

6.9.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 6

- [1] W. Press, B. Flannery, S. Teukolsky, W. Vetterling: “Numerical Recipes”. Cambridge University Press, 1989.
- [2] García Melayo, “Programación en FORTRAN 77”, Ed. Paraninfo S.A., 1992.
- [3] U. Habedank, H. Knobloch: “Assessment of Shot-Circuit Current Test on High-Voltage SF6 Circuit-Breakers by Means of Arc Parameters”. Eighth International Symposium on High Voltage Engineering, Yokohama, Japan, 1993.
- [4] H.W. Dommel, T. Liu, EMTP User Group, EMTP Rule Book, Vol 1 y 2, 1995.
- [5] H.W. Dommel, EMTP User Group, EMTP Theory Book, BPA, 1987.
- [6] Grupo de Investigación de Sistemas Eléctricos de Potencia GISEP-CAUE, Introducción al uso del EMTP, Universidad Tecnológica Nacional Fac. Reg. Santa Fe, 1997.
- [7] R. Bianchi Lastra, Manual de uso del ATP, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería, Octubre 1991.
- [8] Department of Engineering Professional Development, College of Engineering, Introduction to the Electromagnetic Transients Program, University of Wisconsin-Madison/Extension, 1997.
- [9] O. Hevia: “GTPPLOT a new version of TPLOT”, EEUG, 1998.
- [10] 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.
- [11] CIGRE, Working group 13.01: “Applications of black box modelling to circuit breakers”. ELECTRA-CIGRE, N° 149, August 1993, pp. 40-71.
- [12] 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. 3 al 5 de Julio de 1997, Salamanca, España.
- [13] W. Gimenez, O. Hevia, “Discusión sobre la representatividad de los modelos de arco más comunes”. III Seminario Argentino de usuarios del EMTP, 26 y 27 de Noviembre de 1998, Buenos Aires, Argentina.

Aquí hay que destacar que los valores tanto del circuito eléctrico como los de los parámetros de los modelos, responden estrictamente a los valores medidos y calculados respectivamente, y no se han modificado a lo largo de las simulaciones efectuadas. Con esto se buscó absoluta independencia en la simulación para poder confeccionar así una tabla de clasificación para los modelos y comportamientos empleados, que representara lo más fielmente posible lo ocurrido durante todo el proceso.

También se determinó que aún habiendo calculado los valores de los parámetros para una zona de tiempo determinado, la utilidad en la simulación del ensayo de los modelos analizados, se extiende más allá de la región utilizada en los cálculos.

Para finalizar se han realizado distintas consideraciones a partir del cálculo de las curvas límites de operación según cada tipo de interruptor y ensayo, como ser determinar su aptitud para cortar una corriente determinada, evaluar la influencia del envejecimiento en la dispersión de los valores de los parámetros y establecer criterios de evaluación que sirvan para poder comparar entre sí distintos modelos de interruptores.

En la figura, las curvas límites responden a la forma general $y = A + B x$, con $A = -0,6733$ y $B = 0,02735$ para la curva correspondiente a 350 [A] y $A = -15,76$ y $B = 0,109$ para 850 [A].

6.8.- CONCLUSIONES

En la primera parte de este capítulo se demostró la aplicabilidad de la metodología de cálculo de los valores de los parámetros de los modelos de Mayr y Cassie que fuera originalmente desarrollada para interruptores de SF6 y 145 [kV], en Baja Tensión y a interruptores de apertura en aire. Para lo cual hubo que crear tres nuevos programas interactivos con el usuario que permitieran unir el formato de datos que brinda el osciloscopio utilizado durante las pruebas con la forma general del archivo de entrada de datos para los programas de cálculo. Como complemento, estos nuevos programas poseen opciones gráficas que permiten al usuario comprobar el proceso de adaptación de datos de forma paulatina.

Una vez obtenidos los datos de forma tal que pudieran ser calculados los valores de los programas, se demostró el excelente comportamiento del Método Asturiano de cálculo para procesar registros de calidad inferior a los usados en capítulos anteriores, por lo cual resultó el único método posible de aplicar para los ensayos realizados. Y en aquellas ocasiones en donde el resultado al cual llegaba el Método Asturiano no era completamente correcto, sólo hubo que disminuir convenientemente el tiempo total utilizado y efectuar nuevamente el cálculo. En cambio, con el método de Amsinck no se pudo implementar esta ventaja y además mostró fuertes trabas al intentar procesar datos que poseían picos durante el cruce por cero de la corriente, particularidad que no afectaba el cálculo con el Método Asturiano.

Para los ensayos realizados se brinda el circuito original utilizado y también se muestran todos los valores de los parámetros calculados según los métodos aplicables en los intervalos de tiempo especificados. La utilidad de estos valores encuentra motivo en la extrema dificultad de hallar en toda la bibliografía datos relativos a valores de parámetros de modelos de arco aplicables a interruptores de Baja Tensión, además de tener en cuenta que también se dan los valores de los coeficientes de la variación de los parámetros en función de la conductancia, que si bien es una propuesta de variación ya realizada por algunos autores, tampoco se obtienen en la literatura de uso específico, ni para interruptores de Alta Tensión. A lo que se le debe sumar las tablas de valores promedios y dispersiones calculadas para cada modelo y comportamiento.

Durante la realización de los ensayos de variación de ángulo de conexión se comprobó nuevamente la bondad de todo el proceso de cálculo, aún bajo condiciones de solicitación extrema del interruptor. Lo mismo puede decirse de los ensayos que poseen reigniciones del arco, sobre todo para el Método Asturiano.

El análisis de los resultados obtenidos mostró el comportamiento de los valores y permitió además calcular la dispersión para cada caso, identificar y excluir aquellos valores que se alejaban notoriamente del resto de valores distorsionando sus valores promedios.

La realización de las pruebas y la obtención de registros durante todo el tiempo del ensayo permitió mejorar el comportamiento de los modelos de arcos que habían sido incorporados al Alternative Transients Program y así poder simular el ensayo completo, aún desde antes de aplicar tensión al interruptor ensayado. En esta parte del capítulo, también se describen minuciosamente las evoluciones de la corriente y de la tensión según el modelo y comportamiento, brindándose luego una comparación respecto de los valores registrados.

dispersión en sus parámetros y tiene mejor capacidad de apertura para la misma corriente ya que su posición relativa está más alejada de la curva límite de funcionamiento. Por otra parte, estas conclusiones están soportadas por el hecho de que en la práctica el segundo interruptor era nuevo, sin uso, y además pertenece a una nueva generación de interruptores de baja tensión de reciente lanzamiento al mercado internacional; mientras que el primero ya había sido utilizado en un número de veces no posible de determinar, y su tecnología de fabricación ya tiene algunos años de existencia.

Con las conclusiones anteriores es lógico poder determinar, realizando ensayos periódicos, el grado de envejecimiento del interruptor a lo largo de su vida útil a través de la magnitud en la dispersión de los parámetros y de su posición relativa dentro de la gráfica $P_o = f(Q)$.

6.7.4.- COMPARACION ENTRE DISTINTAS CORRIENTES

Como se mencionara anteriormente, para analizar la bondad de un interruptor frente a una corriente determinada se le debe realizar un conjunto de ensayos, determinar sus parámetros y luego calcular su curva límite de funcionamiento. Pero si al mismo interruptor luego se le cambia la corriente del ensayo es posible también analizar su nueva curva límite. Por eso se presenta la figura siguiente donde figuran las curvas límites obtenidas para 350 [A] y 850 [A].

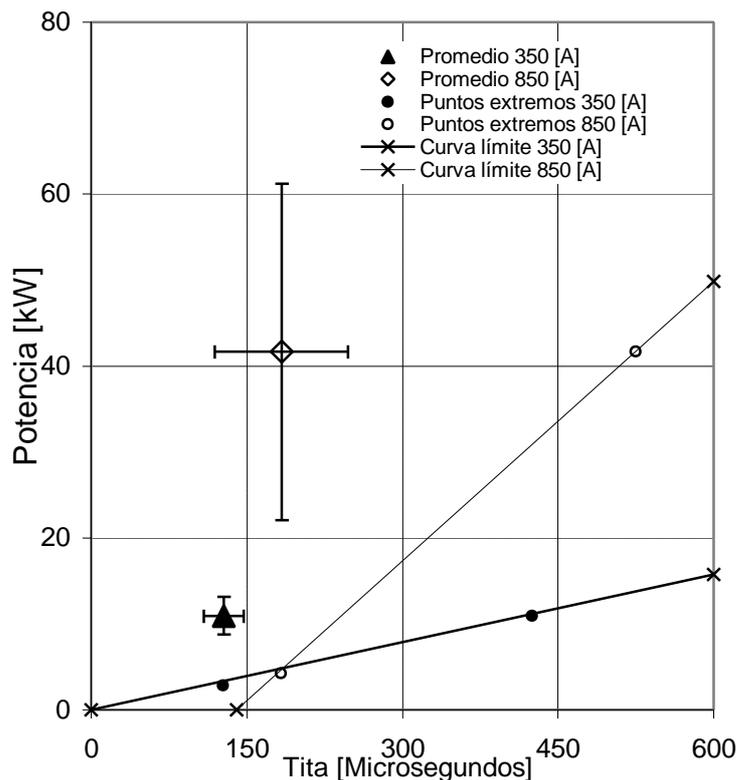


Figura N°6-38: Comparación entre distintas corrientes.

De la gráfica anterior es posible determinar que para corrientes elevadas el grado de dispersión de los parámetros se incrementa notablemente a tal punto que el área abarcada por los valores calculados ya casi toca su curva límite, según puede verse.

línea de división o, de la misma manera, la curva límite corta al rectángulo en dos partes, se puede determinar en base a la relación entre las superficies de cada zona la probabilidad de obtener uno u otro tipo de comportamiento del interruptor. Así también es posible determinar su aptitud o calidad frente al corte de una corriente determinada que debe ser para la cual se han realizado los ensayos respectivos.

6.7.3.- COMPARACION ENTRE DISTINTOS INTERRUPTORES

Para poder comparar entre sí la calidad o aptitud de dos o más interruptores para cortar una determinada corriente, se los debe someter a ambos a ensayos similares realizados en las mismas condiciones generales. Con sólo un ensayo por interruptor alcanza para aplicar la técnica de evaluación descrita, pero de ser posible se debe realizar una batería de pruebas con el fin de poder evaluar convenientemente el grado de dispersión en el cálculo de los parámetros de los modelos.

En la figura siguiente se presentan los pares de valores de los parámetros calculados según los ensayos “GAB*” y “30*” ya que en ambos se utilizó la misma corriente de carga pero cabe recordar que se trata de distintos interruptores. El punto y el triángulo representan los valores promedios de los parámetros y los segmentos que parten desde ellos, son la magnitud de la dispersión obtenida para cada parámetro. La curva límite fue obtenida luego de varias simulaciones del ensayo original a partir de los valores promedios de cada batería.

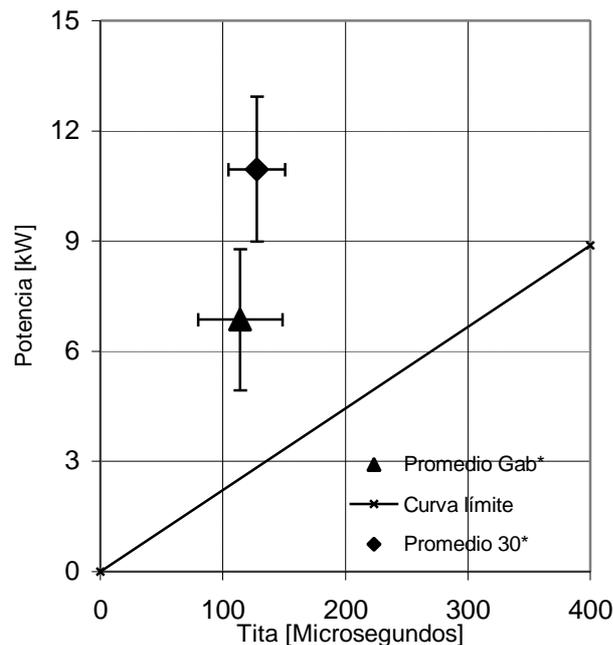


Figura N°6-37: Comparación entre distintos interruptores.

Observando la figura anterior es de notar que para el segundo interruptor ensayado (ensayos “30*”) se tiene que: su posición relativa dentro de la figura se encuentra bastante más alejada de la curva límite, que el grado de dispersión de la constante de tiempo es bastante menor y que la dispersión para la potencia es similar, todo lo anterior comparando con el primer interruptor (ensayos “GAB*”).

Analizando nuevamente la figura y si se tiene en cuenta el párrafo anterior, la conclusión que se extrae es que el segundo interruptor funciona mejor ya que tiene menor

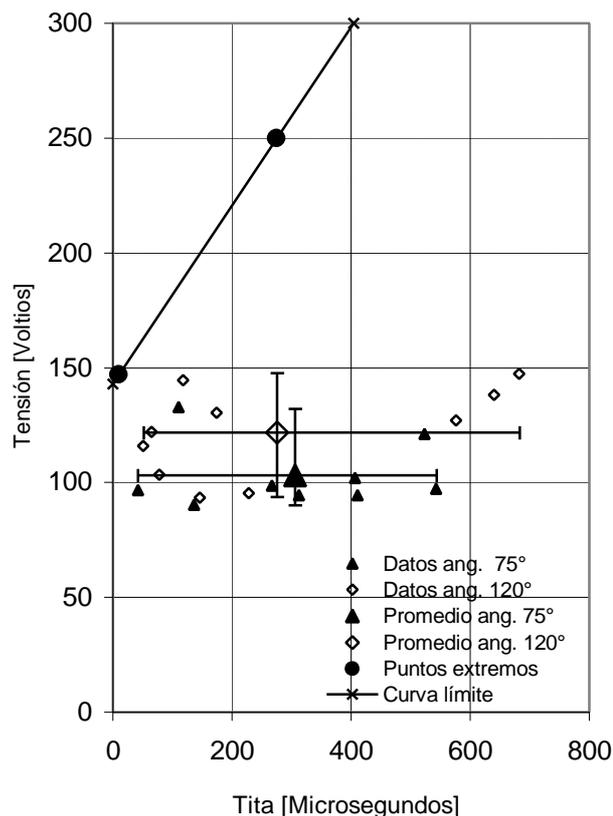


Figura N°6-36: Curva límite del interruptor.

Habiendo dividido el plano en dos partes: una superior donde están los puntos ubicados que simulan aperturas y otra inferior donde están los pares de valores de parámetros para simular reigniciones, la principal conclusión que es posible sacar es que con cualquiera de los valores calculados para el modelo de Cassie con parámetros constantes, siempre se podrán simular sólo reigniciones y que, como los ensayos sólo tienen apertura, el modelo de Cassie no es aplicable para representar los ensayos realizados.

Lo anterior refuerza la región de aplicabilidad de cada modelo ya que la obtención o no de una reignición con el modelo de Cassie es a consecuencia de la variación de los parámetros en una región que está alejada del paso por cero de la corriente, lo que implica que en realidad la conducta de modelo de Cassie, analizada para el cero de corriente, es una consecuencia de lo que ocurre mucho antes durante el ensayo y la variación de los parámetros no es una acción directa de control como la que se ejerce con el modelo de Mayr.

6.7.2.- DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL INTERRUPTOR

Si se tiene en cuenta además del valor promedio, al resto de valores de los parámetros calculados, se podrá dibujar un rectángulo en cuyo centro se encuentre los promedios de P_o y Q , y cuyos lados sean de una longitud tal que, dentro de él se encuentren todos los pares de valores calculados para la batería de ensayos. Tal cual lo esquematizado en la figura anterior.

Del rectángulo así obtenido se puede determinar que: su baricentro lo ocupa el punto que representa los valores promedios de P_o y Q , la longitud de cada lado es indicador del grado de dispersión del parámetro involucrado y su posición relativa dentro de la gráfica $P_o = f(Q)$, indica qué tan acusado es el comportamiento del interruptor durante el ensayo. Si por ejemplo, la dispersión de los parámetros es tal que el rectángulo toca y/o sobrepasa la

los siguientes valores promedios: $P_o = 6,86 \pm 1,08$ [kW] y $Q = 114,3 \pm 18,23$ [μ s]. A partir de estos se comienza por mantener invariable la constante de tiempo y se disminuye el valor de P_o hasta obtener una simulación de una reignición, dicho valor es $P_o = 2,6$ [kW]. De la misma manera, manteniendo fijo P_o y variando la constante de tiempo, se llega al valor $Q = 310$ [μ s] con lo cual se obtienen los dos puntos extremos que se buscaban: P1 (con $P_o = 2,6$ [kW] y $Q = 114$ [μ s]) y P2 (con $P_o = 6,9$ [kW] y $Q = 310$ [μ s]).

Para finalizar, se unen los puntos calculados con una recta con lo cual se obtiene la división de la gráfica original en dos partes: una superior en donde se sitúan los valores de los parámetros para simular aperturas exitosas y otra parte inferior en donde se obtienen las reigniciones del interruptor. Tal es el caso de la figura que se presenta a continuación.

