

#### **4.6.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 4**

- [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<sup>das</sup> Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, Julio 1991, Coimbra, Portugal.
- [16] U. Habedank, “Aplication 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<sup>tas</sup> 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. Kirchesch, W. Egli: “Use of integral arc models in circuit-breakers testing and development”. IEEE Transaction on Power Delivery, October 1988, pp. 1685-1691.

#### 4.5.- CONCLUSIONES

En la primera parte del capítulo, se han descrito todas las distintas etapas que comprenden la evolución del ensayo en cortocircuito del interruptor de potencia y que deben ser respetadas durante la simulación de la prueba.

De la misma manera, las evoluciones de las variables eléctricas involucradas en las simulaciones, responden a la resolución de la ecuación general del modelo juntamente con las del circuito asociado al ensayo, de forma que los valores que asumen en todas las etapas son representativas de lo que sucede en la realidad.

Así, se han escrito para su utilización en el ATP dos nuevos modelos de arco eléctrico con parámetros tratados como constantes: el modelo de Cassie que no existía en la literatura disponible y el combinado Mayr+Cassie, que si bien tenía antecedentes [17,19], su utilización era en otro programa de simulación de circulación muy reducida (NETOMAC, por ejemplo) que casi nada tiene que ver con el ATP. Por otra parte, la descripción del comportamiento de las principales variables involucradas en el modelo combinado es nueva en su género, especialmente en la que respecta a la potencia y a la tensión aportada por cada modelo.

Ya con tratamiento de parámetros como variables con la conductancia, los dos modelos escritos: Mayr y Cassie, son totalmente nuevos y no se registran antecedentes salvo los originados por este trabajo, con lo cual su tratamiento en el ATP también es totalmente nuevo.

De esta manera y al ser nuevos los modelos, también es inédita la descripción del funcionamiento de los cinco modelos brindada en el presente capítulo, con lo cual se está dando un nuevo y mejor tratamiento en la representación del arco eléctrico en interruptores de potencia visto desde el ATP a partir de los ensayos de cortocircuito que se realizan.

Además y en toda la literatura disponible, no se brinda ninguna explicación en lo que se refiere a la mutua influencia en la tensión resultante en los bornes del interruptor como fruto de la acción de la tensión del circuito sobre la tensión debida al arco eléctrico.

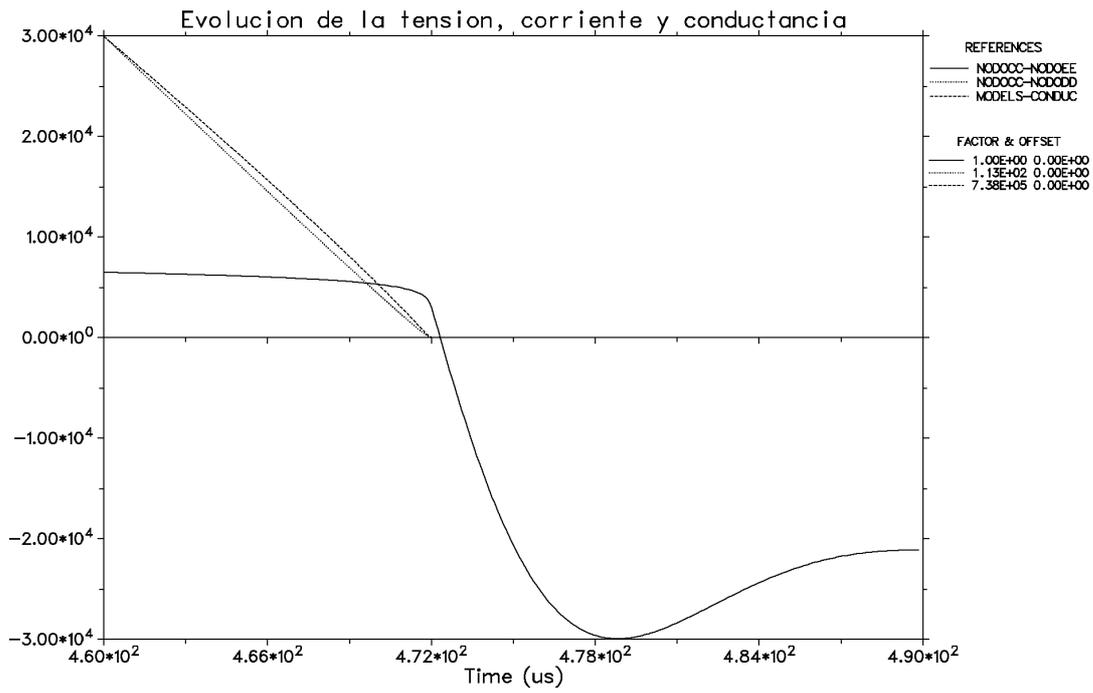


Figura N°4-39: Detalle de la apertura del arco eléctrico.

