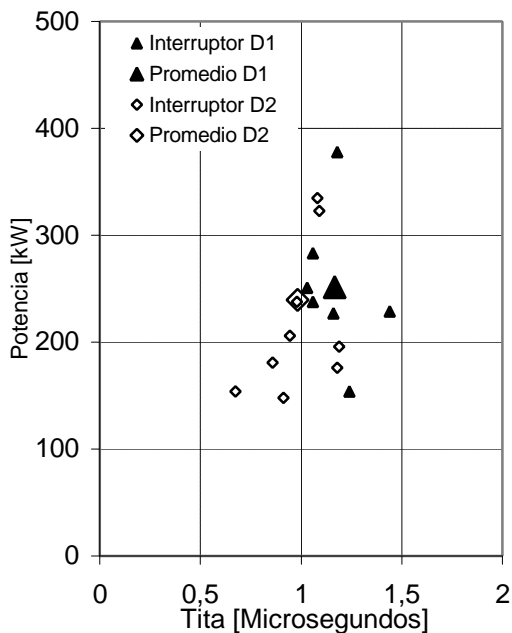


Figura N°5-9: Dispersión obtenida para el modelo de Mayr.

Para la dispersión de los parámetros del modelo de Cassie se muestra la figura 5-10 en la cual tanto los valores medios como la magnitud de la dispersión son prácticamente iguales para ambos tipos de interruptores; pudiéndose observar también una mayor variación de la constante de tiempo respecto a la obtenida en la figura anterior.

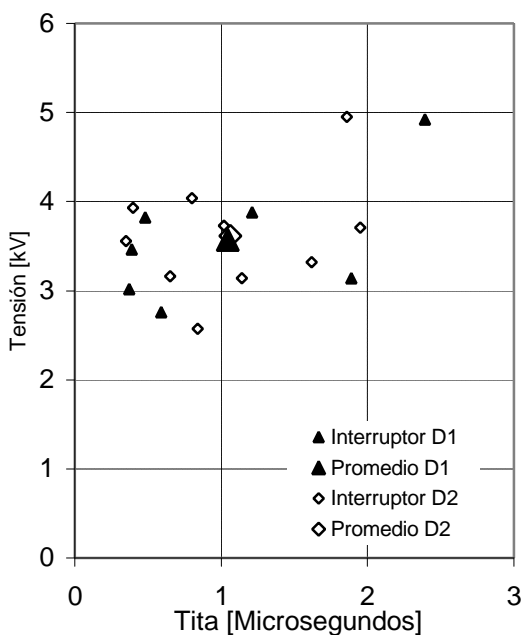


Figura N°5-10: Dispersión obtenida para el modelo de Cassie.

5.4.2.- Rango de variación de los valores de los parámetros

Los valores anteriormente calculados se resumen en las tablas 5-17 y 5-18 en donde es posible observar el rango de variación junto con los valores medios, según el tipo de interruptor, para todos los oscilogramas y siempre utilizando el Método Asturiano de cálculo de parámetros.

5.3.2.2.2.- Modelo de Cassie

Interruptor D2 – Asturiano – Modelo de Cassie		
Oscilograma	Tensión [kV]	Tita [μ s]
D2-4946 (SR)	$0,256934 \cdot 10^1$	$0,840825 \cdot 10^0$
D2-L83 (SR)	$0,393160 \cdot 10^1$	$0,399640 \cdot 10^0$
D2-P1022 (SR)	$0,356040 \cdot 10^1$	$0,349419 \cdot 10^0$
D2-P805 (SR)	$0,404401 \cdot 10^1$	$0,795783 \cdot 10^0$
D2-P844 (SR)	$0,315993 \cdot 10^1$	$0,650196 \cdot 10^0$
D2-P860 (SR)	$0,495323 \cdot 10^1$	$0,185598 \cdot 10^1$
D2-4940 (CR)	$0,370611 \cdot 10^1$	$0,195092 \cdot 10^1$
D2-P1025 (CR)	$0,314318 \cdot 10^1$	$0,114359 \cdot 10^1$
D2-P817 (CR)	$0,331933 \cdot 10^1$	$0,161886 \cdot 10^1$
D2-P856 (CR)	$0,372631 \cdot 10^1$	$0,102263 \cdot 10^1$

Tabla N°5-15: Valores de parámetros constantes para el interruptor D2.

Interruptor D2 – Asturiano – Modelo de Cassie				
Oscilograma	Ap	Bp	Aq	Bq
D2-4946 (SR)	$0,207499 \cdot 10^5$	$0,724517 \cdot 10^{-3}$	$0,483124 \cdot 10^2$	$0,730460 \cdot 10^0$
D2-L83 (SR)	$0,179509 \cdot 10^6$	$0,178996 \cdot 10^0$	$0,565525 \cdot 10^2$	$0,709755 \cdot 10^0$
D2-P1022 (SR)	$0,225632 \cdot 10^5$	$0,118161 \cdot 10^{-8}$	$0,502295 \cdot 10^2$	$0,713672 \cdot 10^0$
D2-P805 (SR)	$0,205782 \cdot 10^5$	$0,432724 \cdot 10^{-4}$	$0,442973 \cdot 10^2$	$0,717684 \cdot 10^0$
D2-P844 (SR)	$0,196461 \cdot 10^5$	$0,122429 \cdot 10^{-1}$	$0,346358 \cdot 10^2$	$0,679029 \cdot 10^0$
D2-P860 (SR)	$0,172969 \cdot 10^5$	$0,200228 \cdot 10^{-9}$	$0,350381 \cdot 10^2$	$0,670723 \cdot 10^0$
D2-4940 (CR)	$0,789334 \cdot 10^4$	$0,129019 \cdot 10^0$	$0,340839 \cdot 10^2$	$0,732556 \cdot 10^0$
D2-P1025 (CR)	$0,324773 \cdot 10^4$	$0,419774 \cdot 10^{-10}$	$0,259660 \cdot 10^1$	$0,194222 \cdot 10^0$
D2-P817 (CR)	$0,368632 \cdot 10^4$	$0,977538 \cdot 10^{-9}$	$0,678067 \cdot 10^1$	$0,383475 \cdot 10^0$
D2-P856 (CR)	$0,371557 \cdot 10^4$	$0,627862 \cdot 10^{-9}$	$0,102507 \cdot 10^1$	$0,767127 \cdot 10^3$

Tabla N°5-16: Valores de parámetros variables para el interruptor D2.

5.4.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.4.1.- Observación del grado de dispersión obtenido

En la figura 5-9 se observa la dispersión en los valores calculados junto con el valor medio para cada tipo de interruptor, pudiéndose observar que ambos tipos presentan valores medios similares. La forma general de la dispersión tanto para la potencia como para la constante de tiempo es similar en ambos interruptores.