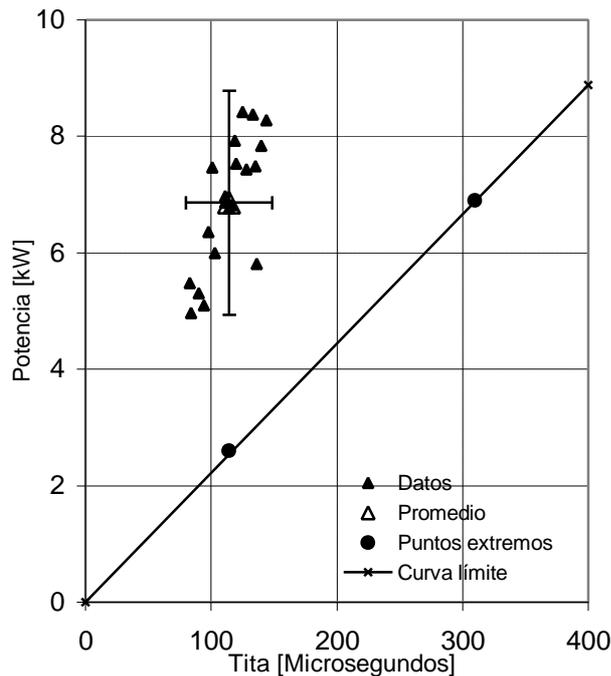


Figura N°6-35: Curva límite del interruptor.

Para finalizar es posible determinar los valores de los coeficientes de la ecuación de la recta, $y = A+Bx$, que une los puntos límites. Para el caso estudiado $A = 0,01751$ y $B = 0,02216$; aunque en la gráfica se forzó a la recta a pasar por el origen de coordenadas.

Cualquier par de valores de P_o y Q que pertenezcan a la parte inferior de la figura, serán capaces de simular una reignición y, de la misma manera, cualquier par de valores de la parte superior simulará una apertura exitosa del interruptor bajo las mismas condiciones del ensayo realizado. Como es lógico suponer, el par de valores escogidos cuanto más se aleje de la curva límite y más se interne dentro de cada zona, será capaz de simular el comportamiento de forma mucho más acusada que si se sitúa cerca de la línea de división.

De la misma manera que lo realizado anteriormente a partir de la figura 6-14 con los parámetros de la ecuación de Mayr, es posible realizar lo mismo pero a partir de la figura 6-17 con los de la ecuación de Cassie. Así, realizando varias simulaciones es posible también dividir el plano de la gráfica de $U_o = f(Q)$ teniendo en cuenta los puntos extremos calculados a partir de los valores promedios de U_o y Q .

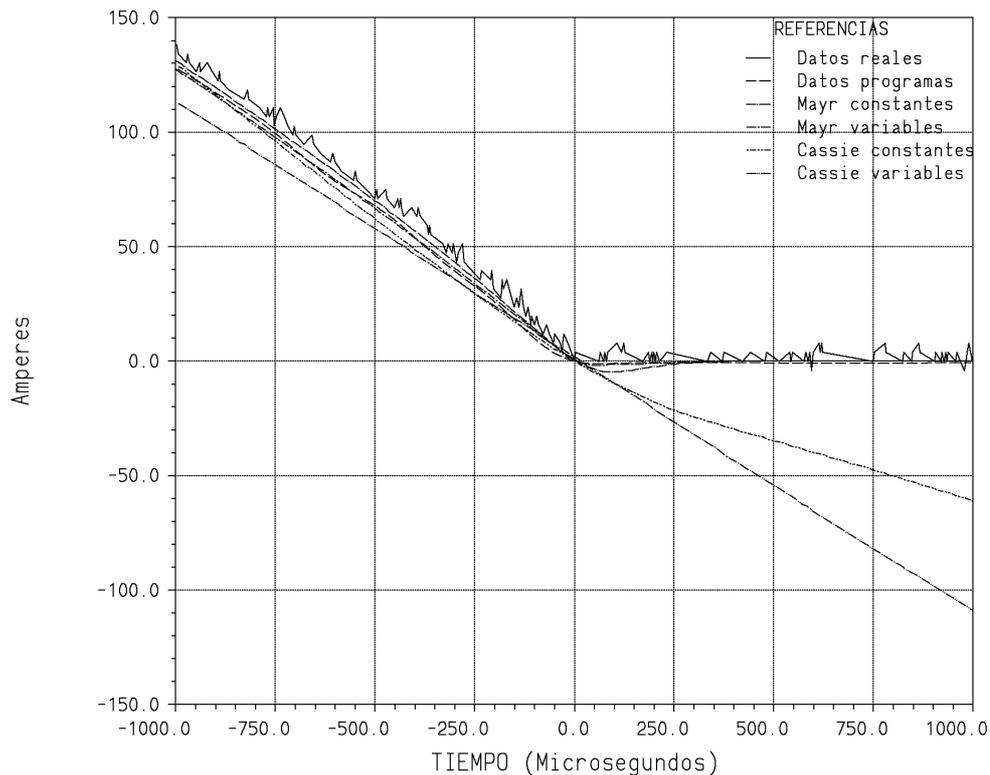


Figura N°6-34: Comparación entre las simulaciones y la corriente obtenida para la región próxima al cero.

6.7.- APLICACIONES

A continuación se detallan aquellas aplicaciones que presentan mayor utilidad en la práctica para el estudio y análisis del funcionamiento de interruptores en Baja Tensión. Lo que sigue fue realizado teniendo en cuenta a la totalidad de ensayos realizados.

6.7.1.- DETERMINACIÓN DE LA CURVA LÍMITE DE OPERACIÓN DEL INTERRUPTOR

Se llama curva límite de operación del interruptor a una línea recta que divide una gráfica del tipo $P_o = f(Q)$, en dos partes: en una de ellas se encuentran los valores de los parámetros de la ecuación de Mayr con los cuales es posible simular aperturas del interruptor, y en la otra están los valores para simular reigniciones, siempre y cuando se esté hablando bajo las mismas condiciones de operación del interruptor.

La determinación de la curva límite del interruptor se realiza, como se dijo en el párrafo anterior, a partir de una gráfica $P_o = f(Q)$ similar a las obtenidas en el ítem 6.5 y a partir del valor promedio de los parámetros calculados en esas condiciones. Realizando tantas simulaciones como sea necesario es posible determinar los valores de los parámetros para los cuales se puede simular uno u otra conducta del interruptor. En este sentido, la manera más sencilla es variar adecuadamente un solo parámetro por vez y una vez obtenido el valor, recomenzar haciendo lo mismo pero con el otro parámetro.

Tomando como base la figura 6-14 y unificando los resultados de los ensayos realizados con distinto ángulo de conexión para el mismo interruptor, es posible determinar

aquel que se aproxima mejor a los valores reales, siendo despreciable el error gráfico que cometen los programas de cálculo de parámetros.

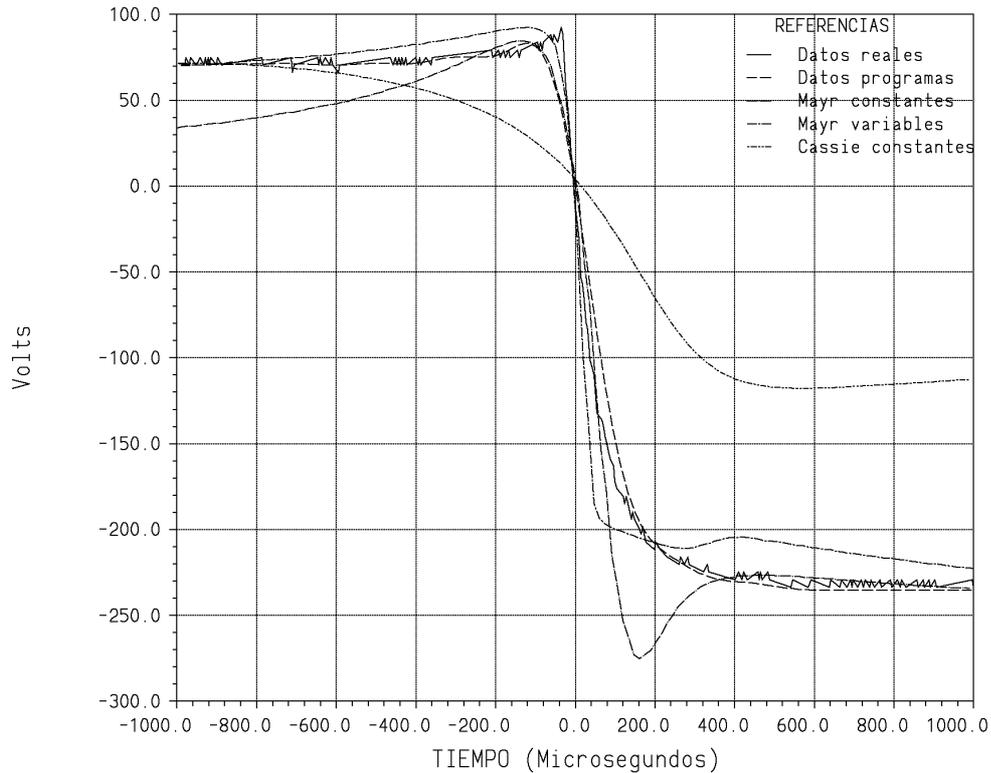


Figura N°6-33: Comparación entre las simulaciones y la tensión obtenida para la región próxima al cero.

Del análisis de la ampliación del paso por cero de las corrientes para las distintas simulaciones, es posible hacer dos comentarios: el primero de ellos se refiere al comportamiento notoriamente distintos de los modelos en estudio para representar la apertura del arco y, segundo, que tampoco existen divergencias gráficas entre los valores reales y los gráficos obtenidos como resultado de la utilización de los programas de cálculo de parámetros.

Hablando específicamente del modelo de Mayr, es también posible observar en la figura siguiente, una pequeña corriente de post-arco que se manifiesta sólo con parámetros constantes y que no fue registrada durante el ensayo aunque su magnitud real pudiera haber sido no apreciable por el circuito de medición.

Como resumen de la utilidad de los modelos y comportamientos mostrados en estos ítems es posible clasificar al modelo de Mayr con parámetros variables como el más apto para simular el ensayo seleccionado, seguido por el mismo modelo pero con parámetros constantes; al modelo de Cassie le corresponde el tercer lugar con parámetros constante y con parámetros variables el cuarto ya que no pudo simular la apertura del arco con los valores de los parámetros calculados

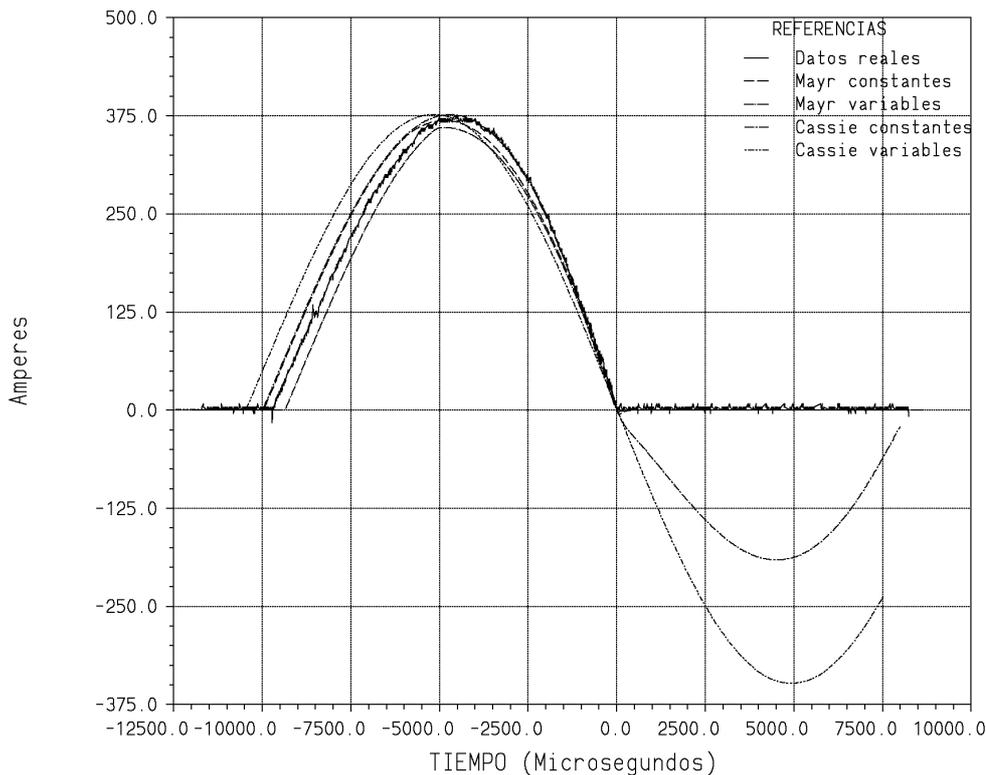


Figura N°6-32: Comparación entre las simulaciones y la corriente obtenida para todo el tiempo registrado.

Las corrientes resultantes de las simulaciones del “GAB8” se presentan en la figura anterior donde ahora sí, se incluyó el modelo de Cassie con parámetros variables que simula el comportamiento normal de la corriente a través del circuito de ensayo.

Las corrientes impuestas por el modelo de Mayr muestran una coincidencia prácticamente total en su evolución para ambas simulaciones, mientras que Cassie con parámetros variables es el que más se aleja de la curva real, lo cual era de esperarse. Independientemente del modelo o comportamiento del cual se trate, a grandes rasgos, la evolución de las corrientes para las distintas simulaciones son muy similares entre sí para instantes antes de su paso por cero, luego del cual se manifiestan sus diferencias en función de la obtención o no de la apertura del arco.

6.6.3.- RESULTADO DE LAS SIMULACIONES PARA LA REGIÓN PRÓXIMA AL CERO

Las figuras que se presentan a continuación son una ampliación, entre ± 1000 [μs], de las dos anteriores a las que se le agregó la evolución de la tensión y de la corriente respectivamente, pero halladas gráficamente como resultado de la aplicación de los programas de cálculo de parámetros a los datos originales. La finalidad de agregar la salida gráfica de los programas de cálculo a las simulaciones fue la de poder evaluar posibles arrastres de errores cometidos durante la metodología aplicada.

Al igual que la figura original, el modelo de Cassie con parámetros variables no se presenta aquí, donde es posible ver la excelente aproximación del modelo de Cassie para 1000 [μs] antes del paso por cero aunque luego no logre simular la apertura del arco. Por su parte y tal cual se mencionara anteriormente, es el modelo de Mayr con parámetros variables

los parámetros. Como puede verse, en la figura se representa todo el tiempo registrado del ensayo desde momentos antes del ensayo hasta la apertura del interruptor de respaldo del circuito.

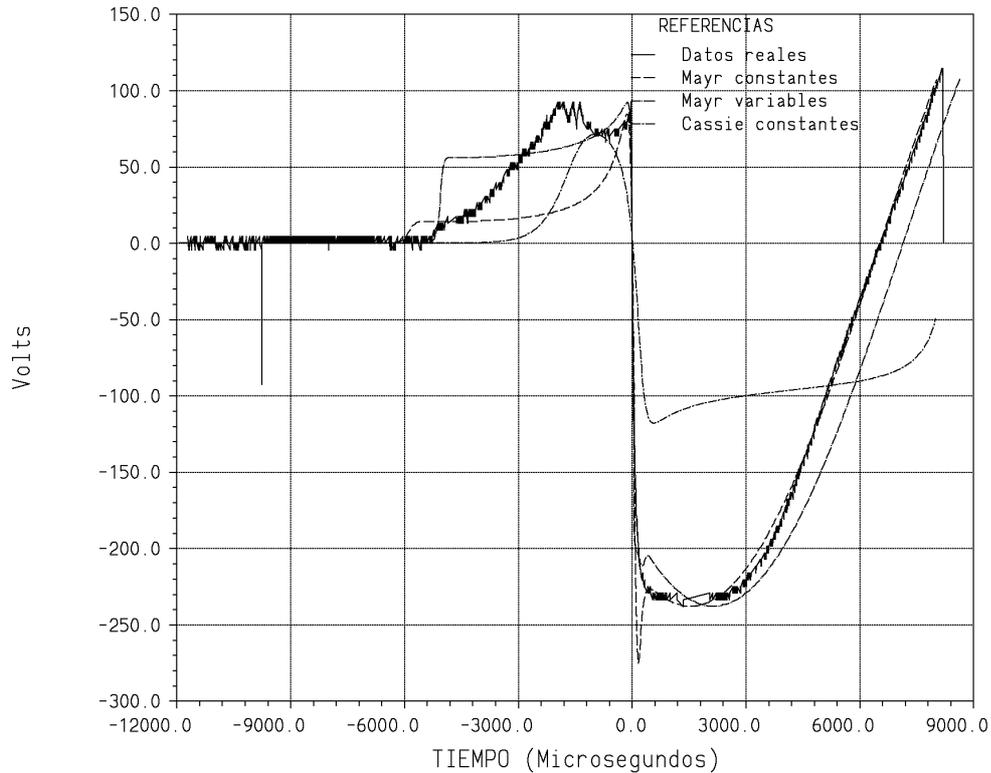


Figura N°6-31: Comparación entre las simulaciones y la tensión obtenida para todo el tiempo registrado.