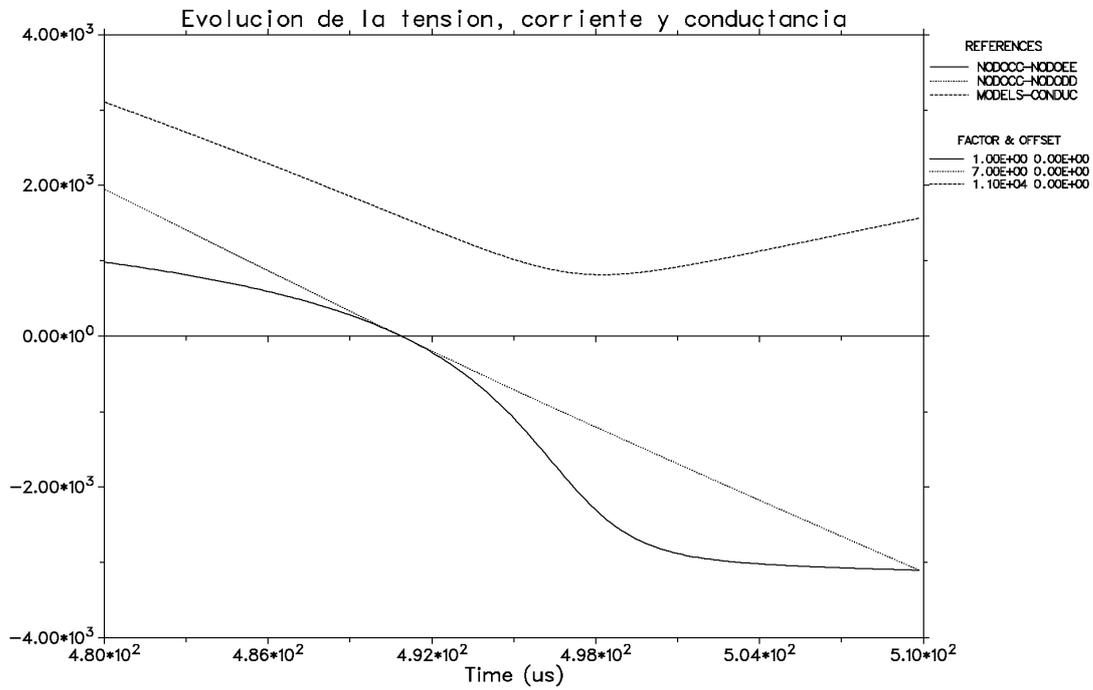


Figura N°4-40: Detalle de la reignición del arco eléctrico.