5.3.2.2.- Método Asturiano

5.3.2.2.1.- Modelo de Mayr

Interruptor D2 – Asturiano – Modelo de Mayr		
Oscilograma	Potencia [kW]	Tita [μ s]
D2-4946 (SR)	$0,175684 \cdot 10^3$	$0,117764 \cdot 10^1$
D2-L83 (SR)	$0,335124 \cdot 10^3$	$0,107813 \cdot 10^1$
D2-P1022 (SR)	$0,323496 \cdot 10^3$	$0,109427 \cdot 10^1$
D2-P805 (SR)	$0,435513 \cdot 10^3$	$0,914951 \cdot 10^0$
D2-P844 (SR)	$0,238591 \cdot 10^3$	$0,978393 \cdot 10^0$
D2-P860 (SR)	$0,147948 \cdot 10^3$	$0,911593 \cdot 10^0$
D2-4940 (CR)	$0,195767 \cdot 10^3$	$0,118963 \cdot 10^1$
D2-P1025 (CR)	$0,181444 \cdot 10^3$	$0,858495 \cdot 10^0$
D2-P817 (CR)	$0,206023 \cdot 10^3$	$0,943949 \cdot 10^0$
D2-P856 (CR)	$0,153604 \cdot 10^3$	$0,673350 \cdot 10^0$

Tabla N°5-13: Valores de parámetros constantes para el interruptor D2.

Interruptor0 D2 – Asturiano – Modelo de Mayr				
Oscilograma	Ap	Bp	Aq	Bq
D2-4946 (SR)	$0,126510 \cdot 10^7$	$0,468680 \cdot 10^0$	$0,134255 \cdot 10^2$	$0,553239 \cdot 10^0$
D2-L83 (SR)	$0,463002 \cdot 10^6$	$0,400669 \cdot 10^{-4}$	$0,128906 \cdot 10^2$	$0,486454 \cdot 10^0$
D2-P1022 (SR)	$0,373519 \cdot 10^7$	$0,592265 \cdot 10^0$	$0,889304 \cdot 10^1$	$0,477872 \cdot 10^0$
D2-P805 (SR)	$0,100993 \cdot 10^7$	$0,895204 \cdot 10^{-1}$	$0,119503 \cdot 10^2$	$0,498743 \cdot 10^0$
D2-P844 (SR)	$0,241155 \cdot 10^7$	$0,566881 \cdot 10^0$	$0,696850 \cdot 10^1$	$0,454271 \cdot 10^0$
D2-P860 (SR)	$0,490576 \cdot 10^6$	$0,340578 \cdot 10^0$	$0,250952 \cdot 10^1$	$0,288987 \cdot 10^0$
D2-4940 (CR)	$0,623043 \cdot 10^8$	$0,125804 \cdot 10^1$	$0,340838 \cdot 10^2$	$0,732555 \cdot 10^0$
D2-P1025 (CR)	$0,802449 \cdot 10^6$	$0,395079 \cdot 10^0$	$0,947156 \cdot 10^0$	$0,613728 \cdot 10^{-1}$
D2-P817 (CR)	$0,877826 \cdot 10^5$	$0,233950 \cdot 10^0$	$0,152423 \cdot 10^6$	$0,194471 \cdot 10^1$
D2-P856 (CR)	$0,123618 \cdot 10^0$	$0,188929 \cdot 10^0$	$0,486033 \cdot 10^4$	$0,125470 \cdot 10^1$

Tabla N°5-14: Valores de parámetros variables para el interruptor D2.

Interruptor D2 – Amsinck – Modelo de Mayr				
Oscilograma	Ap	Bp	Aq	Bq
D2-4940 (CR)	$0,288662 \cdot 10^5$	$0,109500 \cdot 10^1$	$0,497754 \cdot 10^2$	$0,833705 \cdot 10^0$
D2-P1025 (CR)	$0,286587 \cdot 10^4$	$0,689048 \cdot 10^0$	$0,388676 \cdot 10^1$	$0,371657 \cdot 10^0$
D2-P817 (CR)	$0,192268 \cdot 10^4$	$0,551702 \cdot 10^0$	$0,994480 \cdot 10^1$	$0,560274 \cdot 10^0$
D2-P856 (CR)	$0,741627 \cdot 10^3$	$0,410928 \cdot 10^0$	$0,919743 \cdot 10^0$	$0,129148 \cdot 10^0$

Tabla N°5-10: Valores de parámetros variables para el interruptor D2.

5.3.2.1.2.- Modelo de Cassie

Interruptor D2 – Amsinck – Modelo de Cassie		
Oscilograma	Tensión [kV]	Tita [μ s]
D2-4940 (CR)	$0,407796 \cdot 10^4$	$0,779745 \cdot 10^0$
D2-P1025 (CR)	$0,369893 \cdot 10^4$	$0,103836 \cdot 10^1$
D2-P817 (CR)	$0,394858 \cdot 10^4$	$0,959492 \cdot 10^0$
D2-P856 (CR)	$0,468324 \cdot 10^4$	$0,635220 \cdot 10^0$

Tabla N°5-11: Valores de parámetros constantes para el interruptor D2.

Interruptor D2 – Amsinck – Modelo de Cassie				
Oscilograma	Ap	Bp	Aq	Bq
D2-4940 (CR)	$0,867234 \cdot 10^4$	$0,144708 \cdot 10^0$	$0,774685 \cdot 10^2$	$0,905724 \cdot 10^0$
D2-P1025 (CR)	$0,171721 \cdot 10^4$	$-0,153068 \cdot 10^0$	$0,196012 \cdot 10^2$	$0,611937 \cdot 10^0$
D2-P817 (CR)	$0,259902 \cdot 10^4$	$-0,871738 \cdot 10^{-1}$	$0,251054 \cdot 10^2$	$0,705644 \cdot 10^0$
D2-P856 (CR)	$0,834508 \cdot 10^3$	$-0,297719 \cdot 10^0$	$0,363581 \cdot 10^4$	$0,130580 \cdot 10^2$

Tabla N°5-12: Valores de parámetros variables para el interruptor D2.

5.3.1.2.2.- Modelo de Cassie

Interruptor D1 – Asturiano – Modelo de Cassie		
Oscilograma	Tensión [kV]	Tita [μ s]
D1-4910 (SR)	$0,276731 \cdot 10^1$	$0,589640 \cdot 10^0$
D1-4917 (SR)	$0,301653 \cdot 10^1$	$0,372715 \cdot 10^0$
D1-4931 (SR)	$0,382073 \cdot 10^1$	$0,482354 \cdot 10^0$
D1-4948 (SR)	$0,387988 \cdot 10^1$	$0,121427 \cdot 10^1$
D1-4949 (SR)	$0,345588 \cdot 10^1$	$0,394829 \cdot 10^0$
D1-4913 (CR)	$0,491810 \cdot 10^1$	$0,239217 \cdot 10^1$
D1-4915 (CR)	$0,313999 \cdot 10^1$	$0,189147 \cdot 10^1$

Tabla N°5-7: Valores de parámetros constantes para el interruptor D1.