El análisis de la figura anterior muestra que el modelo de Mayr con parámetros constantes es el primero en establecer el arco seguido por el mismo modelo pero con parámetros variables; por último y de forma más paulatina, es el modelo de Cassie. La forma general de las evoluciones de las tensiones según Mayr, muestra un comportamiento distinto ya que con parámetros variables la curva mantiene un valor casi constante mientras que, con parámetros constantes, su variación es mayor, aunque ambas denotan la presencia de picos justo antes y después del paso por cero.

Para el modelo de Cassie, se puede observar la reignición del arco, hecho éste que se manifiesta luego del paso por cero y sin intentar lograr la apertura por un instante. Los valores de los parámetros están calculados a partir de 1000 [μs] antes del cero, lo cual puede apreciarse en la figura donde se manifiesta una excelente coincidencia entre el valor de tensión resultante de la simulación y el valor real registrado.

Luego del paso por cero, es el modelo de Mayr con parámetros constantes el que posee el mayor pico de tensión, mientras que con parámetros variables presenta una desincronización respecto de los valores reales que, como en realidad lo que más importa es la simulación o no de la apertura, no tiene importancia. Y si en realidad, lo que interesa es la magnitud de la tensión impuesta por el circuito luego de la apertura del arco, el modelo de Mayr con parámetros variables es el que mejor representa este valor.

circulación con lo cual mantiene la existencia del arco eléctrico entre los contactos del interruptor.

Por lo tanto, la utilización con parámetros constantes del modelo de Cassie, no fue capaz de simular la apertura del arco tal cual lo ocurrido durante el ensayo original. Si se quisiera, modificando adecuadamente los valores de los parámetros del modelo, se puede obtener la apertura del arco; no obstante, los valores usados aquí responden a los calculados oportunamente.

En la figura siguiente se presenta una simulación pero esta vez usando al modelo de Cassie con parámetros variables con la conductancia. Aquí es posible observar que no se produce la apertura del arco permaneciendo la tensión siempre igual a cero mientras que la corriente responde a la forma general impuesta por la fuente de tensión.

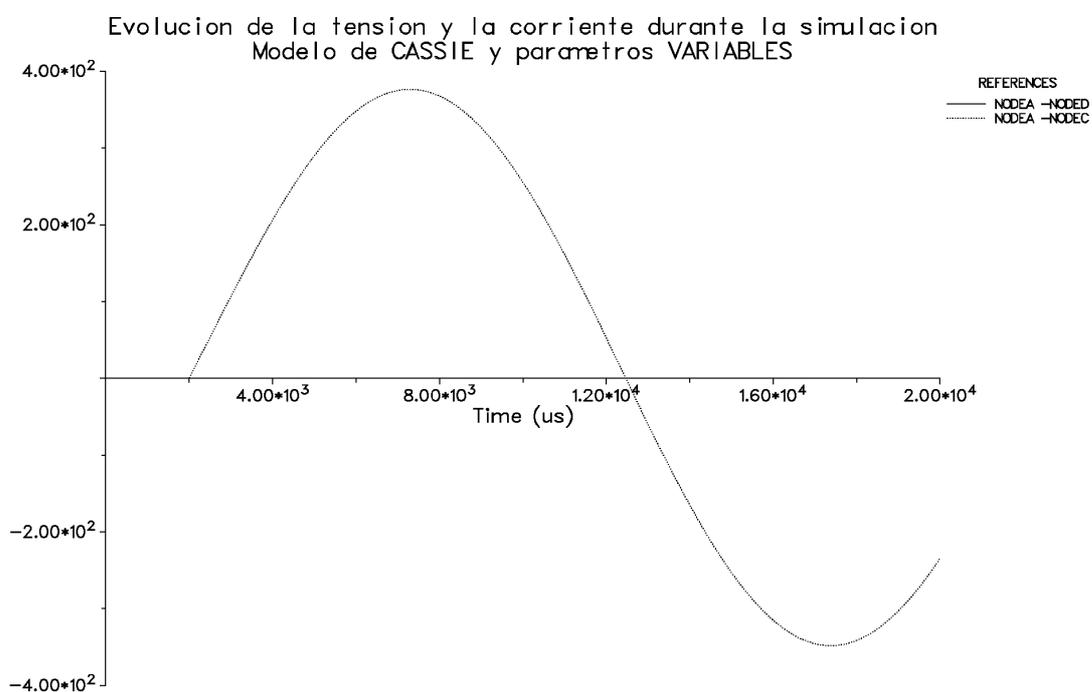


Figura N°6-30: Simulación de los ensayos usando el modelo de Cassie con parámetros variables.

El origen del comportamiento del modelo para esta simulación se debe al muy alto valor de la constante de tiempo que se traduce en el comienzo de la separación de contactos para un tiempo posterior al simulado. Al igual que el caso precedente, aquí es posible obtener la apertura del arco actuando sobre el valor de la constante de tiempo.

6.6.2.- RESULTADO DE LAS SIMULACIONES PARA TODO EL ENSAYO

La figura siguiente muestra la evolución general de la tensión registrada durante el ensayo “GAB8” a la cual se superponen las distintas simulaciones, todas ellas sincronizadas respecto del primer paso por cero al cual le corresponde el cero de tiempo. La simulación empleando el modelo de Cassie con parámetros variables no se ha incluido ya que la tensión siempre vale cero. Las oscilaciones que presentan los datos originales son a consecuencia del circuito de medición y captura de datos y se han respetado durante el cálculo de los valores de

En la figura anterior es posible ver el comienzo de la separación galvánica de los contactos que se produce alrededor de 600 [μs] y a partir de este instante y como consecuencia de la existencia del arco eléctrico, comienza a existir una resistencia en serie con el circuito de carga cuyo valor depende de la resolución del modelo utilizado. Este valor de resistencia, que crece rápidamente y luego se incrementa paulatinamente hasta llegar a un máximo instantes después del cruce simultáneo por cero de la corriente y de la tensión, es la razón por la cual el semiciclo positivo de la corriente no es una onda sinusoidal pura como era de esperarse. Por lo tanto, al modificarse el circuito original por el agregado en serie de la resistencia del arco, es la razón tanto de la forma de la corriente como también de la variación del factor de potencia, que luego se verá más en detalle al sincronizar los resultados de varios modelos con las mediciones realizadas.

Para esta simulación con parámetros variables, la corriente post-arco es de menor amplitud que con parámetros constantes al igual que el pico que presenta la tensión luego del primer paso por cero.

Como se pudo apreciar, la utilización de parámetros variables en el modelo de Mayr, también fue capaz de reproducir la apertura del interruptor tal cual lo sucedido en “GAB8”.

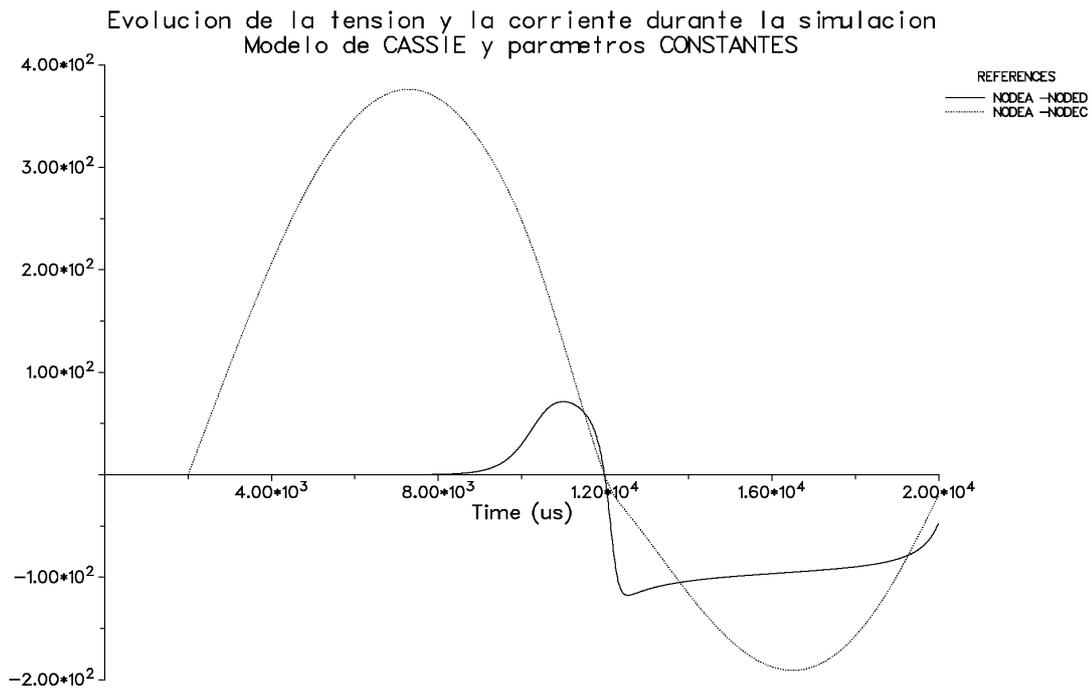


Figura N°6-29: Simulación de los ensayos usando el modelo de Cassie con parámetros constantes.

El resultado de la utilización del modelo de Cassie puede verse en la figura 6-30, la cual presenta una variación muy pequeña para la tensión al comienzo del arco, la cual aumenta para unos microsegundos antes del primer paso por cero lo que origina que la forma general de la corriente que circula sea prácticamente una senoidal, ya que no se nota el agregado al circuito de la resistencia del arco. Luego del paso por cero de la tensión, es posible ver que la corriente ni siquiera intenta anularse por un instante y prosigue su

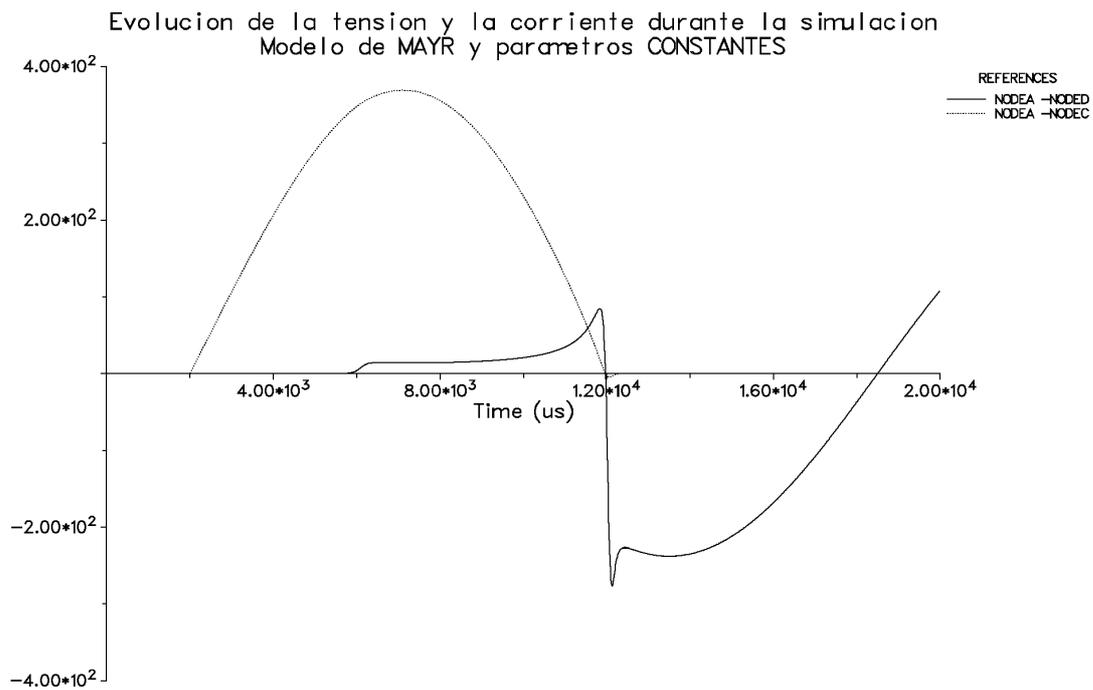


Figura N°6-27: Simulación de los ensayos usando el modelo de Mayr con parámetros constantes.

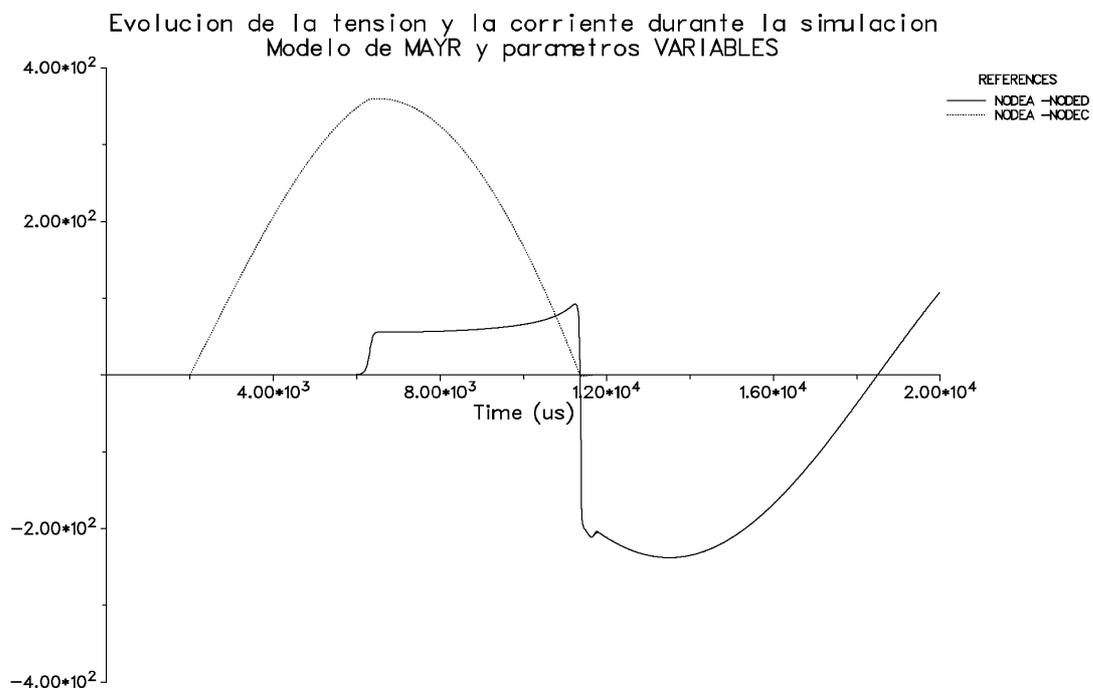


Figura N°6-28: Simulación de los ensayos usando el modelo de Mayr con parámetros variables.

VALORES DE PARAMETROS CORRESPONDIENTES AL ENSAYO “GAB8”				
Modelo	Estado	Parámetro	Valor	Unidad
Mayr	Constante	Potencia	5,11	[kW]
		Tita	87,0	[μs]
	Variable	Potencia	$5366,0 \cdot g^{0,604}$	[kW]
		Tita	$45,7 \cdot g^{0,09}$	[μs]
Cassie	Constante	Tensión	94,58	[V]
		Tita	411,0	[μs]
	Variable	Tensión	$367,14 \cdot g^{0,086}$	[kV]
		Tita	$544,5 \cdot g^{0,873}$	[μs]

Tabla N°6-18: Valores de los parámetros usados en las simulaciones.

Para el cálculo de los parámetros se utilizaron los registros obtenidos desde 500 [μs] antes del cero de la corriente, hasta 250 [μs] después, para el modelo de Mayr mientras que para el de Cassie los valores usados van desde -1000 [μs] hasta +500 [μs]. No obstante esto, las simulaciones se realizaron incluyendo las distintas etapas por las cuales pasa un test bajo condiciones de cortocircuito.

6.6.1.- DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS MODELOS

La figura 6-28 presenta el comportamiento del modelo de Mayr utilizando parámetros constantes para simular el ensayo realizado sobre un interruptor de baja tensión, pudiéndose observar la evolución de la corriente y la tensión durante todo el test, ambas en línea a puntos y línea continua respectivamente.

La existencia de los picos de tensión es a consecuencia del funcionamiento del modelo matemático, mientras que es posible observar una pequeña corriente que circula en sentido contrario luego del primer paso por cero de la misma. La existencia de dicha corriente junto con el pico de tensión, da origen al primer pico de resistencia de arco luego del paso por cero; luego de decrecer momentáneamente, este valor aumenta definitivamente hasta lograr la apertura definitiva del arco. El comportamiento de la tensión luego de la apertura definitiva que se concreta para un tiempo de 1300 [μs], es el de seguir la tensión impuesta al circuito por la fuente de tensión tal cual puede verse en la parte final de la figura.

Independientemente de los valores puntuales que asuma la corriente o la tensión durante el ensayo, en la figura 6-28 es posible ver que el modelo de Mayr con parámetros constantes fue capaz de reproducir la apertura del interruptor durante el ensayo.