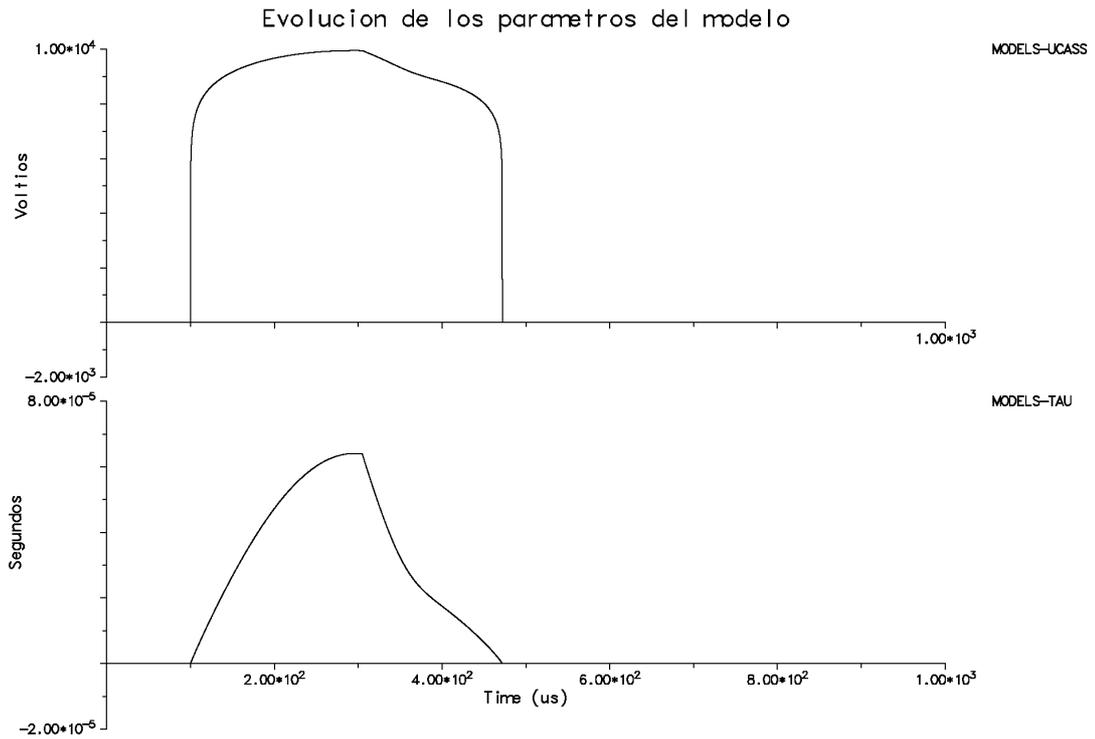


Figura N°4-37: Evolución de los parámetros del modelo durante la apertura.

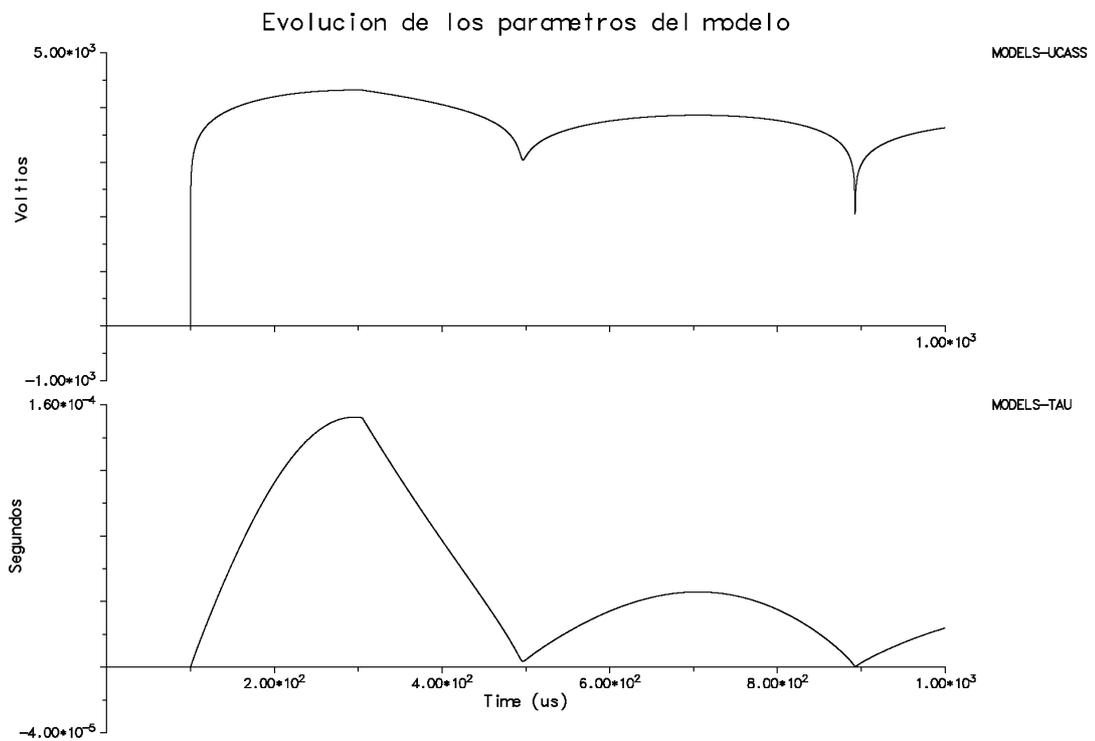


Figura N°4-38: Evolución de los parámetros del modelo durante la reignición.