Interruptor D1 – Asturiano – Modelo de Cassie				
Oscilograma	Ap	Bp	Aq	Bq
D1-4910 (SR)	$0,360853 \cdot 10^5$	$0,497728 \cdot 10^{-1}$	$0,551408 \cdot 10^2$	$0,753966 \cdot 10^0$
D1-4917 (SR)	$0,162314 \cdot 10^5$	$0,277565 \cdot 10^{-9}$	$0,411808 \cdot 10^2$	$0,707515 \cdot 10^0$
D1-4931 (SR)	$0,231523 \cdot 10^5$	$0,302362 \cdot 10^{-9}$	$0,473957 \cdot 10^2$	$0,703515 \cdot 10^0$
D1-4948 (SR)	$0,111320 \cdot 10^{11}$	$0,145033 \cdot 10^1$	$0,522731 \cdot 10^2$	$0,746490 \cdot 10^0$
D1-4949 (SR)	$0,161272 \cdot 10^5$	$0,331602 \cdot 10^{-9}$	$0,441962 \cdot 10^2$	$0,698652 \cdot 10^0$
D1-4913 (CR)	$0,255746 \cdot 10^5$	$0,270594 \cdot 10^0$	$0,104392 \cdot 10^3$	$0,900771 \cdot 10^0$
D1-4915 (CR)	$0,478160 \cdot 10^4$	$0,614878 \cdot 10^{-1}$	$0,288770 \cdot 10^2$	$0,752367 \cdot 10^0$

Tabla N°5-8: Valores de parámetros variables para el interruptor D1.

5.3.2.- INTERRUPTOR “D2”

5.3.2.1.- Método de Amsinck

5.3.2.1.1.- Modelo de Mayr

Interruptor D2 – Amsinck – Modelo de Mayr		
Oscilograma	Potencia [kW]	Tita [μ s]
D2-4940 (CR)	$0,113562 \cdot 10^3$	$0,715459 \cdot 10^0$
D2-P1025 (CR)	$0,106096 \cdot 10^3$	$0,639267 \cdot 10^0$
D2-P817 (CR)	$0,147246 \cdot 10^3$	$0,734389 \cdot 10^0$
D2-P856 (CR)	$0,760990 \cdot 10^2$	$0,444801 \cdot 10^0$

Tabla N°5-9: Valores de parámetros constantes para el interruptor D2.

5.3.1.1.2.- Modelo de Cassie

Interruptor D1 - Amsinck – Modelo de Cassie		
Oscilograma	Tensión [kV]	Tita [μ s]
D1-4913 (CR)	$0,541427 \cdot 10^1$	$0,513443 \cdot 10^0$
D1-4915 (CR)	$0,352278 \cdot 10^1$	$0,680165 \cdot 10^0$

Tabla N°5-3: Valores de parámetros constantes para el interruptor D1.

Interruptor D1 – Amsinck – Modelo de Cassie				
Oscilograma	Ap	Bp	Aq	Bq
D1-4913 (CR)	$0,225315 \cdot 10^5$	$0,243544 \cdot 10^0$	$0,219067 \cdot 10^3$	$0,106929 \cdot 10^1$
D1-4915 (CR)	$0,552611 \cdot 10^4$	$0,887914 \cdot 10^{-1}$	$0,675941 \cdot 10^2$	$0,946298 \cdot 10^0$

Tabla N°5-4: Valores de parámetros variables para el interruptor D1.

5.3.1.2.- Método Asturiano

5.3.1.2.1.- Modelo de Mayr

Interruptor D1 – Asturiano – Modelo de Mayr		
Oscilograma	Potencia [kW]	Tita [μ s]
D1-4910 (SR)	$0,227363 \cdot 10^3$	$0,116638 \cdot 10^1$
D1-4917 (SR)	$0,250942 \cdot 10^3$	$0,102880 \cdot 10^1$
D1-4931 (SR)	$0,377865 \cdot 10^3$	$0,118315 \cdot 10^1$
D1-4948 (SR)	$0,237762 \cdot 10^3$	$0,106051 \cdot 10^1$
D1-4949 (SR)	$0,282772 \cdot 10^3$	$0,105900 \cdot 10^1$
D1-4913 (CR)	$0,229054 \cdot 10^3$	$0,144134 \cdot 10^1$
D1-4915 (CR)	$0,154436 \cdot 10^3$	$0,124594 \cdot 10^1$

Tabla N°5-5: Valores de parámetros constantes para el interruptor D1.

Interruptor D1 – Asturiano – Modelo de Mayr				
Oscilograma	Ap	Bp	Aq	Bq
D1-4910 (SR)	$0,170118 \cdot 10^7$	$0,499359 \cdot 10^0$	$0,121508 \cdot 10^2$	$0,542514 \cdot 10^0$
D1-4917 (SR)	$0,328220 \cdot 10^7$	$0,614541 \cdot 10^0$	$0,101821 \cdot 10^2$	$0,516135 \cdot 10^0$
D1-4931 (SR)	$0,508100 \cdot 10^7$	$0,595854 \cdot 10^0$	$0,139202 \cdot 10^2$	$0,537933 \cdot 10^0$
D1-4948 (SR)	$0,204532 \cdot 10^7$	$0,469439 \cdot 10^0$	$0,139037 \cdot 10^2$	$0,548440 \cdot 10^0$
D1-4949 (SR)	$0,463513 \cdot 10^7$	$0,647217 \cdot 10^0$	$0,107300 \cdot 10^2$	$0,505960 \cdot 10^0$
D1-4913 (CR)	$0,654056 \cdot 10^9$	$0,154119 \cdot 10^1$	$0,104391 \cdot 10^3$	$0,900770 \cdot 10^0$
D1-4915 (CR)	$0,325430 \cdot 10^5$	$0,430775 \cdot 10^0$	$0,296403 \cdot 10^7$	$0,213142 \cdot 10^1$

Tabla N°5-6: Valores de parámetros variables para el interruptor D1.

Para finalizar se muestran el resultado de aproximar la derivada de la conductancia y la conductancia del arco, según el modelo escogido, con los valores de los parámetros calculados anteriormente.

5.3.- RESULTADOS NUMÉRICOS EMPLEANDO LA METODOLOGÍA DESARROLLADA

Para realizar este ítem se trabajó utilizando la totalidad de los oscilogramas que corresponden a los ensayos sobre los dos interruptores de SF6. Partiendo de los registros de derivada de corriente y de tensión desde -4 [μ s] hasta $+4$ [μ s], luego de limpiarlos y digitalizarlos a todos ellos, se confeccionaron los archivos de entrada para poder emplear los programas desarrollados con los cuales se determinaron los valores de los parámetros según la dependencia y la ecuación diferencial escogida.