En la tabla anterior, la 6-16 que resume los resultados calculados según los oscilogramas “80*”, hubo que extraer los ensayos “808” y “809” ya que distorsionan los valores promedios para el cálculo de la tensión de Cassie como variable.

ENSAYOS DE VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE CONEXIÓN					
Modelo	Estado	Parámetro	Valor	Dispersión	Unidad
Mayr	Constante	Potencia	7,394	$\pm 1,646$	[kW]
		Tita	104,7	$\pm 19,9$	[μ s]
	Variable	Potencia	$9122,67.g^{0,26829}$	$\pm 1729,86 - 1423,24.g + 761,91.g^2$	[kW]
		Tita	$133,507.g^{0,31029}$	$\pm 47,0675.g^{0,48396}$	[μ s]
Cassie	Constante	Tensión	247,3	$\pm 78,97$	[V]
		Tita	126,4	$\pm 34,7$	[μ s]
	Variable	Tensión	$552,752.g^{0,20651}$	$\pm 144,525.g^{0,55446}$	[kV]
		Tita	$535,019.g^{0,80779}$	$\pm 129,318.g^{0,84413}$	[μ s]

Tabla N°6-17: Resumen de los valores de los parámetros para los ensayos de variación del ángulo de conexión.

6.6.- SIMULACIONES

Las simulaciones que se presentan a continuación han sido realizadas empleando el circuito de la figura 6-8 y los datos extraídos del ensayo “GAB8” para el cual se presenta un resumen de valores de los parámetros en la tabla 6-18, y que fue elegido al azar entre todos los demás. El tiempo total de la simulación fue de 20 [ms] y el paso de tiempo utilizado de 1 [μ s]. La corriente máxima que circula por la carga es de 375 [A] aproximadamente mientras que la tensión de la fuente es de 238 [V] [4-9].

Los modelos de arco utilizados han sido el propuesto por Mayr y el de Cassie, ambos con parámetros constantes en el tiempo y también como variables de la conductancia [10-13].

Los valores calculados de los parámetros de los modelos de arco, se respetan absolutamente e independientemente del resultado de la simulación y, como el lector podrá suponer, modificando de manera adecuada estos valores se podrá influenciar en los resultados de la simulación pero no es éste el caso, aquí solamente se utilizan los valores previamente calculados.

cálculo de la tensión de Cassie como variable fue excluido el ensayo “308”, al igual que el “308” y “309” para el cálculo de la constante de tiempo. Todo lo anterior, siempre con parámetros tratados como variables.

ENSAYOS DE REPETICIÓN VARIANDO LA CORRIENTE.					
Modelo	Estado	Parámetro	Valor	Dispersión	Unidad
Mayr	Constante	Potencia	10,95	$\pm 1,27$	[kW]
		Tita	127,8	$\pm 11,6$	[μ s]
	Variable	Potencia	$18602,0 \cdot g^{0,436861}$	$\pm 5073,51 \cdot g^{1,015358}$	[kW]
		Tita	$169,947 \cdot g^{0,311604}$	$\pm 84,16627 \cdot g^{0,371216}$	[μ s]
Cassie	Constante	Tensión	179,46	$\pm 18,01$	[V]
		Tita	95,87	$\pm 52,8$	[μ s]
	Variable	Tensión	$667,827 \cdot g^{0,268108}$	$\pm 436,637 \cdot g^{0,398907}$	[kV]
		Tita	$1033,605 \cdot g^{0,867650}$	$\pm 603,506 \cdot g^{0,929837}$	[μ s]

Tabla N°6-15: Resumen de los valores de los parámetros para los ensayos de repetición con corriente de 350 [A].

ENSAYOS DE REPETICIÓN VARIANDO LA CORRIENTE.					
Modelo	Estado	Parámetro	Valor	Dispersión	Unidad
Mayr	Constante	Potencia	41,64	$\pm 9,17$	[kW]
		Tita	183,6	$\pm 28,43$	[μ s]
	Variable	Potencia	$61417-16031 \cdot g+285057 \cdot g^2$	$\pm 420552 \cdot g^{2,217219}$	[kW]
		Tita	$422,427 \cdot g^{0,859979}$	$\pm 143,979 \cdot g^{1,438634}$	[μ s]
Cassie	Constante	Tensión	222,07	$\pm 33,91$	[V]
		Tita	181,79	$\pm 88,8$	[μ s]
	Variable	Tensión	$703,950 \cdot g^{0,413262}$	$\pm 353,804 \cdot g^{0,625342}$	[kV]
		Tita	$564,599 \cdot g^{0,799463}$	$\pm 225,963 \cdot g^{0,773597}$	[μ s]

Tabla N°6-16: Resumen de los valores de los parámetros para los ensayos de repetición con corriente de 850 [A].

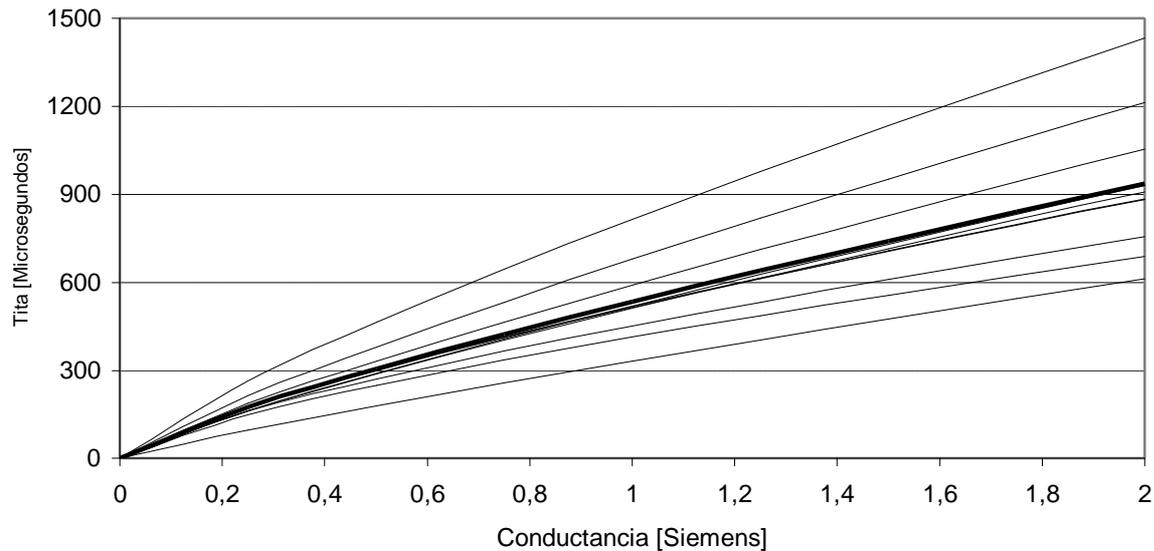


Figura N°6-26: Evolución de la constante de tiempo para todos los ángulos de conexión.

6.5.4.- RESUMEN DE RESULTADOS

ENSAYOS DE REPETICIÓN					
Modelo	Estado	Parámetro	Valor	Dispersión	Unidad
Mayr	Constante	Potencia	6,86	± 1,08	[kW]
		Tita	114,3	± 18,2	[μs]
	Variable	Potencia	$8961,66 \cdot g^{0,49491}$	$\pm 3567,03 \cdot g^{0,85129}$	[kW]
		Tita	$138,397 \cdot g^{0,46638}$	$\pm 83,8286 \cdot g^{0,8226}$	[μs]
Cassie	Constante	Tensión	112,95	± 18,75	[V]
		Tita	290,0	± 210,7	[μs]
	Variable	Tensión	$443,303 \cdot g^{0,13997}$	$\pm 176,856 \cdot g^{0,35088}$	[kV]
		Tita	$668,611 \cdot g^{0,89250}$	$\pm 63,2594 \cdot g^{1,16604}$	[μs]

Tabla N°6-14: Resumen de los valores de los parámetros para los ensayos de repetición.

En la tabla anterior, que resume los ensayos “Gab*”, fue excluido el oscilograma “Gab9” para los cálculos de los parámetros como constantes según Cassie ya que sus valores ($U_o = 150$ [V] y $Q = 695$ [μs]) se alejan del resto, sobre todo su constante de tiempo.

Para la confección de la tabla 6-15, que resume los valores calculados con una corriente de 350 [A] (ensayos “30*”), fue necesario quitar el ensayo “309” para los cálculos que corresponden al modelo de Mayr ya que este ensayo se aleja notoriamente del resto, ya sea para la potencia como para la constante de tiempo. De la misma manera, pero para el

que el “Wal7” dio un valor de tensión de 638 [V]. Con los valores restantes se calculó el valor promedio de la tensión de Cassie que se muestra en la figura siguiente.

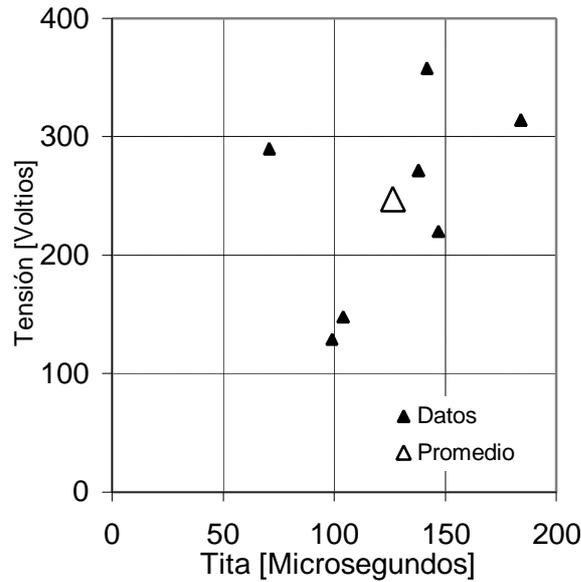


Figura N°6-24: Gráfica de $U_o = f(Q)$ para todos los ángulos de conexión.

Al igual de lo sucedido para parámetros constantes, en la figura siguiente, que representa la evolución de la potencia del modelo de Mayr para un comportamiento variable con la conductancia, los archivos “Wal4” y “Wal7” fueron eliminados expresamente ya que los valores que asumía la potencia influenciaban negativamente el cálculo del promedio del resto de ensayos que presentan un comportamiento semejante entre sí.

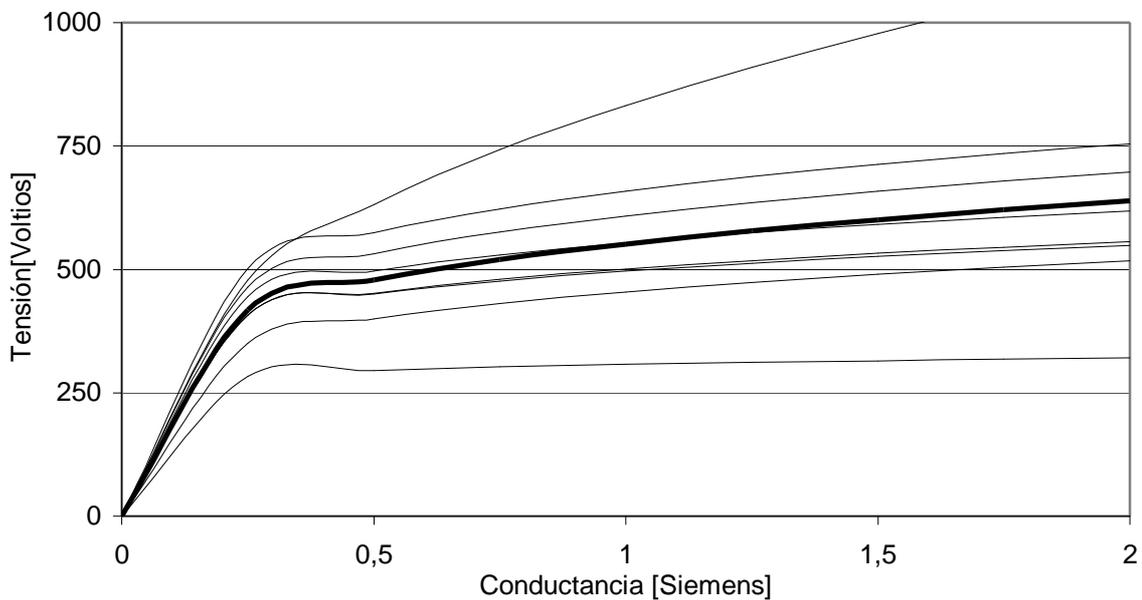


Figura N°6-25: Evolución de las tensiones para todos los ángulos de conexión.

Por último, el análisis de la figura que muestra la evolución de la constante de tiempo para el modelo de Cassie no muestra nada extraño a lo ya descrito en éste ítem: en todos los ensayos, la constante de tiempo, se comporta de manera similar.

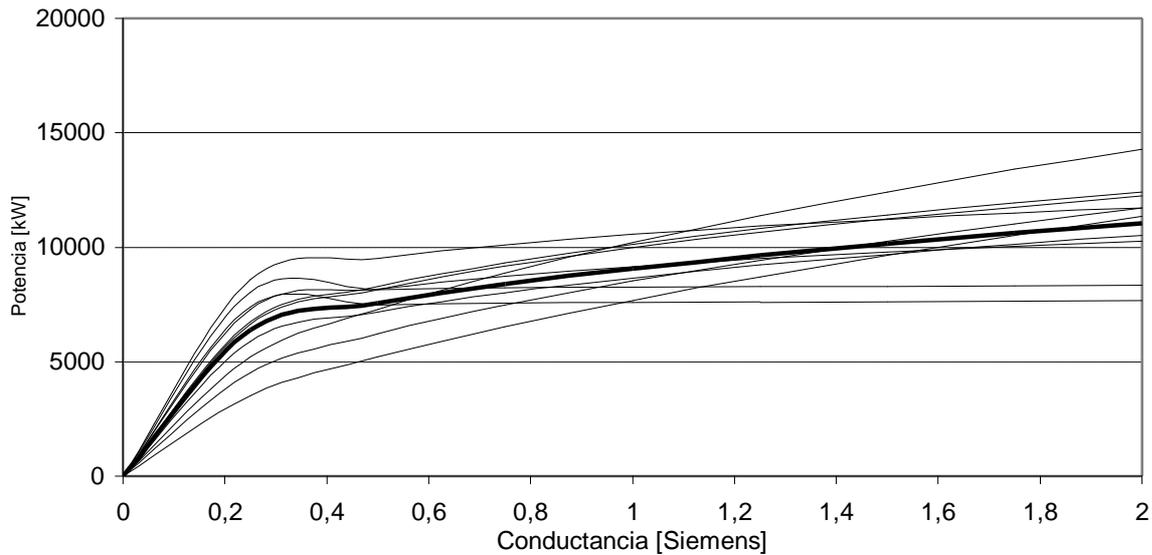


Figura N°6-22: Evolución de las potencias para todos los ángulos de conexión.

Según se desprende del análisis de la figura anterior la cual grafica la evolución de los valores de la potencia del modelo de Mayr como dependientes de la conductancia, dichas curvas se pueden juntar en dos tipos de comportamientos, uno de los cuales rápidamente asume un valor de potencia y luego se mantiene casi constante con la conductancia y otro grupo que posee una variación homogénea con el crecimiento de éste última. En cambio, para la constante de tiempo del mismo modelo, los valores que asumen los resultados muestran un grado de dispersión mayor que el anterior, provocado sin duda por el origen dispar de las condiciones de ensayos para cada caso en particular.

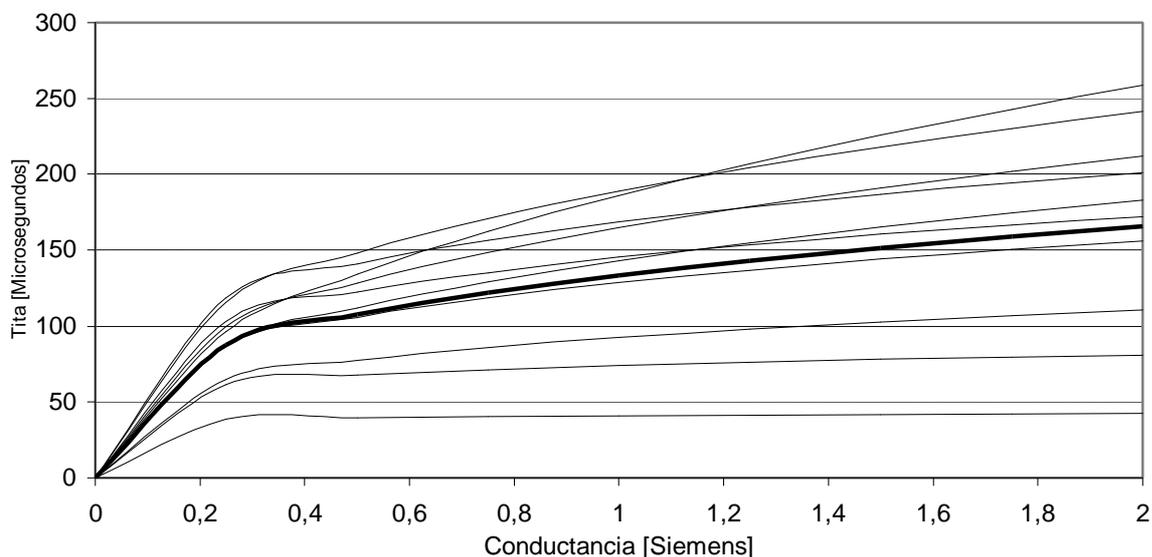


Figura N°6-23: Evolución de la constante de tiempo para todos los ángulos de conexión.