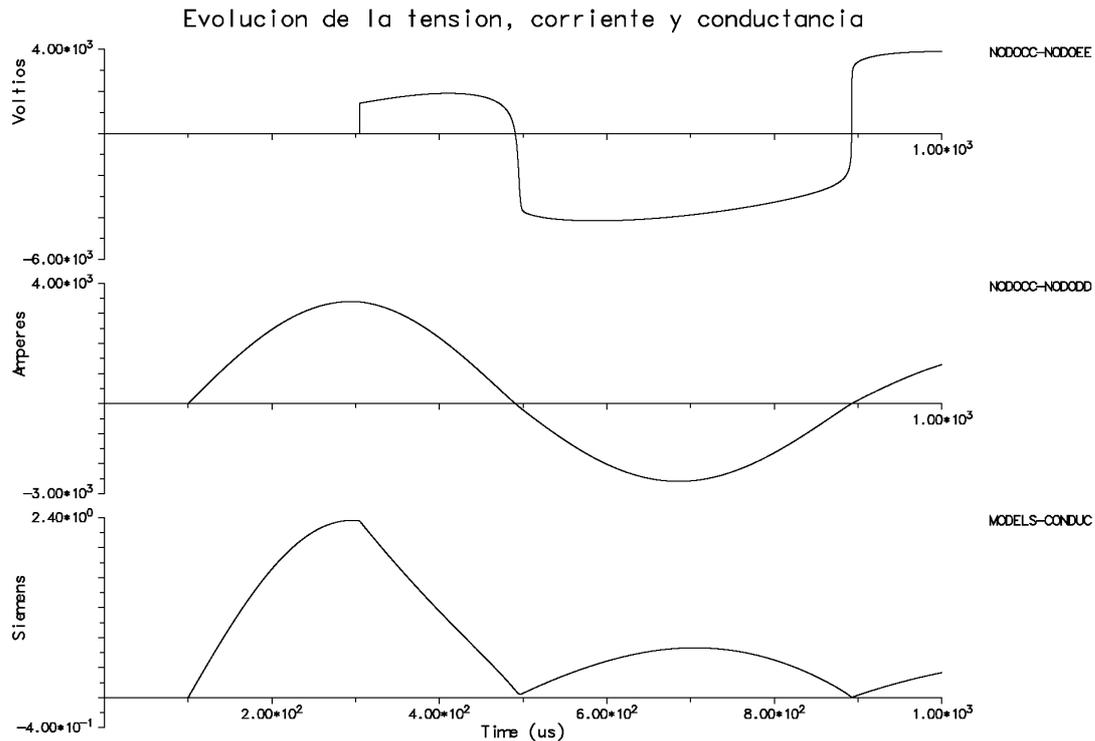


Figura N°4-36: Reignición simulada con el modelo de Cassie con parámetros variables.

Tal vez las únicas diferencias que pueden ser mencionadas son, la primera, que la evolución de la tensión va de menor a mayor para este modelo contrariamente a lo que ocurría en el modelo de Mayr pero hasta los valores que toman ambos modelos son bastantes similares. La segunda es que la curva de la conductancia, al comienzo de la circulación de corriente, es decir para unos 150 [ $\mu$ s] toma una forma un poco distinta a la presentada anteriormente siendo los valores numéricos prácticamente iguales.

Las figuras 4-37 y 4-38 que se presentan seguidamente, ejemplifican respecto del comportamiento que asumen los parámetros del modelo como funciones de la conductancia, primero para el caso de una apertura, en donde la tensión de Cassie al estar multiplicada por un valor grande, hace que se pierda un poco la forma general que poseía la conductancia; y luego para la reignición, donde la evolución de la tensión y más precisamente de los picos en cada reignición, son un indicativo de la proximidad o no de la apertura definitiva del arco.

Además, la curva de la constante de tiempo para el caso de la reignición, guarda relación con la que se obtuvo para el modelo de Mayr con la salvedad hecha respecto de un tiempo de 150 [ $\mu$ s].

Ya para finalizar este ítem, se presentan las figuras 4-39 y 4-40, con los detalles del comportamiento de la tensión, de la corriente y de la conductancia para una apertura en primer lugar y luego para una reignición.

4.4.2.- MODELO DE CASSIE

Recordando que la ecuación diferencial del modelo de Cassie con parámetros variables es

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

donde  $Q(g) = Aq.g^{Bq}$  y  $U(g) = Ap.g^{Bp}$  también llamada tensión de Cassie ( $U_{Cass}$ ), a continuación se presenta el comportamiento de este modelo primero para el caso de la apertura del arco durante el ensayo y luego el caso de la reignición.