Recordando que las funciones de los parámetros de los modelos tienen la forma potencial siguiente, las tablas que se presentarán responden a los valores de estos parámetros.

$$P_o = Ap \cdot g^{Bp}; \quad U_o = Ap \cdot g^{Bp} \quad y \quad Q = Aq \cdot g^{Bq}$$

Para el cálculo de los valores de los parámetros se los agrupó primero en función del tipo de interruptor luego según el método de cálculo y por último de acuerdo al modelo matemático a utilizar. El “CR” en las tablas siguientes significa que los datos corresponden a un ensayo donde existió reignición y el “SR” donde se obtuvo una apertura exitosa.

5.3.1.- INTERRUPTOR “D1”

5.3.1.1.- Método de Amsinck

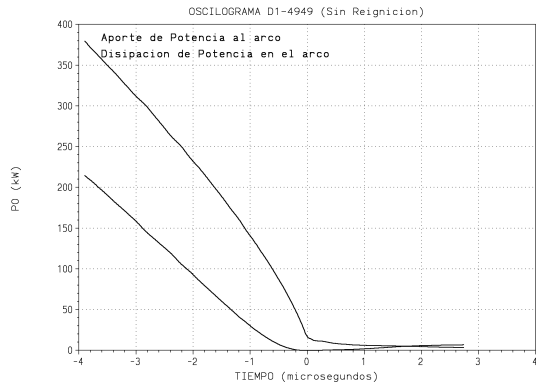
5.3.1.1.1.- Modelo de Mayr

Interruptor D1 – Amsinck – Modelo de Mayr		
Oscilograma	Potencia [kW]	Tita [μ s]
D1-4913 (CR)	$0,121414 \cdot 10^3$	$0,503001 \cdot 10^0$
D1-4915 (CR)	$0,102517 \cdot 10^3$	$0,636376 \cdot 10^0$

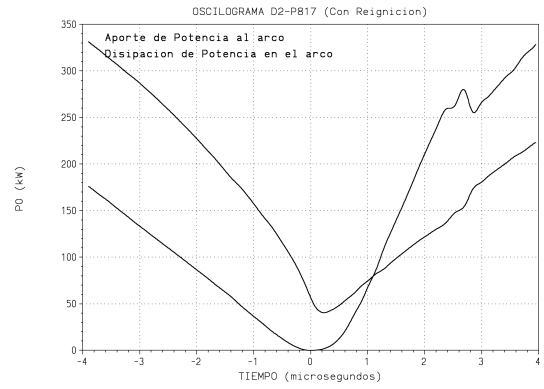
Tabla N°5-1: Valores de parámetros constantes para el interruptor D1.

Interruptor D1 – Amsinck – Modelo de Mayr				
Oscilograma	Ap	Bp	Aq	Bq
D1-4913 (CR)	$0,398106 \cdot 10^6$	$0,144389 \cdot 10^1$	$0,198513 \cdot 10^3$	$0,105502 \cdot 10^1$
D1-4915 (CR)	$0,172007 \cdot 10^5$	$0,105782 \cdot 10^1$	$0,543374 \cdot 10^2$	$0,914053 \cdot 10^0$

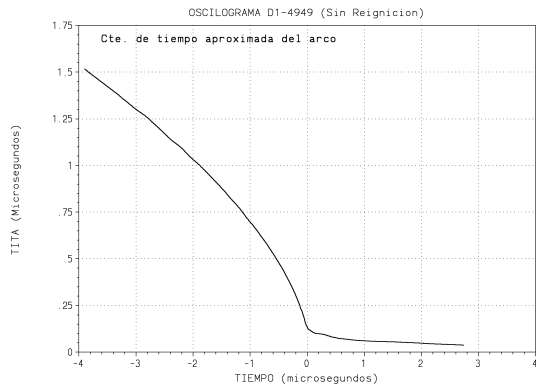
Tabla N°5-2: Valores de parámetros variables para el interruptor D1.



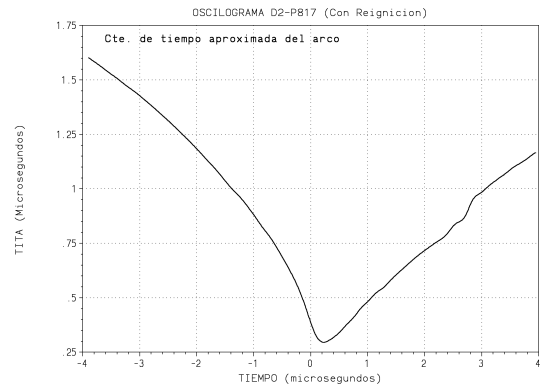
(a) Potencias en el arco apertura



(b) Potencias en el arco reignición

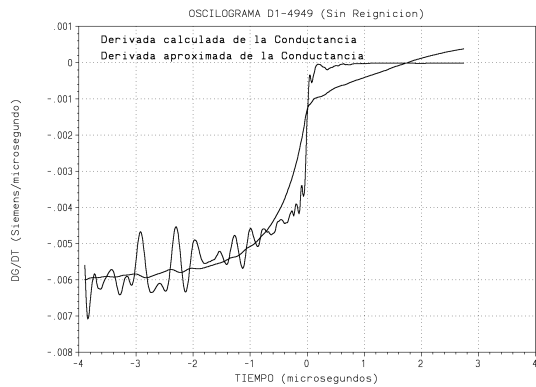


(c) Tita en el arco apertura

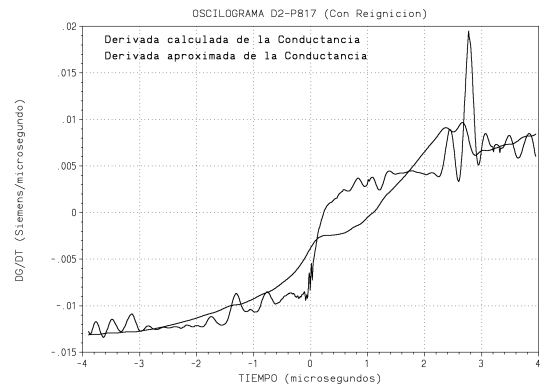


(d) Tita en el arco reignición

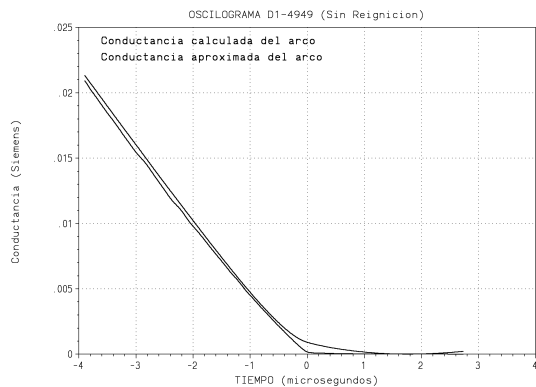
Figura N°5-7: Variables eléctricas calculadas y aproximadas.