6.5.3.2.- Modelo de Cassie

Para hacer un buen análisis de los valores de los parámetros obtenidos para el modelo de Cassie tratados como constantes, hubo que eliminar los siguientes ensayos: el “Wal4” ya que su valor de constante de tiempo ascendía a 689 [μs] valor muy superior al resto de valores, lo mismo ocurrió con el “Wal11” en cual dio para Tita un valor de 351 [μs], mientras

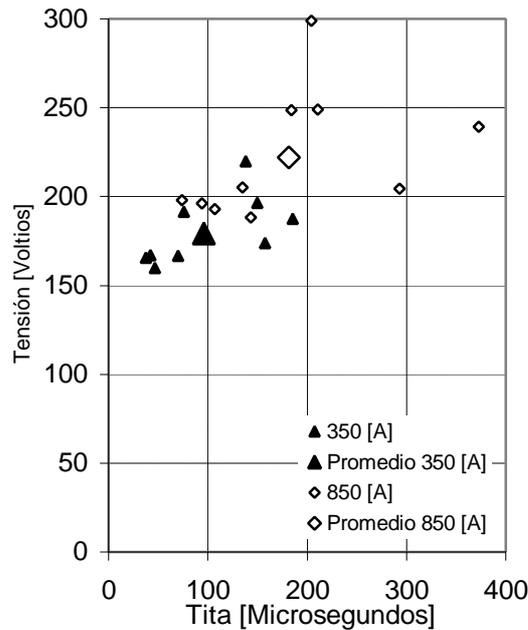


Figura N°6-20: Gráfica de $U_o = f(Q)$ para las dos corrientes.

Por su parte, la gráfica de $U_o = f(Q)$ también presenta un grado de dispersión mayor a mayor corriente, pero la magnitud de tal incremento es mucho menor que para el caso anterior de $P_o = f(Q)$, manteniéndose constante la forma de la distribución de valores calculados para ambas corrientes.

6.5.3.- ENSAYOS DE VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE CONEXIÓN

6.5.3.1.- Modelo de Mayr

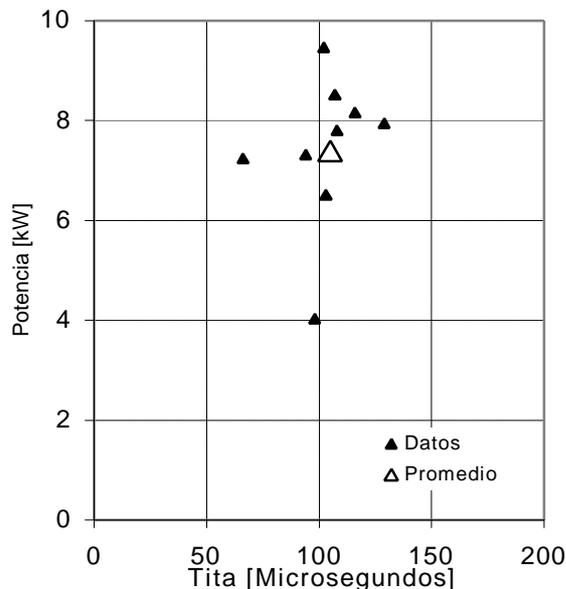


Figura N°6-21: Gráfica de $P_o = f(Q)$ para todos los ángulos de conexión.

A pesar de variar el ángulo de conexión de la carga durante esta batería de ensayo, se puede ver que los valores de la potencia del modelo de Mayr, se mantienen dentro de valores razonables y solamente uno de ellos muestra un mayor alejamiento del resto de valores calculados.

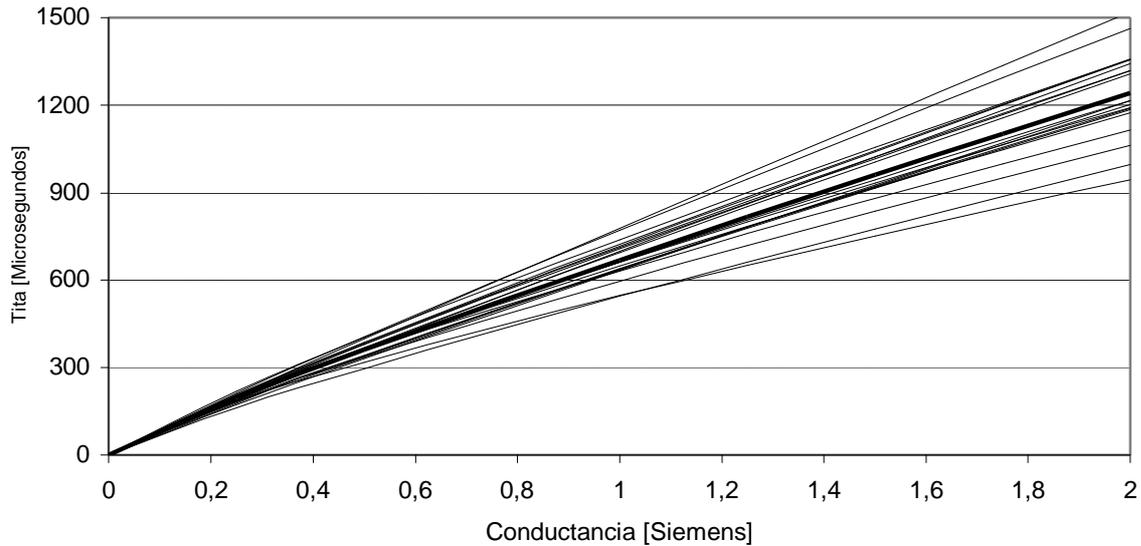


Figura N°6-18: Evolución de la constante de tiempo para todos los ensayos de repetición.

Hablando en forma general, si la evolución de la tensión de la fórmula de Cassie presenta una forma bien definida, más aún debe decirse lo mismo del comportamiento de la constante de tiempo de Cassie ya que, como puede observarse en la figura anterior, todos los valores hallados para los veinte ensayos son muy coincidentes en su forma general de variación.

6.5.2.- ENSAYOS DE REPETICIÓN VARIANDO LA CORRIENTE

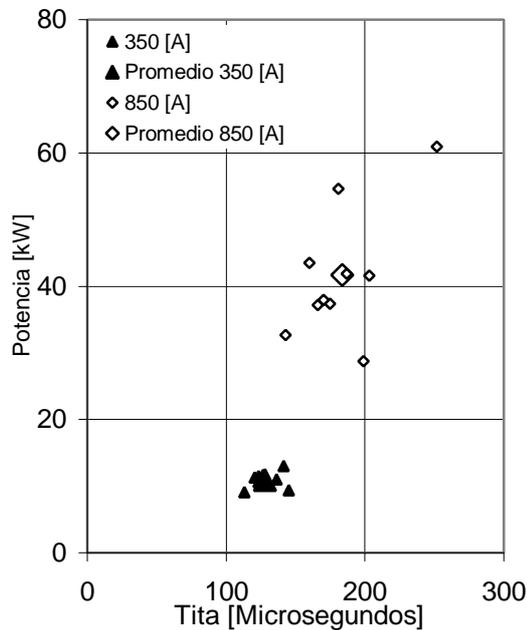


Figura N°6-19: Gráfica de $P_o = f(Q)$ para las dos corrientes.

La figura presentada con anterioridad presenta a modo de gráfica los valores de los parámetros del modelo de Mayr obtenidos para las dos baterías con distintas corrientes. Es simple determinar que el grado de dispersión de los parámetros es proporcional a la magnitud de la corriente que se interrumpe y el valor de los parámetros en sí, son también funciones de la corriente.

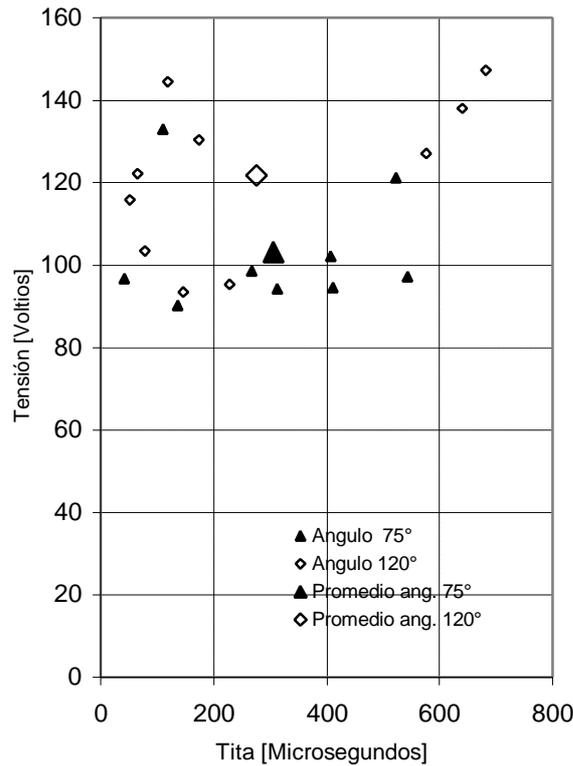


Figura N°6-16: Gráfica de $U_o = f(Q)$ para los dos ángulos de conexión.

La figura anterior presenta los resultados numéricos obtenidos habiéndose excluido el oscilograma “Gab9” ya que sus valores ($U_o = 150$ [V] y $Q = 695$ [μ s]) se alejan notoriamente del resto cuyo valor promedio es $U_o = 103$ [V] y $Q = 306$ [μ s] aproximadamente.

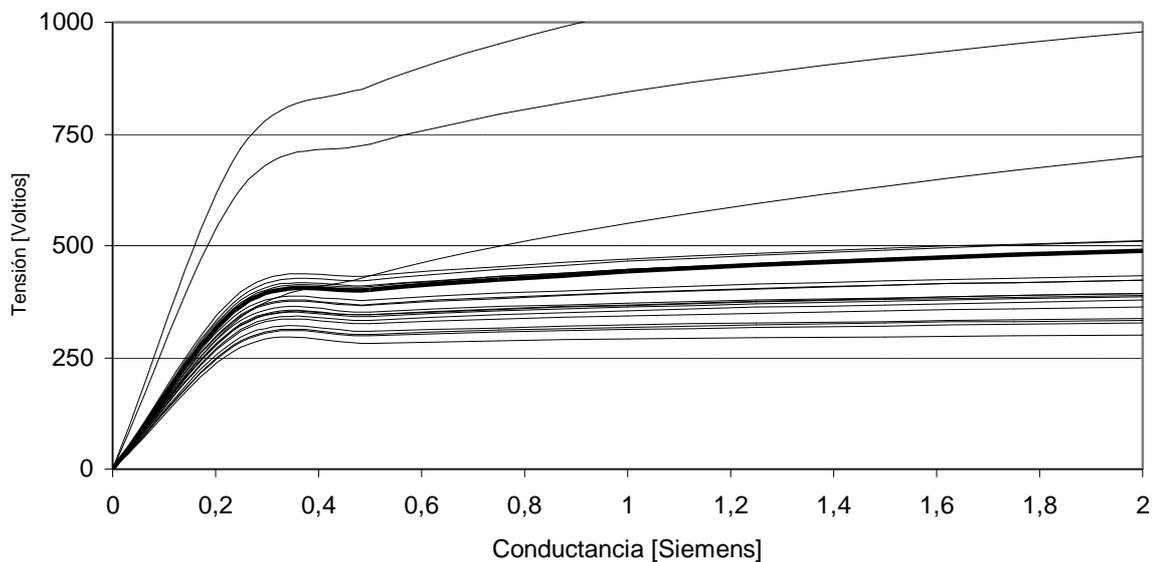


Figura N°6-17: Evolución de las tensiones para todos los ensayos de repetición.

Como puede verse en los valores numéricos de las tablas precedentes de los valores de la tensión en el modelo de Cassie, los archivos que presentan mayores valores corresponden a “Gab23”, “Gab10” y “Gab1” de mayor a menor, no obstante su influencia negativa se compensa con el resto de los oscilogramas los cuales presentan una forma única y general de variación según puede verse en la figura anterior.

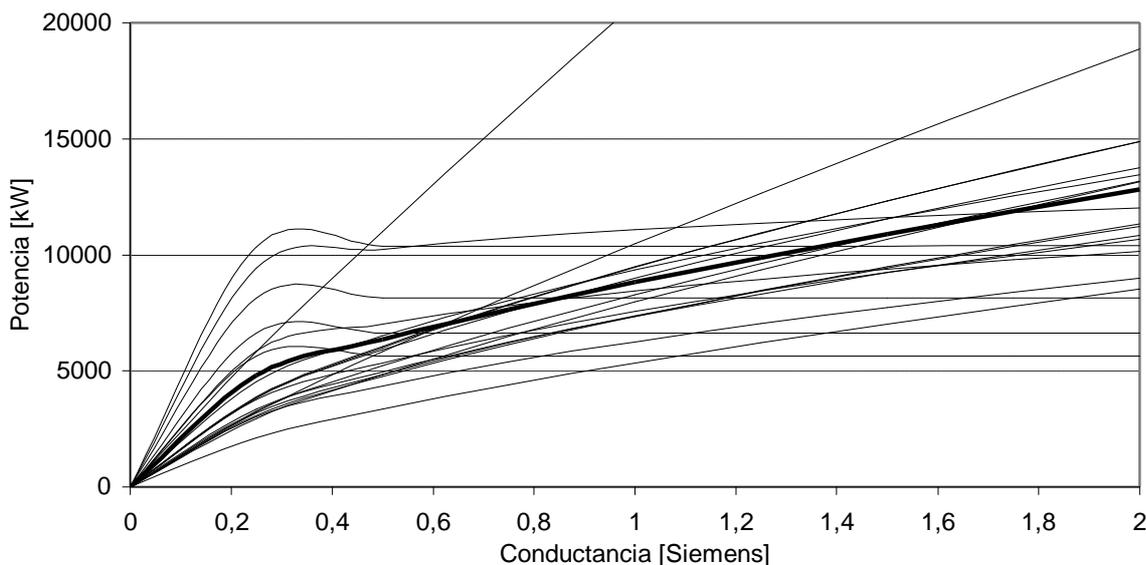


Figura N°6-14: Evolución de las potencias para todos los ensayos de repetición.

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.

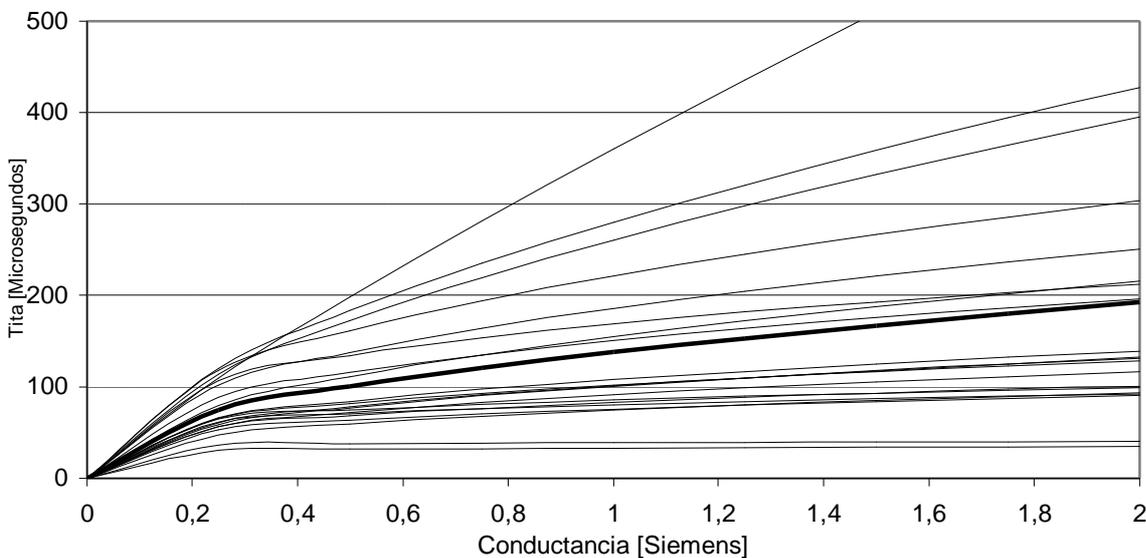


Figura N°6-15: Evolución de la constante de tiempo para todos los ensayos de repetición.

6.5.1.2. Modelo de Cassie

Los valores de los parámetros de la ecuación de Cassie, están presentes en la figura siguiente, donde se aprecia una gran dispersión entre ellos, no obstante los valores promedios obtenidos para cada batería son bastantes próximos entre sí.

6.5.1.1.- Modelo de Mayr

Los valores de los parámetros de la ecuación de Mayr considerados como constantes, se presentan en forma conjunta a modo de gráfica de $P_o = f(Q)$ [3], en la figura siguiente para los dos ángulos de disparo ensayados.