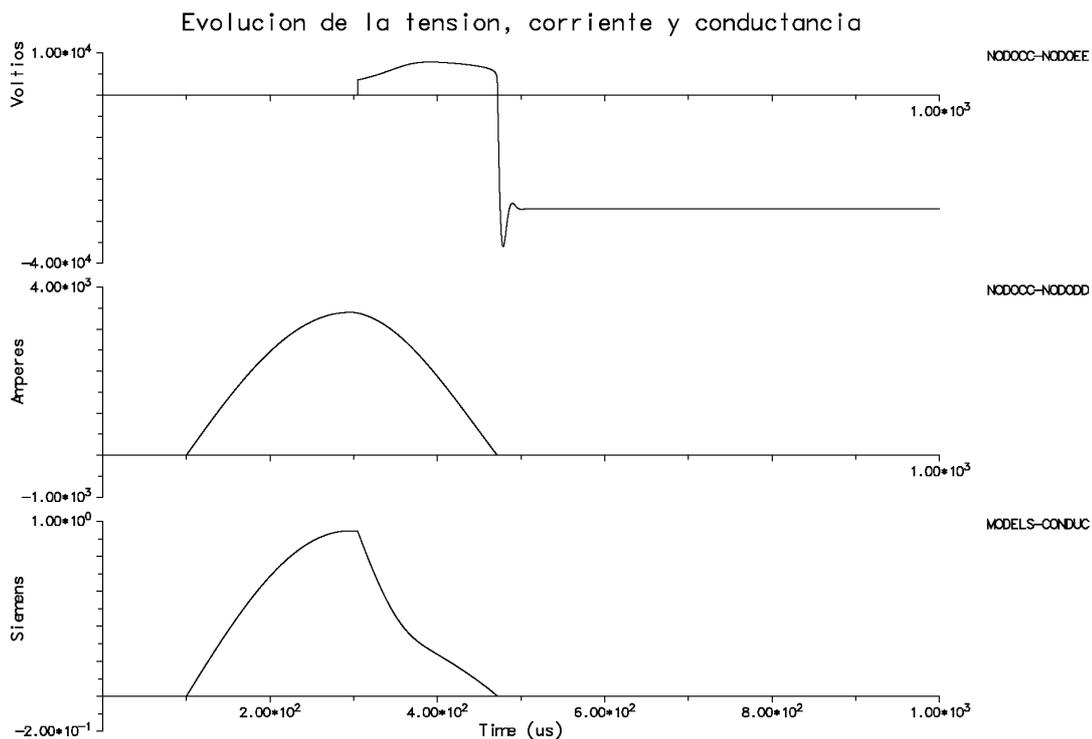


Figura N°4-35: Apertura simulada con el modelo de Cassie con parámetros variables.

La evolución de la curva de la tensión del arco que se muestra en la figura 4-35 es similar a la que presentara el modelo de Mayr, con la única diferencia que en vez de tener el máximo valor próximo al nacimiento del arco, aquí el valor más grande se obtiene prácticamente en la mitad del tiempo que permanece el arco ya que se extingue con el primer paso por cero según puede verse. Por su parte, los valores que toma la conductancia también guardan relación, en cierta manera, con los valores que asumí para el modelo de Mayr con la diferencia que aquí los valores que toma luego del comienzo del arco son inferiores, antes eran superiores, a los que poseía primeramente.

Las diferencias entre los comportamientos del arco representados por los modelos de Cassie y Mayr prácticamente se anulan para el caso de representar una reignición ya que, con muy escasas diferencias, hasta los valores máximos que toman ambos modelos son semejantes de acuerdo con la figura que se muestra a continuación.