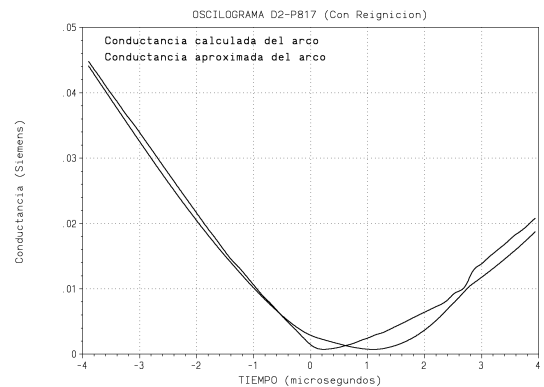
(a) Dg/dt calc. y aprox. apertura



(b) Dg/dt calc. y aprox. reignición

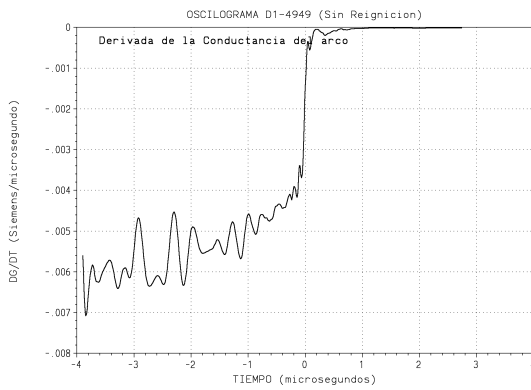


(c) G calc. y aprox. Apertura

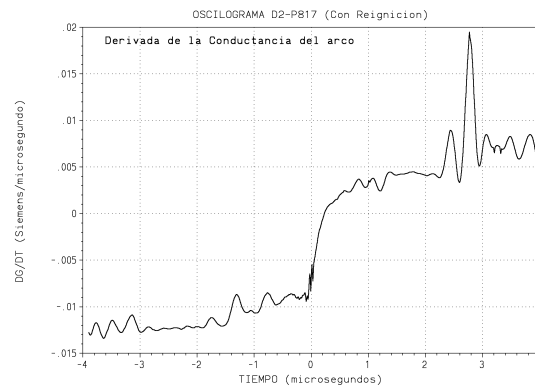


(d) G calc. y aprox. reignición

Figura N°5-8: Variables eléctricas calculadas y aproximadas por los modelos.



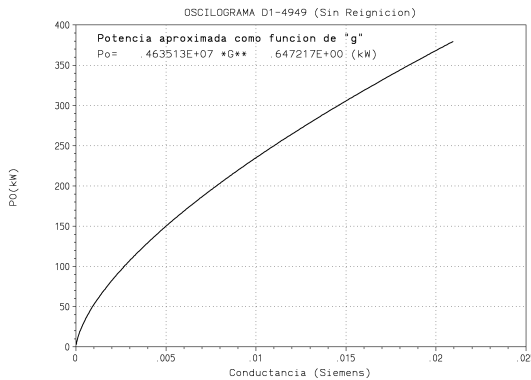
(c) dg/dt apertura



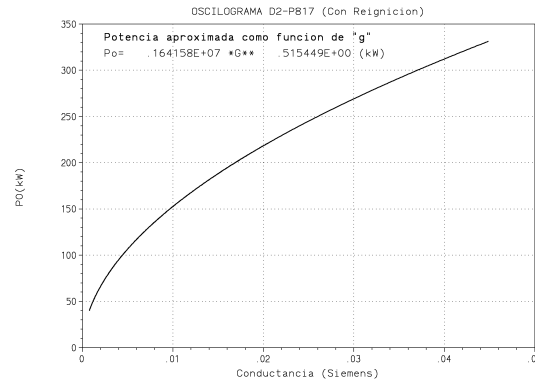
(d) dg/dt reignición

Figura N°5-5: Variables eléctricas derivadas de los datos.

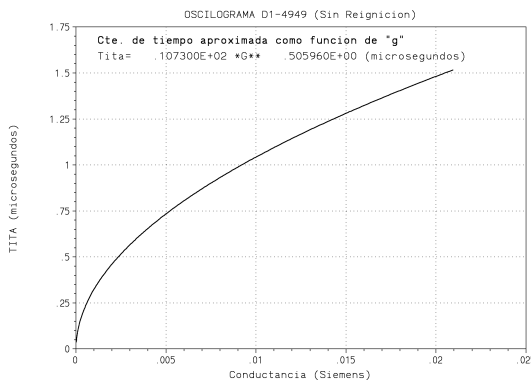
Utilizando a uno u otro modelo de arco se obtienen las aproximaciones de los parámetros involucrados junto con el resultado numérico del cálculo. Para este caso en particular se muestra la potencia y la constante de tiempo que se corresponden con el modelo de Mayr, ambas consideradas como dependientes de la conductancia.



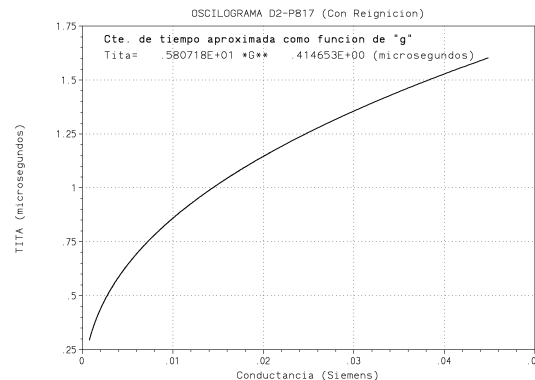
(a) Potencia aproximada apertura



(b) Potencia aproximada reignición



(c) Tita aproximada apertura

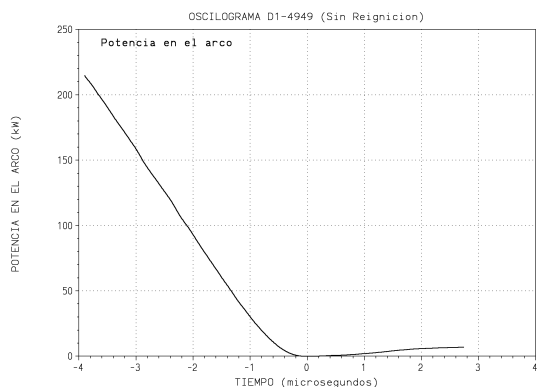


(d) Tita aproximada reignición

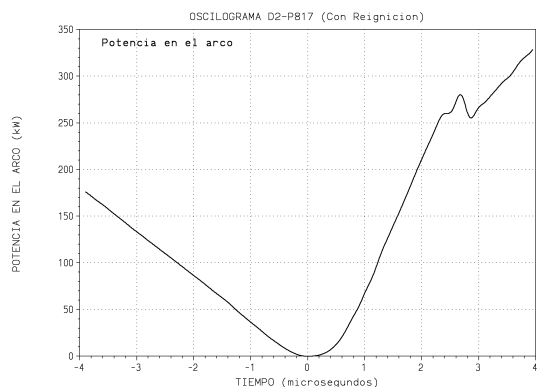
Figura N°5-6: Variables eléctricas aproximadas calculadas a partir de los datos.