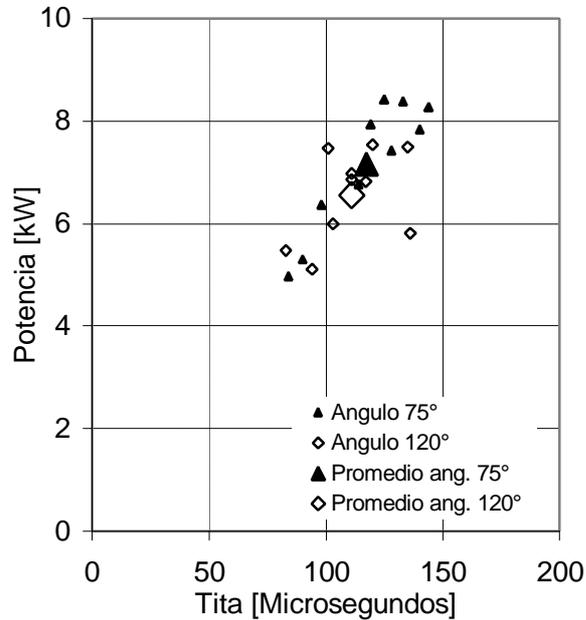


Figura N°6-13: Gráfica de $P_o = f(Q)$ para los dos ángulos de conexión.

En la figura se puede observar los valores de los parámetros que resultaron del cálculo, para los cuales no se observa 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 un comportamiento de los parámetros como variables con la conductancia, se presenta la figura siguiente, 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 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 este agrupamiento con los oscilogramas de cada grupo se pudo observar una posible causa de esta 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.

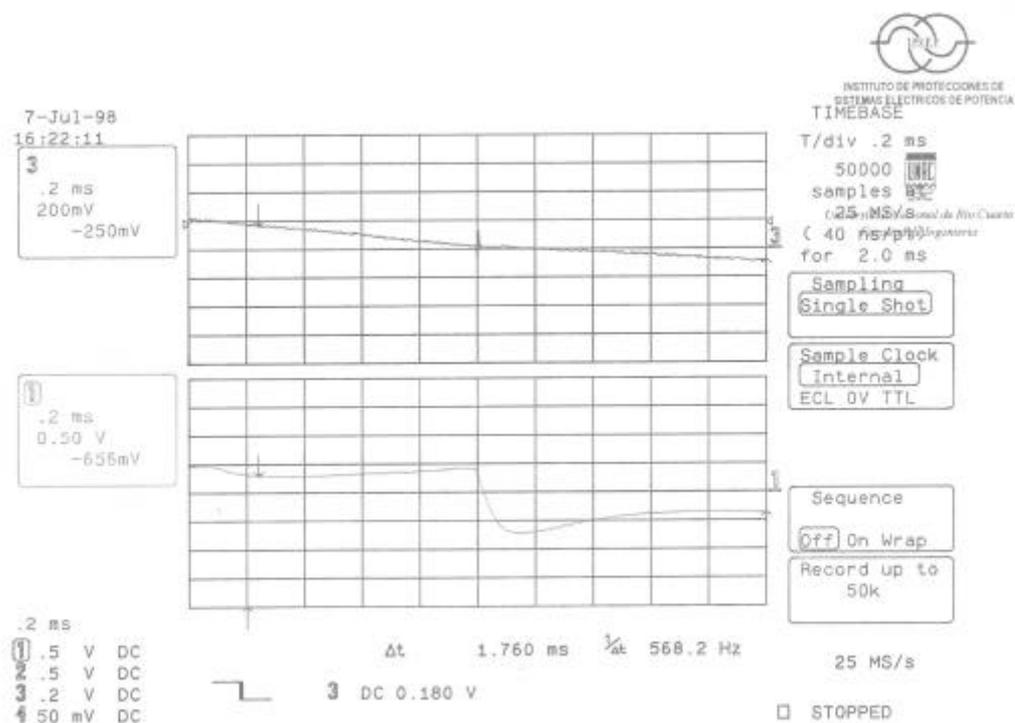


Figura N°6-12: Oscilograma de un ensayo con reignición.

VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE CASSIE					
Oscilograma	Parámetro	Constantes		Variables	
		Ast	Ams	Ast	Ams
Wal5X	U _o [kV]	0,050	X	92,6653.g ^{0,141304}	X
	Θ [μs]	106	X	215,818.g ^{0,400399}	X
Wal7X	U _o [kV]	0,090	X	128,110.g ^{0,078212}	X
	Θ [μs]	55	X	248,296.g ^{0,544777}	X
Wal8X	U _o [kV]	0,084	X	87,0204.g ^{0,092633}	X
	Θ [μs]	107	X	119,842.g ^{0,267332}	X

Tabla N°6-13: Valores obtenidos para el modelo de Cassie.

Aquellas casillas que están marcadas con una “X” significan que el software utilizado, en todos los casos usando el Método de Amsinck, no ha encontrado un resultado satisfactorio durante el cálculo de los parámetros.

6.5.- RESULTADOS OBTENIDOS

6.5.1.- ENSAYOS DE REPETICIÓN VARIANDO EL ÁNGULO DE CONEXIÓN

Las dos baterías de ensayos de repetición con distinto ángulo de conexión, se analizarán conjuntamente ya que no han mostrado grandes divergencias entre ellas. Para ello, se presentarán los resultados obtenidos en forma de gráficas para poder observar mejor aquellas particularidades que se presenten.

VALORES DE PARÁMETROS DEL MODELO DE CASSIE							
Osc.	Ang.	U _o [V]	Θ [μs]	Ap	Bp	Aq	Bq
Wal2	0°	220,086	147	501,156	0,149104	511,950	0,828790
Wal3	18°	289,753	71	658,277	0,195578	452,122	0,741187
Wal4	36°	305,244	689	2105,22	0,457537	519,517	0,840485
Wal5	54°	358,015	142	608,524	0,195650	679,062	0,837798
Wal6	72°	129,169	99	554,019	0,158838	413,854	0,733882
Wal7	90°	638,0	110	4843,68	0,760038	815,307	0,813911
Wal8	108°	148,075	104	832,293	0,399251	331,967	0,885101
Wal9	126°	271,564	138	496,745	0,143708	515,171	0,778283
Wal10	144°	314,169	184	454,609	0,187071	518,163	0,771361
Wal11	162°	293,616	351	307,500	0,058424	591,190	0,834072

Tabla N°6-11: Valores obtenidos para el modelo de Cassie.

6.4.4.- ENSAYOS CON REIGNICIONES

Durante la ejecución de los ensayos que se han presentado en el punto anterior, el interruptor abría en el primer paso por cero cuando el ángulo de conexión era lo suficientemente pequeño como para permitir un apagado del arco. En caso contrario, para un ángulo de conexión grande, la separación galvánica de los contactos y la posterior extinción del arco se producía al siguiente paso por cero de la corriente. Entre estos dos comportamientos y debido a la porción aleatoria del comportamiento del arco eléctrico, se puede producir la apertura definitiva del interruptor antes de su primer paso natural por cero, si y sólo si la separación galvánica ya ha comenzado y el interruptor tiene la capacidad suficiente como para hacerlo, caso contrario se tendrá una reignición del arco eléctrico.

Para poder evaluar el comportamiento del método de Amsinck y compararlo con el Asturiano se analizaron aquellos oscilogramas en los cuales se registró la reignición del arco luego del paso por cero de la corriente. Las condiciones de los ensayos son similares a las anteriores.

VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE MAYR					
Oscilograma	Parámetro	Constantes		Variables	
		Ast	Ams	Ast	Ams
Wal5X	P _o [kW]	2,36	0,15	8590,13.g ^{1,28268}	0,618858.g ^{0,691684}
	Θ [μs]	110	28	215,830.g ^{0,400416}	93,2716.g ^{0,579056}
Wal7X	P _o [kW]	2,72	X	13143,2.g ^{1,02098}	X
	Θ [μs]	64	X	200,602.g ^{0,660569}	X
Wal8X	P _o [kW]	2,43	0,368	4709,51.g ^{0,966919}	X
	Θ [μs]	76	24	54,9202.g ^{0,177831}	X

Tabla N°6-12: Valores obtenidos para el modelo de Mayr.

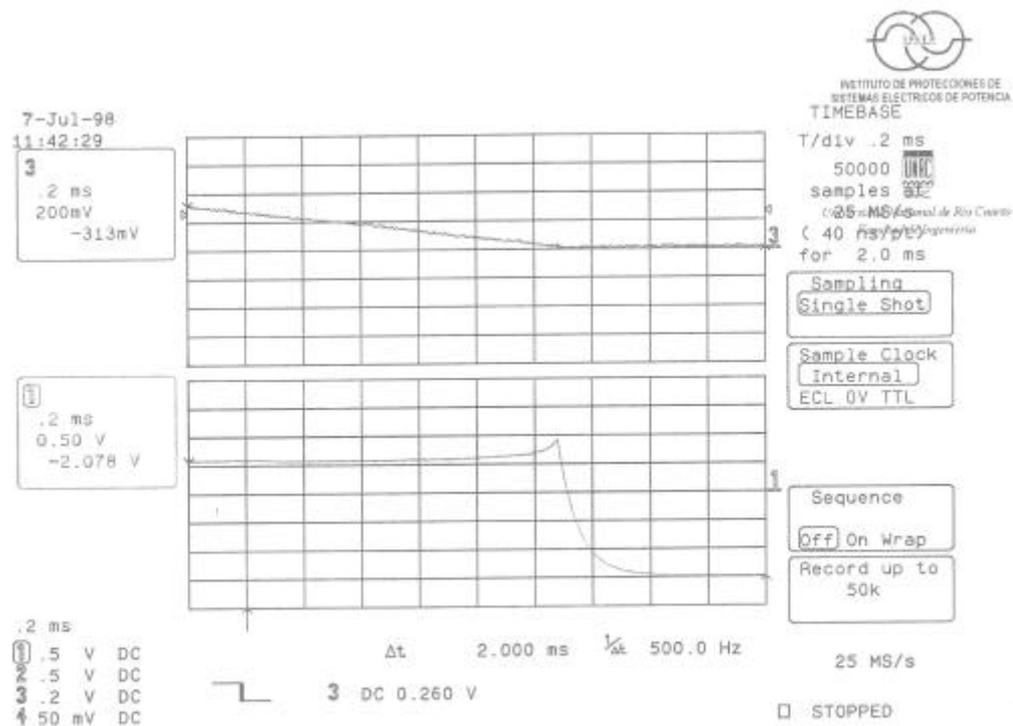


Figura N°6-11: Oscilograma con ángulo de conexión igual a 54°.

VALORES DE PARÁMETROS DEL MODELO DE MAYR							
Osc.	Ang.	P _o [kW]	Θ [μs]	A _p	B _p	A _q	B _q
Wal2	0°	9,46	102	10202,8	0,485977	73,9220	0,131964
Wal3	18°	8,53	107	10558,9	0,150524	164,942	0,363525
Wal4	36°	7,32	94	8250,78	0,017407	143,054	0,354868
Wal5	54°	4,03	98	8524,17	0,456848	186,199	0,474232
Wal6	72°	7,81	108	8669,36	0,276925	128,465	0,282871
Wal7	90°	6,52	103	9157,94	0,164082	168,512	0,254879
Wal8	108°	7,24	66	9982,13	0,293209	92,5281	0,256981
Wal9	126°	7,94	129	7676,19	0,561804	40,9598	0,044373
Wal10	144°	8,17	116	10132,3	0,292864	145,157	0,247348
Wal11	162°	6,92	124	7577,8	0,017961	188,966	0,352965

Tabla N°6-10: Valores obtenidos para el modelo de Mayr.

La corriente máxima que circulaba por el interruptor a la hora de registrar el arco eléctrico era de 375 [A], la tensión era de 238 [V] mientras que el coseno fi fue de 0,18. La separación galvánica de los contactos luego del paso por cero de la corriente se verificó para un ángulo de conexión superior a 90°.

VALORES DE PARÁMETROS DEL MODELO DE MAYR						
Oscilo.	P _o [kW]	Θ [μs]	Ap	Bp	Aq	Bq
801	28,7	199	28084,0	0,439203 ⁻⁸	133,088	0,107128
802	37,2	166	104457	1,51569	319,631	0,735636
803	37,4	175	576125	1,87205	532,101	0,897441
804	60,9	252	201318	0,877874 ⁻⁴	575,024	0,760010
805	41,6	203	272166	1,77767	461,506	0,870851
806	37,9	170	78087,8	0,324469 ⁻⁷	352,123	0,519816
807	32,7	143	1494360	2,17027	569,866	0,895340
808	41,9	187	292068	1,87148	542,213	0,945702
809	43,5	160	64840,7	0,635364 ⁻⁶	290,985	0,483817
810	54,6	181	196363	0,796238 ⁻⁷	375,572	0,510406

Tabla N°6-8: Valores obtenidos para el modelo de Mayr.

VALORES DE PARÁMETROS DEL MODELO DE CASSIE						
Oscilo.	U _o [V]	Θ [μs]	Ap	Bp	Aq	Bq
801	188,3	143	611,856	0,337955	655,752	0,998450
802	204,4	293	701,414	0,393517	999,486	0,630697
803	192,8	107	1037,01	0,475390	665,841	0,896061
804	249,0	211	1278,50	0,543505	584,360	0,918557
805	239,3	373	264,434	0,143756 ⁻⁸	412,168	0,606391
806	205,1	135	195,649	0,093103	95,3706	0,234604
807	196,2	93,7	1001,44	0,436854	681,145	0,832902
808	197,9	74,2	1213,99	0,566799	609,545	0,819913
809	248,7	184	1218,56	0,527800	524,984	0,788618
810 (*)	299,0	204	524,288	0,398796	404,399	0,812923

Tabla N°6-9: Valores obtenidos para el modelo de Cassie.

Nota: El signo “(*)” significa que el tiempo total de cálculo para éste registro fue desde -500 [μs] hasta +500 [μs].

6.4.3.- ENSAYOS DE VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE CONEXIÓN

Estos ensayos se han realizado sobre los interruptores marca Siemens de interrupción en cámara de aire, modificando el ángulo de conexión en 18° entre cada ensayo. Con ello se buscaba determinar a partir de qué ángulo de conexión la separación galvánica de los contactos no se producía sino hasta luego del primer paso por cero de la corriente, o lo que igual, se buscaban las peores condiciones de apertura del interruptor. De la misma manera se buscaba determinar los parámetros de los arcos registrados para cada ángulo de conexión, para lo cual se muestran los resultados en las tablas siguientes.

El tiempo total registrado en estos en estos ensayos fue de sólo 2 [mseg] con una cantidad total de puntos igual a 50000, tal cual se puede ver en el oscilograma siguiente.

bajo las mismas condiciones generales pero generados por el corte de corrientes de distinto valor: 350 [A] para la primera batería y 850 [A] para la segunda. El ángulo de conexión fue siempre de cero grados.

6.4.2.1.- Corriente igual a 350 [A]

VALORES DE PARÁMETROS DEL MODELO DE MAYR						
Oscilo.	P _o [kW]	Θ [μs]	Ap	Bp	Aq	Bq
301	9,08	113,2	17625,3	0,616874	62,3276	0,236782 ⁻⁹
302	11,48	123,4	22317,5	0,544834	184,091	0,333023
303	11,1	129,0	12173,2	0,126576 ⁻⁶	205,745	0,199136
304	10,6	123,3	11494,3	0,859967 ⁻⁶	194,420	0,205231
305	13,0	141,2	21560,7	0,252584	325,003	0,410054
306	11,0	136,4	27021,9	0,706987	217,720	0,359676
307	11,3	120,6	20195,3	0,733272	49,2858	0,263916 ⁻⁷
308	11,7	126,8	19419,2	0,519911	80,9106	0,204910 ⁻⁶
309	9,37	145,2	119946	1,26233	1301,57	0,912104
310	10,9	118,7	13498,8	0,114533	202,160	0,274481

Tabla N°6-6: Valores obtenidos para el modelo de Mayr.

La tabla anterior presenta los resultados de los cálculos empleando el Método Asturiano de cálculo de parámetros, para el intervalo desde -500 [μs] hasta +250 [μs]; mientras que la tabla siguiente, para el modelo de Cassie fue obtenida, trabaja con los datos desde -1500 [μs] hasta +500 [μs].

VALORES DE PARÁMETROS DEL MODELO DE CASSIE						
Oscilo.	U _o [V]	Θ [μs]	Ap	Bp	Aq	Bq
301	165,8	37,9	165,778	0,49936 ⁻¹¹	37,9459	0,208456 ⁻⁷
302	191,5	76,1	1017,38	0,283511	1460,72	0,881058
303	196,5	149,9	1503,49	0,378085	1612,90	0,925187
304	166,9	42,3	167,931	0,41389 ⁻¹⁰	57,4459	0,126561
305	187,4	185,2	1074,51	0,294916	1440,01	0,889466
306	166,6	70,1	813,309	0,300971	1439,97	0,895217
307	159,9	46,6	269,952	0,844188 ⁻²	850,581	0,754333
308	220,0	138	10143,6	0,670006	1497,79	0,824346
309	174,0	157,6	184,819	0,101789 ⁻⁷	369,538	0,468724
310	166,0	55	801,657	0,232589	1359,63	0,860015

Tabla N°6-7: Valores obtenidos para el modelo de Cassie.