Luego se presenta una comparación entre la potencia calculada con los datos originales de tensión y corriente junto con la que se obtiene de la aproximación realizada. Debido a que no se puede obtener la constante de tiempo a partir de los datos originales, sólo se muestra su evolución a partir de la aproximación que se realiza para ella.

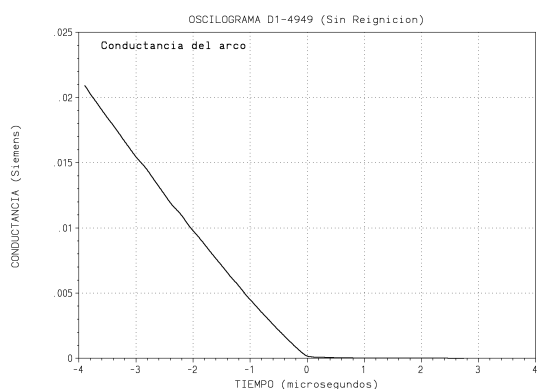
Además de las anteriores, los programas de cálculo brindan toda una gama de variables eléctricas que se obtienen a partir de las anteriores operando matemáticamente. Por ejemplo: la potencia es el producto de tensión y corriente, la conductancia es la inversa de la resistencia, ambas se muestran en la figura 5-4.



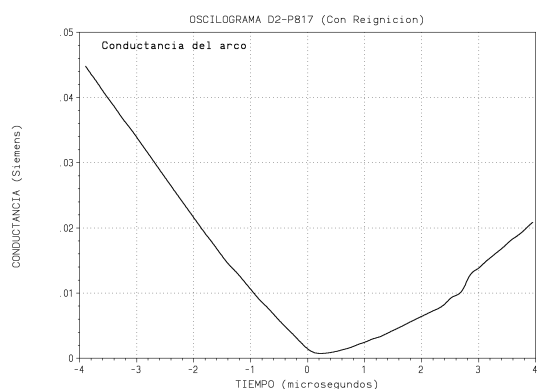
(c) Potencia apertura



(c) Potencia reignición



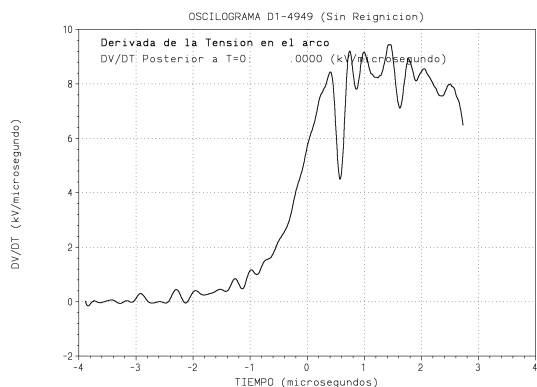
(d) Conductancia apertura



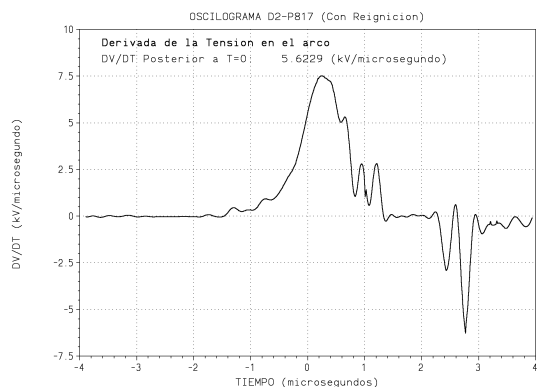
(d) Conductancia reignición

Figura N°5-4: Variables eléctricas calculadas a partir de los datos.

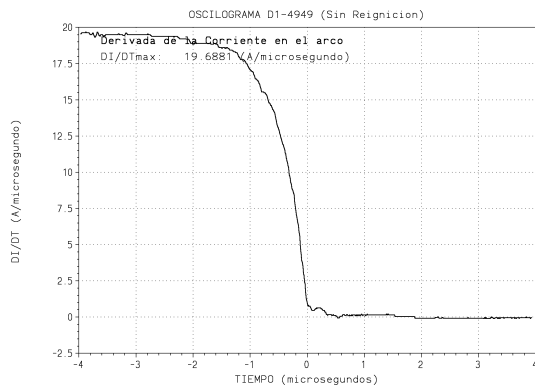
También es posible observar las variaciones de las derivadas de la tensión y de la conductancia, que se ejemplifican en la figura 5-5.