6.4.2.2.- Corriente igual a 850 [A]

Aquí, las condiciones generales del ensayo se mantienen constantes y sólo se ha cambiado la carga al circuito para dar una corriente de ensayo de unos 850 [A] aproximadamente, manteniendo prácticamente igual el factor de potencia de la carga. El oscilograma general para este caso al igual que para el anterior, son similares a los mostrados con anterioridad.

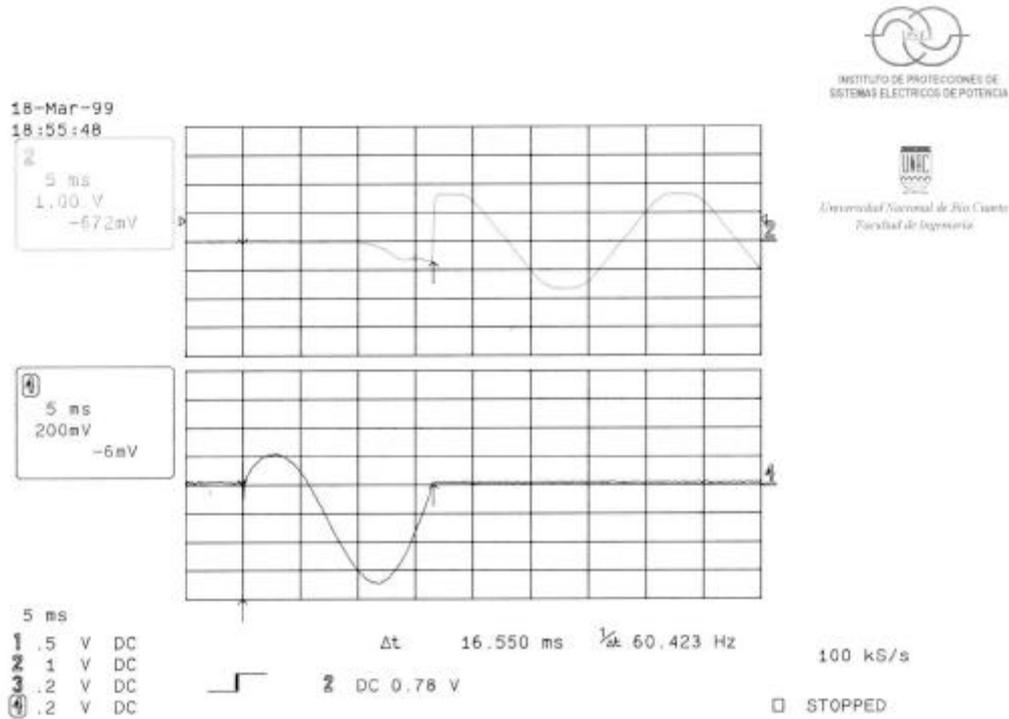


Figura N°6-10: Oscilograma con ángulo de conexión igual a 120°.

VALORES DE PARÁMETROS DEL MODELO DE CASSIE						
Oscilo.	U _o [V]	Θ [μs]	A _p	B _p	A _q	B _q
Gab20	144,523	118	405,124	0,098436	707,079	0,897186
Gab21 (*)	122,195	65	363,406	0,087637	713,243	0,888038
Gab22	130,376	174	312,696	0,065376	631,687	0,819822
Gab23 (*)	103,445	78	1024,72	0,256128	738,914	0,877542
Gab24	127,116	576	465,097	0,133270	770,194	0,927531
Gab25 (*)	115,888	51	368,654	0,094717	661,785	0,849655
Gab26	95,3229	228	446,641	0,119397	661,456	0,877447
Gab27	147,266	682	317,479	0,072553	716,874	0,918942
Gab28	138,120	640	470,479	0,122041	777,448	0,966511
Gab29	93,4188	146	372,266	0,078741	596,157	0,835616

Tabla N°6-5: Valores obtenidos para el modelo de Cassie.

Nota: El signo “(*)” significa que el tiempo total de cálculo para éstos registros fue reducido convenientemente, solamente para el cálculo de los parámetros como constantes, debido principalmente a la calidad del arco eléctrico que imposibilitaba la utilización completa del registro obtenido.

6.4.2.- ENSAYOS DE REPETICIÓN VARIANDO LA CORRIENTE

Para las dos baterías de ensayos que se presentan a continuación, sólo se modificó la corriente que circula por el interruptor manteniendo constante la tensión, igual a 238 [V], y el coseno φ. La razón de estos ensayos fue, además de valorar nuevamente la dispersión de los valores de los parámetros, analizar los arcos eléctricos registrados en el mismo interruptor

VALORES DE PARÁMETROS DEL MODELO DE CASSIE						
Oscilo.	U _o [V]	Θ [μs]	Ap	Bp	Aq	Bq
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

Tabla N°6-3: Valores obtenidos para el modelo de Cassie.

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

6.4.1.2.- Repetición con ángulo de 120°

En esta batería de ensayos se modificó el ángulo de conexión para llevarlo a un valor aproximado de 120°, accionando el interruptor sincrónico del circuito; los oscilogramas que se obtuvieron responden a la forma general presentada en la figura de abajo mientras que los resultados se dan en las tablas siguientes.

Al igual que el caso anterior, solamente se han utilizado para el cálculo, los puntos ubicados desde -500 [μs] antes del paso por cero de la corriente hasta +250 [μs] luego del paso por cero, para el modelo de Mayr. Mientras que, para el modelo de Cassie, se han utilizado desde -1500 [μs] hasta +500 [μs] luego del paso por cero, a menos que se indique especialmente.

VALORES DE PARÁMETROS DEL MODELO DE MAYR						
Oscilo.	P _o [kW]	Θ [μs]	Ap	Bp	Ap	Bp
Gab20	6,86	111	8288,53	0,668347	74,2204	0,329804
Gab21	6,97	111	9001,25	0,612229	107,983	0,359659
Gab22	6,82	117	8427,86	0,265441	185,547	0,433653
Gab23	5,48	83	7347,88	0,623636	38,4617	0,046102
Gab24	5,81	136	6638,80	0,269433 ⁻⁵	260,730	0,597998
Gab25	7,47	101	8131,20	0,175317 ⁻⁵	168,832	0,332057
Gab26	6,00	103	7371,37	0,608102	82,8762	0,283568
Gab27	7,53	120	20818,2	0,920306	359,776	0,858864
Gab28	7,49	135	9343,11	0,523711	85,5686	0,203832
Gab29	5,10	94	6254,40	0,524012	75,5556	0,252737

Tabla N°6-4: Valores obtenidos para el modelo de Mayr.

6.4.1.1.- Repetición con ángulo de 75°

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 solicitud máxima durante el ensayo de capacidad de ruptura, según puede verse en la figura que se muestra a continuación.

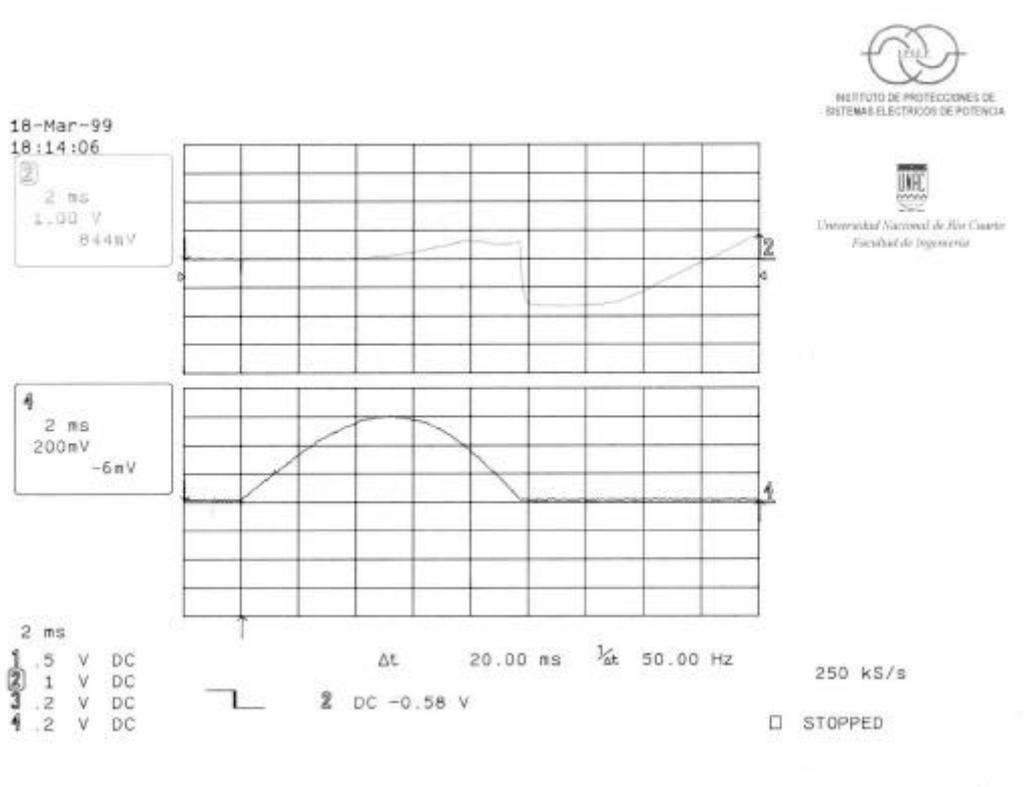
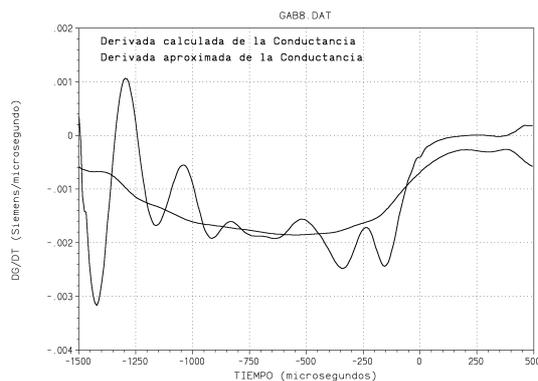


Figura N°6-9: Oscilograma con ángulo de conexión igual a 75°.

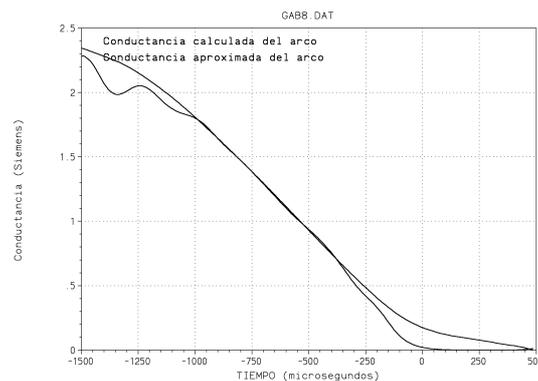
El tiempo total registrado fue de 20 [ms] pero solamente se han utilizado para el cálculo, los puntos ubicados desde -500 [μs] antes del paso por cero de la corriente hasta +250 [μs] luego del paso por cero para el modelo de Mayr. En cambio, para el modelo de Cassie se han utilizado desde -1500 [μs] hasta +500 [μs] luego del paso por cero, a menos que se indique en particular el tiempo utilizado. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas de valores.

VALORES DE PARÁMETROS DEL MODELO DE MAYR						
Oscilo.	P _o [kW]	Θ [μs]	A _p	B _p	A _q	B _q
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

Tabla N°6-2: Valores obtenidos para el modelo de Mayr.



(m) Derivada de la conductancia calculada y aproximada



(n) Conductancia calculada y aproximada

Figura N°6-7: Evolución de las variables eléctricas durante un ensayo.

Los programas “UNO”, “DOS” y “TRES” fueron desarrollados especialmente para poder aplicar los programas de cálculo de parámetros desarrollados anteriormente al formato de salida de datos que actualmente posee el IPSEP. Los tres programas están confeccionados en lenguaje FORTRAN [1,2].

6.4.- LOS ENSAYOS REALIZADOS

Como se mencionara anteriormente se han ejecutado distintos ensayos para evaluar la aplicabilidad de la metodología desarrollada en capítulos anteriores bajo otras condiciones de operación ensayando otro tipo de interruptores y a otro nivel de tensión muy distinto al anterior; que se detallarán a continuación. 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. Por lo tanto, los programas de cálculo que fueron usados son el “MAYRAST” y el “CASSAST”.

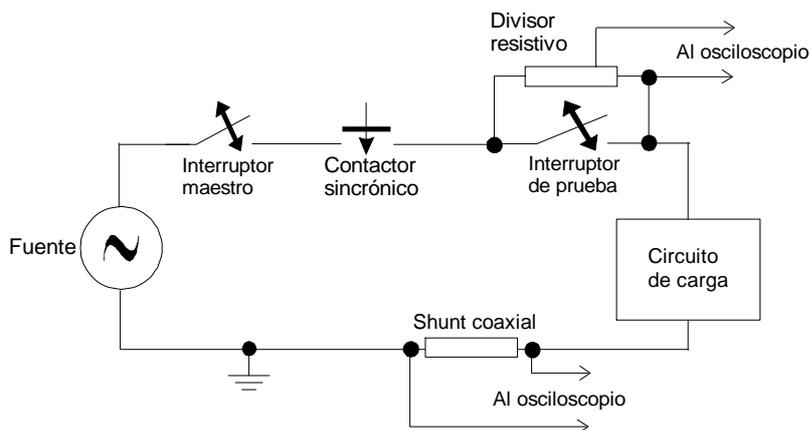
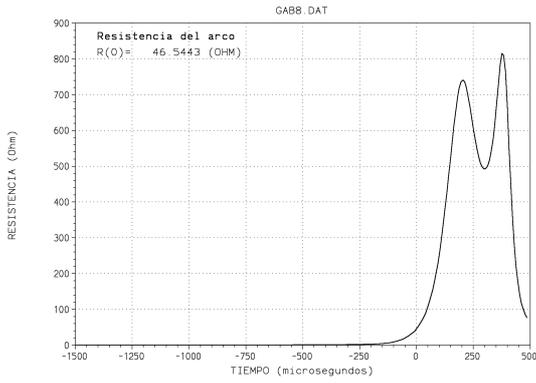


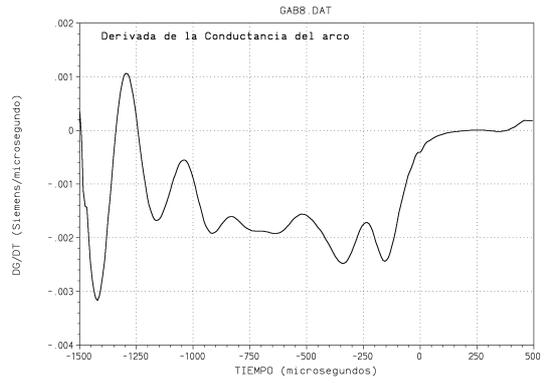
Figura N°6-8: Detalle del circuito eléctrico y de medición empleados en los ensayos.

6.4.1.- ENSAYOS DE REPETICIÓN VARIANDO EL ANGULO DE CONEXIÓN

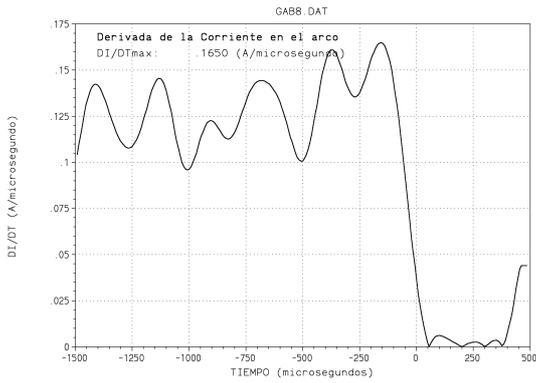
Estos ensayos fueron realizados sobre el interruptor marca HY-MAG tipo SA1-G3 y constaron de dos baterías de 10 ensayos realizados de forma seguida y bajo las mismas condiciones generales del circuito y del ambiente. La finalidad de estos ensayos fue calcular y evaluar la dispersión de los parámetros de los modelos matemáticos de Mayr y de Cassie para el arco eléctrico que se ha registrado. La tensión total del sistema fue de 238 [V] mientras que la corriente aplicada fue de 238 [A], siendo el coseno ϕ igual a 0,18 inductivo.



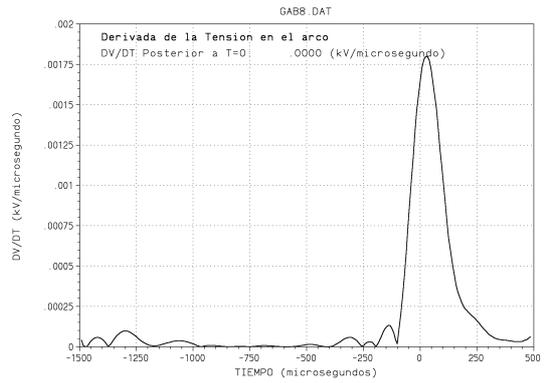
(e) Resistencia



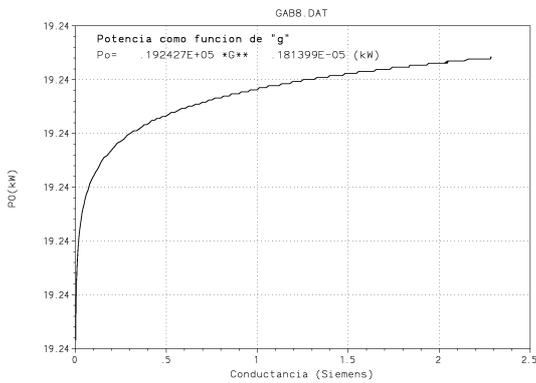
(f) Derivada de la conductancia



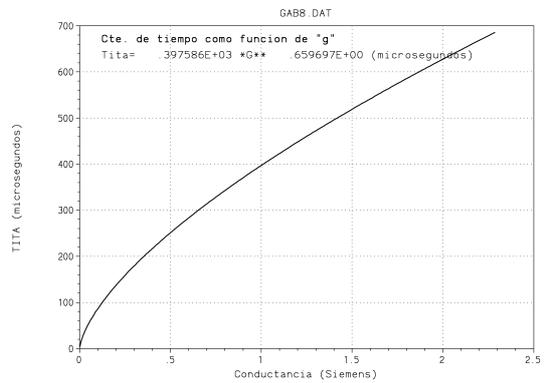
(g) Derivada de la corriente



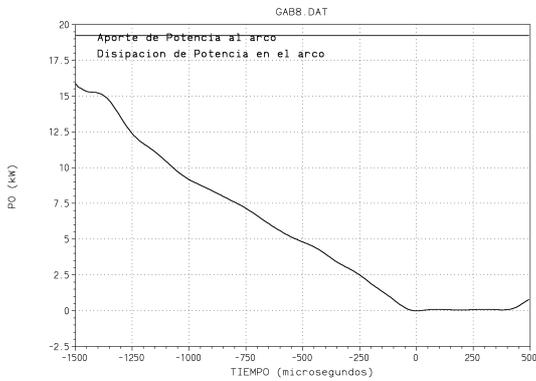
(h) Derivada de la tensión



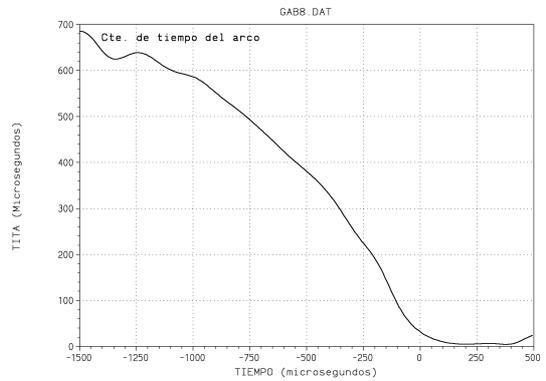
(i) Potencia aproximada



(j) Tita aproximada



(k) Potencias en el arco



(l) Tita en el arco

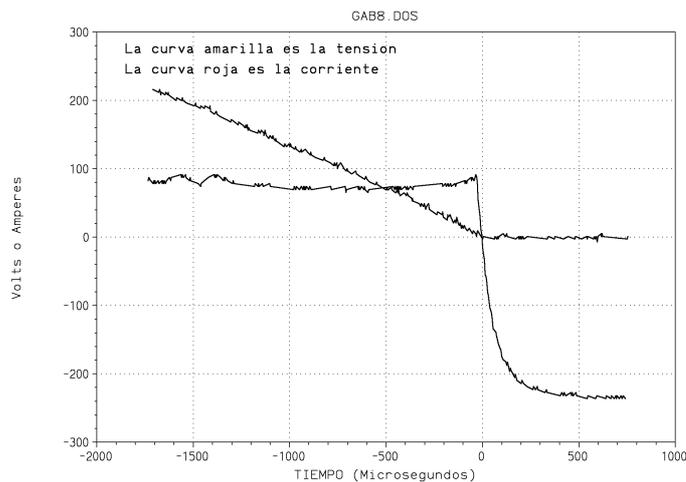
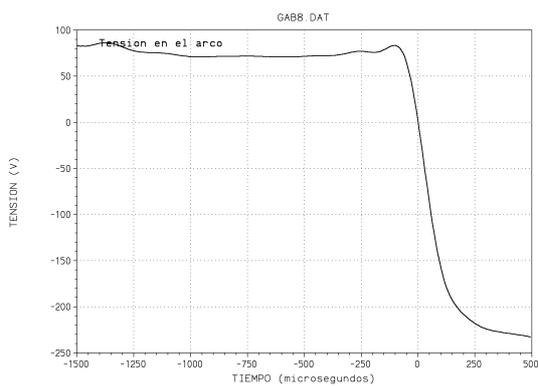
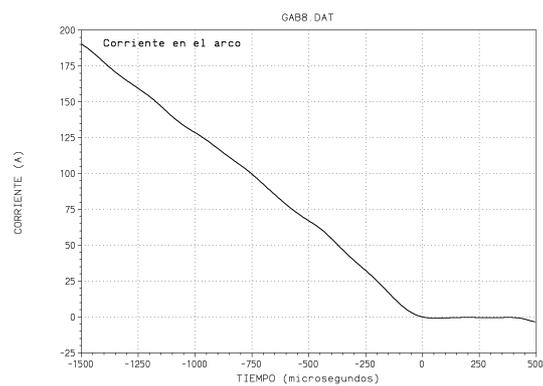


Figura N°6-6: Evolución de la tensión y la corriente en la parte seleccionada.

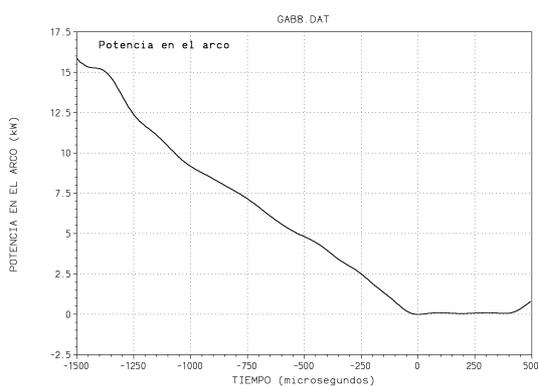
Para finalizar y ejecutando el programa “TRES”, se crea el archivo de entrada para los programas de cálculo de los parámetros del arco, que ya han sido explicados oportunamente. Una vez obtenido el archivo de entrada para los programas de cálculo de parámetros de ejecuta alguno de ellos obteniendo las siguientes salidas gráficas.



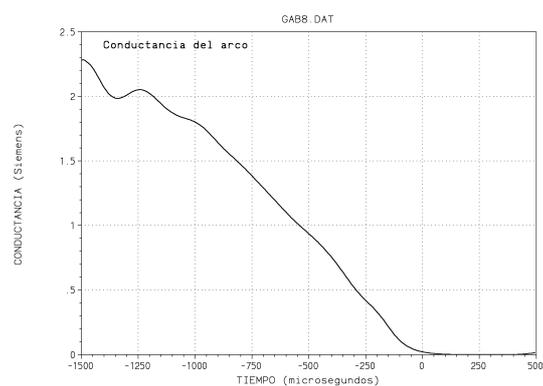
(a) Tensión



(b) Corriente



(c) Potencia



(d) Conductancia

El archivo así obtenido luego se procesa con el programa “UNO”, que tiene por finalidad reducir la cantidad total de puntos del archivo de entrada y disminuir el escalonamiento causado por la rapidez del ensayo original que puede ser observado en la tabla de las tensiones de la figura anterior. Una vez ejecutado, se obtiene un nuevo archivo cuya extensión es de medio Mbytes, conteniendo tablas de tiempo-tensión y tiempo-corriente con unos 6000 a 8000 valores aproximadamente, que ya han sido multiplicadas por los factores de multiplicación del circuito de medición. También da un archivo gráfico que es interpretado por el programa “SPLOT” que se muestra en la figura 6-5, que respeta la diferencia de colores que se presentan en la pantalla aunque en la figura, ambas curvas sean de color negro.

```

TITULO
XLABEL TIEMPO (Microsegundos)
LEGEND1 0.05 0.95 La curva amarilla es la tension
LEGEND2 0.05 0.9 La curva roja es la corriente
YLABEL Volts o Amperes
XGRID
YGRID
DASH ON
READ      7711
          3.528935      -7.093750
          5.545475      -3.546875
          9.578555      -7.093750
          13.611600     -3.546875
          16.636450     -7.093750
          17.266590     -3.546875
          17.991290     -7.093750
          36.801750     -3.546875
          37.557980     -7.093750
          51.925800     -3.546875
          52.682000     -7.093750
          53.564250     -3.546875
          54.509480     -7.093750
          62.008450     -3.546875
          62.638640     -7.093750
    
```

Figura N°6-4: Ejemplo de archivo de salida del “UNO”.

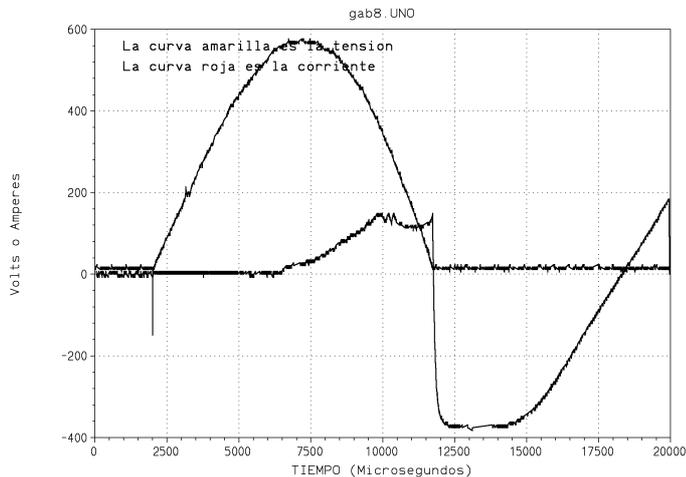


Figura N°6-5: Evolución de la tensión y la corriente durante el ensayo.

Luego se ejecuta el programa “DOS” que sirve para seleccionar sólo una parte del ensayo original, acomodar verticalmente los ejes coordenados, corregir posibles desplazamientos de los ceros de tensión y corriente, verificar los valores máximos de las tablas y sincronizar ambas tablas respecto del nuevo cero de tiempo, que se acomoda coincidente con el cruce por cero de corriente. Al igual que el anterior, la salida se puede graficar, tal cual se ve en la figura siguiente.

TIPOS DE INTERRUPTORES ENSAYADOS				
Marca	Modelo	$U_{nominal}$	$I_{nominal}$	Tipo
Siemens	3VS	0,66 [kV]	400 [A]	Aire
Siemens	5SQ21	0,23 [kV]	20 [A]	Aire
HY-MAG (*)	SA1-G3	0,24 [kV]	15 [A]	Aire
HY-MAG (*)	SA1-G3	0,24 [kV]	25 [A]	Aire

Tabla N°6-1: Tipos de interruptores ensayados.

Nota: El signo “(*)” significa que se han realizado dos baterías de ensayos sobre el mismo interruptor.

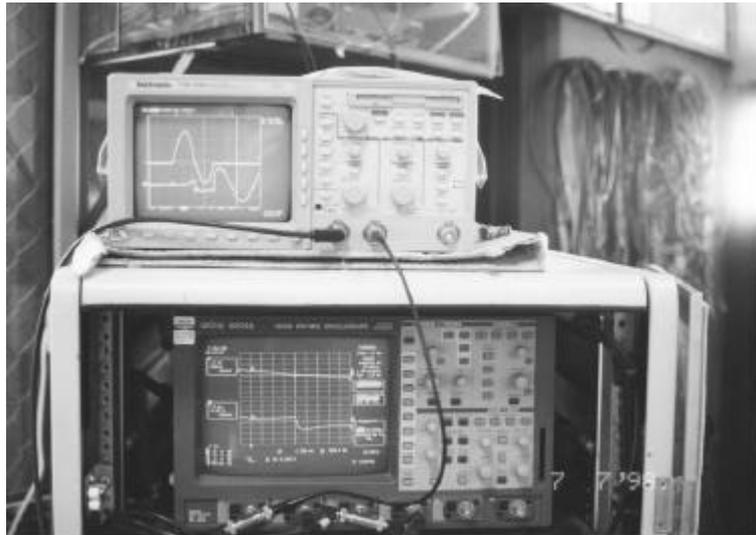


Figura N°6-2: Detalle de los osciloscopios principal y de respaldo utilizados.

Una vez obtenido el registro de la apertura del interruptor, se procesa la información con el programa “ONDA” de propiedad del IPSEP, luego del cual se ejecutan una serie de programas especialmente desarrollados para luego poder utilizar los programas de cálculo de parámetros siguiendo la metodología que se detalla a continuación.

6.3.- METODOLOGÍA EMPLEADA

Los ensayos se registraron en un Osciloscopio marca LeCroy modelo 9304A, de cuatro canales, 200 [MHz] y 50 [kSamples], que a través de una conexión RS 232 transmite los datos del ensayo a un ordenador personal que los procesa dando como salida un archivo “*.PRN” que contiene las tablas de tensión y corriente, ambas con un total de hasta 50000 puntos almacenados en 2 Mbytes de memoria como máximo. La figura 6-3 ejemplifica sobre la estructura del archivo de salida conteniendo tres columnas con la tabla de tiempo, tensión y corriente en ese orden.

```
"TIEMPO::TRAZOS->,( 1[ninguna] ),( 3[ninguna] )
0.00000e+00,-3.12500e-02,-5.12499e-02
1.00827e-06,-1.56250e-02,-5.12499e-02
2.01654e-06,-1.56250e-02,-5.12499e-02
3.02480e-06,-1.56250e-02,-5.12499e-02
4.03307e-06,-3.12500e-02,-5.12499e-02
5.04134e-06,-3.12500e-02,-5.12499e-02
6.04961e-06,-1.56250e-02,-5.12499e-02
7.05787e-06,-1.56250e-02,-5.12499e-02
8.06614e-06,-1.56250e-02,-5.12499e-02
9.07441e-06,-1.56250e-02,-5.12499e-02
```

Figura N°6-3: Ejemplo de archivo de salida del osciloscopio empleado.

CAPITULO 6:

Simulación de un Interruptor de Aire en Baja Tensión

6.1.- INTRODUCCIÓN

En los meses de Julio de 1998 y Marzo de 1999, se han realizados ensayos de apertura en condiciones de cortocircuito sobre interruptores de Baja Tensión en el Laboratorio de Media Tensión del Instituto de Protecciones de Sistemas Eléctricos de Potencia (I.P.S.E.P.) dependiente de la Universidad Nacional de Río Cuarto en la ciudad de Río Cuarto, uno de los dos laboratorios más grandes en la República Argentina.



Figura N°6-1: Vista general del IPSEP.

En esas oportunidades se han sometido a ensayos diversos tipos de interruptores, todos con apertura en aire, con el fin de poder comprobar el funcionamiento de la metodología empleada para calcular los parámetros en interruptores de SF₆ y especialmente los programas de cálculo desarrollados, en otro tipo de interruptor y a otro nivel de tensión. Principalmente uno de los puntos a investigar era la factibilidad de utilizar la misma metodología bajo otras condiciones de ensayos, más reales al común de los posibles usuarios de interruptores y en caso de no satisfacer las expectativas realizar las modificaciones que resulten de las pruebas.

6.2.- LOS ENSAYOS

Los ensayos se han realizado sobre los tipos de interruptores mostrados en la tabla 6-1, obteniéndose registros oscilográficos como los indicados en la figura 6-2.

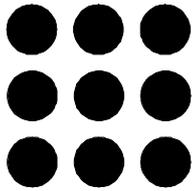
RESUMEN

En este capítulo se presentan ensayos realizados en interruptores de Baja Tensión y la metodología previa de procesamiento de datos para luego poder aplicar los programas de cálculo de parámetros y así estudiar los arcos eléctricos que han sido registrados.

Se presentan los resultados de grupos de oscilogramas presentados como baterías ya que cada una de ellas se obtiene repitiendo el mismo ensayo diez veces bajo idénticas condiciones del circuito de prueba. Luego para cada batería se determinan los valores de los parámetros de los modelos de arco calculando su valor medio junto con la dispersión que se obtuvo analizando cada caso por separado.

Con los promedios calculados y medidos los valores del circuito eléctrico asociado al ensayo, se reproduce éste completamente empleando los modelos de Mayr y de Cassie, ambos con parámetros constantes y variables con la conductancia, analizando la calidad en la simulación del ensayo según cada modelo y comportamiento.

Se determinan mediante simulaciones las curvas límites de operación de los interruptores ensayados, presentando luego un análisis del comportamiento de cada uno de ellos de evidente uso en la práctica.



Universitat Politècnica de Catalunya
Departament d'Enginyeria Elèctrica

CAPITULO 6:

SIMULACIÓN DE UN INTERRUPTOR DE AIRE EN BAJA TENSIÓN