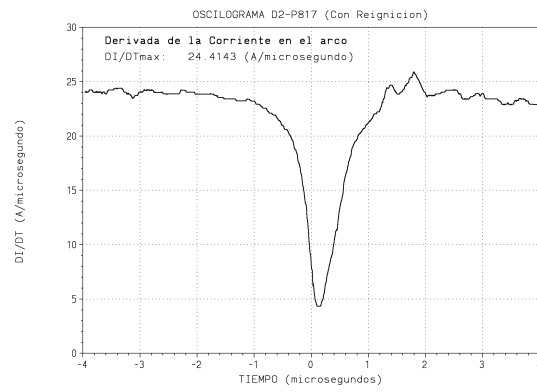
(a) dv/dt apertura



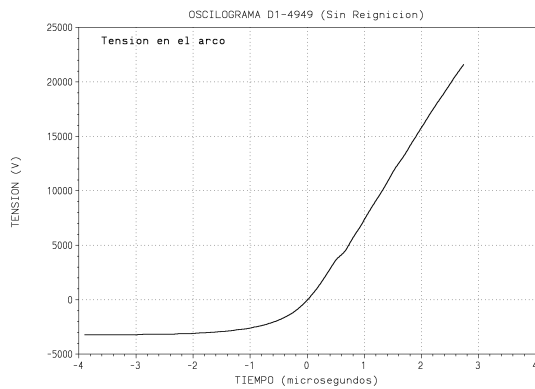
(b) dv/dt reignición



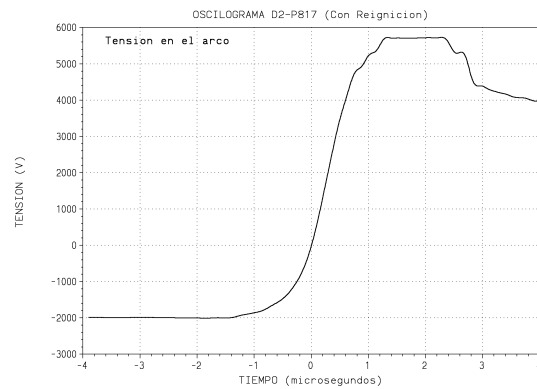
(a) di/dt apertura



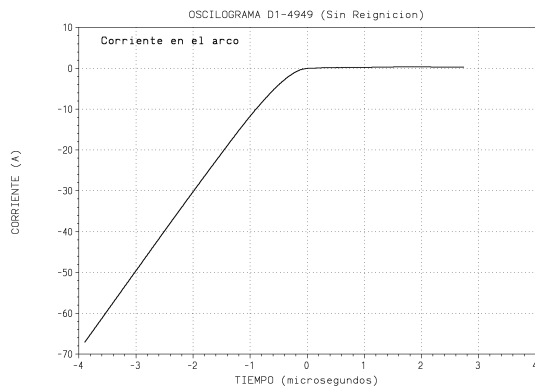
(b) di/dt reignición



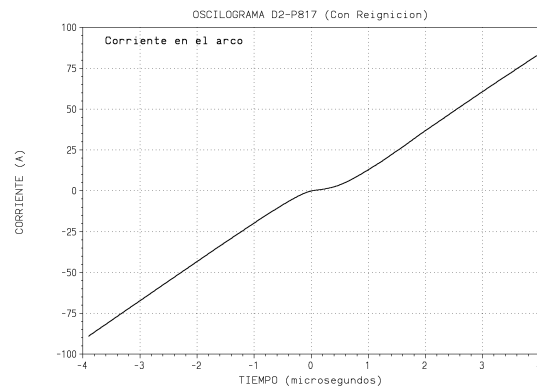
(c) Tensión apertura



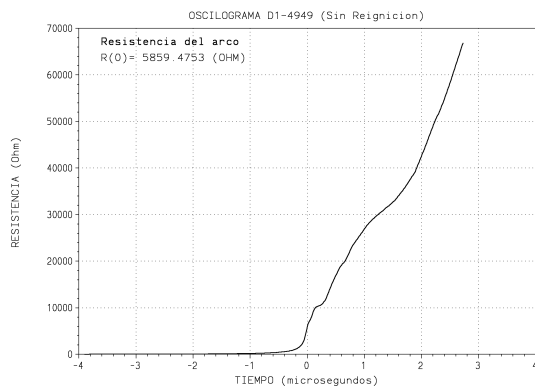
(d) Tensión reignición



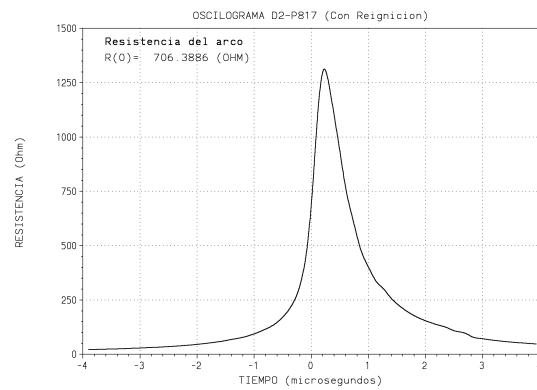
(e) Corriente apertura



(f) Corriente reignición



(g) Resistencia apertura



(h) Resistencia reignición

Figura N°5-3: Variables eléctricas registradas durante el ensayo.

superior se puede observar la evolución de la derivada de la corriente en $[A/\mu s]$ que es la que realmente se registra durante el ensayo, luego se encuentra la tensión en el arco, que también se registra en $[kV/\mu s]$. A continuación, está la corriente (en $[A]$) durante el ensayo que se obtiene no por medición sino por integración de la derivada, para finalizar presentando el comportamiento de la resistencia del arco por división entre tensión y corriente. Sobre el eje de coordenadas siempre se tiene al tiempo en $[\mu s]$ y todos los registros se encuentran sincronizados respecto de un tiempo cero que se corresponde con el paso simultáneo por cero de la tensión y de la corriente.

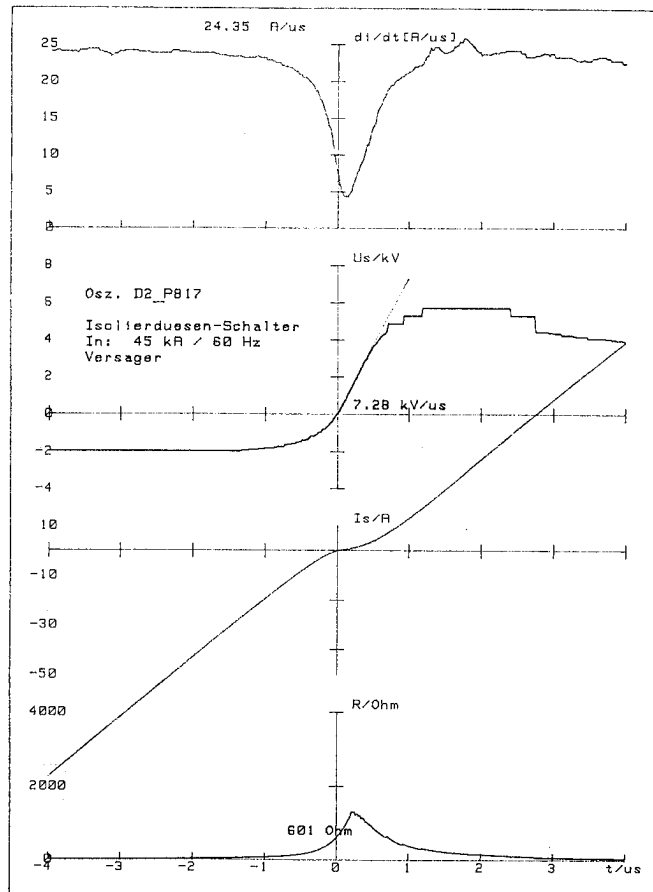


Figura N°5-2: Detalle del oscilograma D2-P817.

A partir de los oscilogramas anteriores y aplicando la metodología desarrollada que se explica en el Apéndice I, es posible obtener una serie de figuras las cuales permiten analizar la evolución de algunas variables eléctricas durante los ensayos. A continuación se presentan las figuras que se obtienen de ejecutar el programa “Mayrast” con los oscilogramas anteriores luego de procesarlos convenientemente. Las cuatro primeras figuras, que se presentan en la figura 5-3, permiten evaluar la calidad de los pasos previos a la confección del archivo de entrada con los datos del ensayo ya sea por medio comparativo con la forma de las curvas o numérico a través de los datos de derivada de corriente máxima antes del cero (19,8 contra 19,7 $[A/\mu s]$ para la apertura y 24,35 contra 24,4 $[A/\mu s]$ para la reignición) y de la resistencia para tiempo cero (3148 contra 5859 $[\Omega]$ y 601 contra 706 $[\Omega]$ para la apertura y reignición respectivamente).

▷ La tensión transitoria de restablecimiento (TTR) y la velocidad inicial de crecimiento de la TTR (VTTR) deberán ser las mismas que en el ensayo directo.

De esta forma, la utilización de ensayos sintéticos brinda la oportunidad de evaluar nuevas técnicas de corte a través del estudio, investigación y comparación de los datos que se obtienen durante los ensayos, recordando que cuando más datos se obtengan menor es la cantidad de ensayos a realizar.

5.2.- OSCIOGRAMAS EMPLEADOS

En este capítulo se utilizan oscilogramas obtenidos del ensayo de dos tipos de interruptores constructivamente distintos, el primero de ellos llamado “D1-****” que es un interruptor de hexafluoruro de azufre de doble presión y el segundo que es llamado “D2-****” también utiliza el mismo gas aislante pero es del tipo interruptor con autocompresión. Ambos interruptores, si bien se diferencian por el método de soplido del arco, son para tensiones de hasta 145 [kV] y pertenecen a la misma generación de interruptores. Los registros que se usan para los cálculos forman parte de dos baterías de ensayos realizadas con el mismo circuito de ensayo y bajo las mismas condiciones de operación.

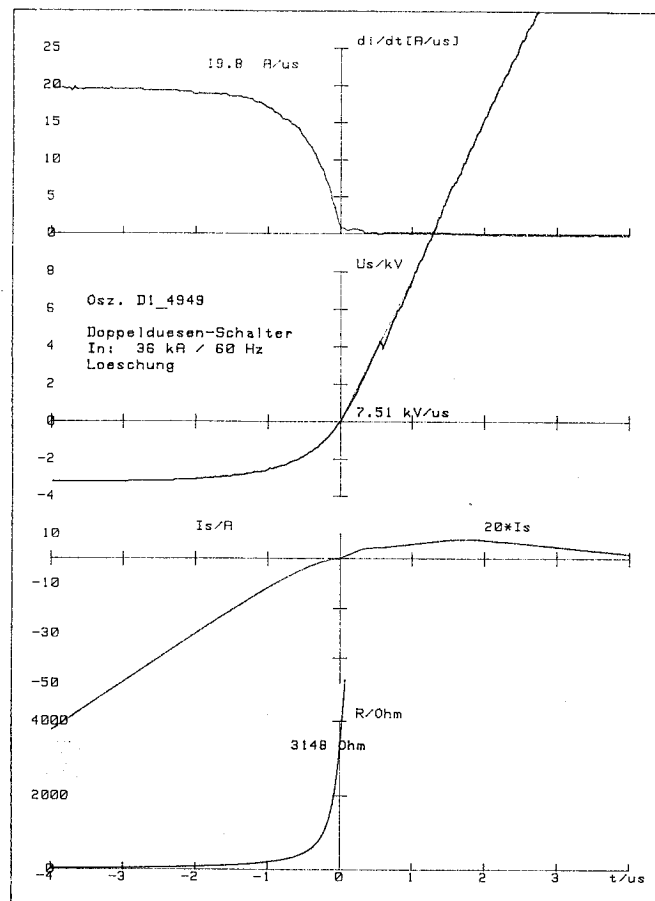


Figura N°5-1: Detalle del oscilograma D1-4949.

Durante el ensayo bajo condiciones de cortocircuito en sus bornes, puede ocurrir la apertura o no del interruptor, con lo cual se pueden obtener en forma general dos tipos distintos de oscilogramas que se muestran en las figuras 5-1 y 5-2. En ellas y en la parte

CAPÍTULO 5:

Simulación de un Interruptor de SF6 en Alta Tensión

5.1.- INTRODUCCIÓN

El interruptor de SF6 debe su aparición a la necesidad de mejorar la calidad del funcionamiento que se lograba con interruptores de aire comprimido en los años '40. En esos tiempos, el aumento en la capacidad de manejo de energía provocó la necesidad de estudiar nuevos gases o mezclas de éstos que permitieran disminuir las altas presiones y volúmenes de aire que se necesitaban con la técnica disponible para apagar el arco eléctrico. Así se comenzaron a estudiar nuevos gases siendo el hexafluoruro de azufre aquel que demostró mejores características aunque recién se lo comenzó a utilizar industrialmente en los '60. Evidentemente el transcurso del tiempo fue mejorando la construcción de la cámara de interrupción y así se pasó de la técnica de “soplido” mediante la cual con un conjunto pistón-boquilla se soplaba al arco eléctrico provocando su expansión y enfriamiento; a nuevas técnicas de arco rotante para tensiones menores o a interruptores híbridos con autopresurización provocada por una fuerza de Lorenz causada por el paso a través de una bobina de la corriente a cortar que empuja la boquilla de soplado de manera de comprimir el gas. Actualmente está en desarrollo la utilización de dos contactos móviles simultáneos y no solamente uno como es la técnica actual.

Independientemente del método utilizado para apagar el arco, la esencia del proceso siempre es la misma: utilizar el SF6 a presión para prolongar y enfriar el arco mientras los contactos se separan una distancia suficiente como para asegurar la interrupción del flujo de corriente. La utilización de diversas técnicas constructivas, el estudio de nuevos materiales y el constante aumento de la capacidad de los interruptores, trajo como consecuencia la necesidad de contar con una herramienta capaz de evaluar la calidad de la interrupción. Así se comenzó a realizar ensayos de cortocircuito sobre los mismos terminales del interruptor como condición más desfavorable de funcionamiento, pero actualmente la potencia y/o energía necesaria para evaluar en condiciones de cortocircuito un interruptor de Alta Tensión hacen inviable ésta posibilidad. Así nacen los ensayos sintéticos como la única forma de investigar las distintas posibilidades de interrupción del arco eléctrico.

Recordemos que la utilización de circuitos de ensayos sintéticos debe asegurar el cumplimiento de tres condiciones impuestas por la normativa vigente: la Norma IEC 427 “Synthetic testing of high-voltage alternating circuit-breakers”, que establece que:

- ▷ La energía del arco disipada en el ensayo sintético deberá ser la misma que en el ensayo directo.
- ▷ Durante el período de corriente cero, el circuito de ensayo sintético debe asegurar representar lo más fielmente posible las solicitaciones ocurridas durante el ensayo directo.

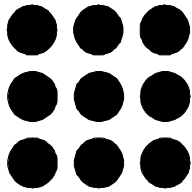
RESUMEN

El quinto Capítulo aplica los temas desarrollados anteriormente para la simulación del funcionamiento de un interruptor de SF6 en Alta Tensión.

Comienza por una descripción de los oscilogramas de los ensayos para luego aplicar sobre todos ellos la metodología desarrollada para el cálculo de los valores de los parámetros según distintas posibilidades. Muestra el resultado de estos cálculos y se realiza una generalización de los mismos.

Luego se realizan simulaciones empleando todos los modelos para estudiar su calidad en la representación de una reigición y de una apertura, tratando de reproducir los ensayos respectivos comparando para cada caso con las curvas reales.

Finalmente se presenta una calificación según la acción, apertura o reigición, de los modelos estudiados en función de las simulaciones realizadas.



Universitat Politècnica de Catalunya
Departament d'Enginyeria Elèctrica

CAPITULO 5:

SIMULACIÓN DE UN INTERRUPTOR DE SF6 EN ALTA TENSION