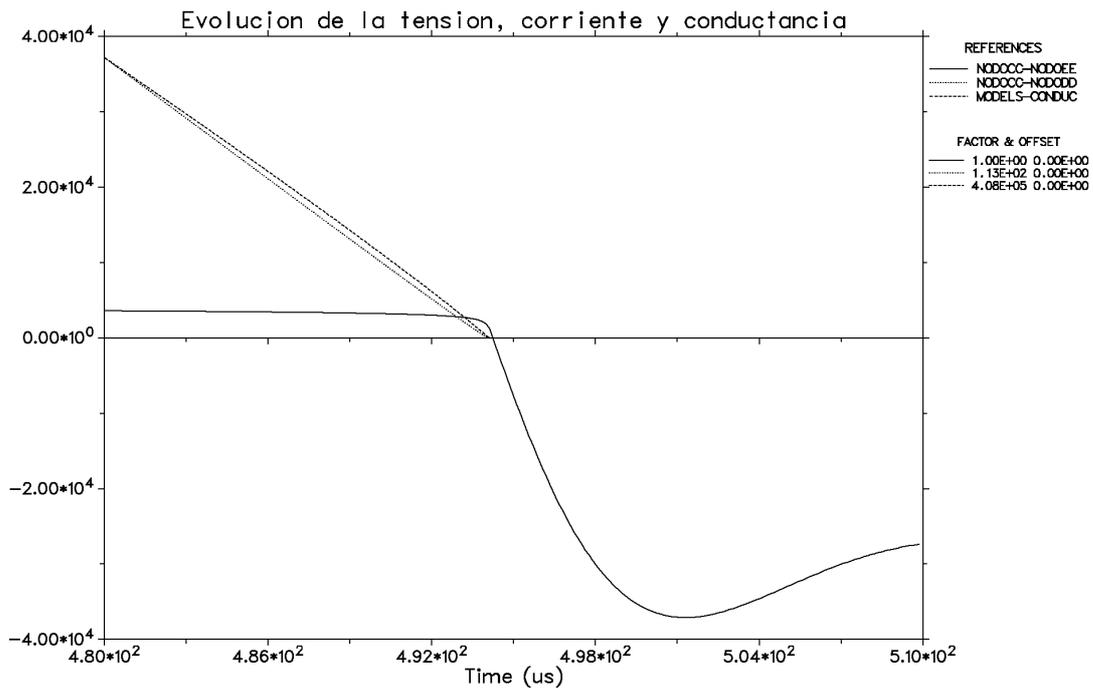


Figura N°4-33: Detalle de la apertura del arco eléctrico.

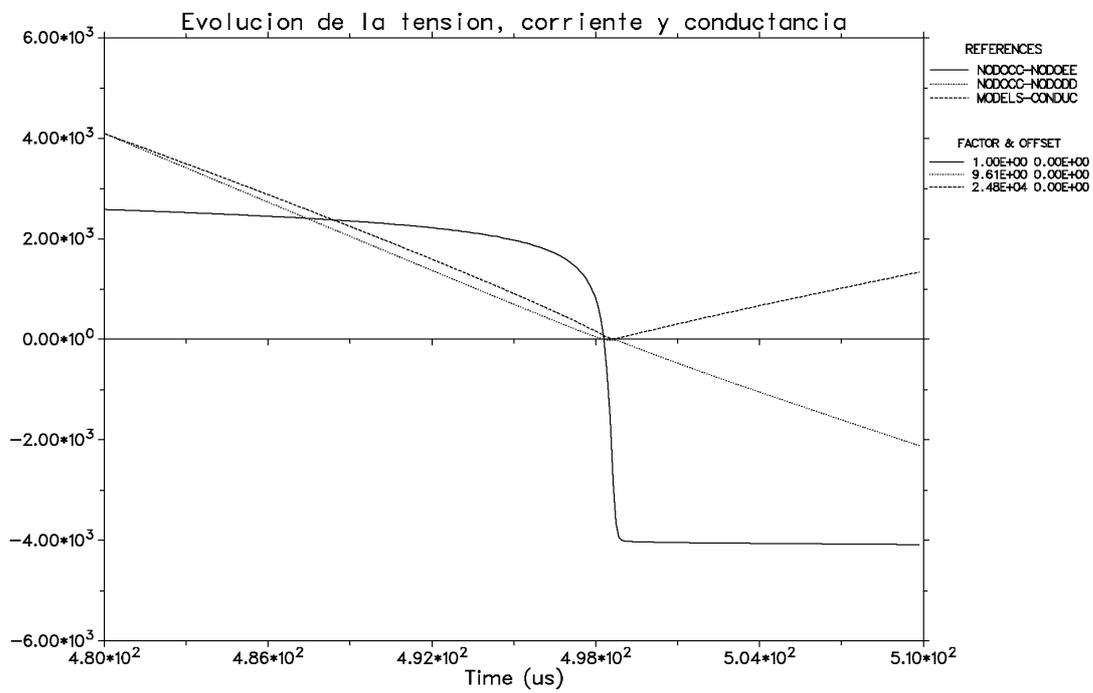


Figura N°4-34: Detalle de la reignición del arco eléctrico.

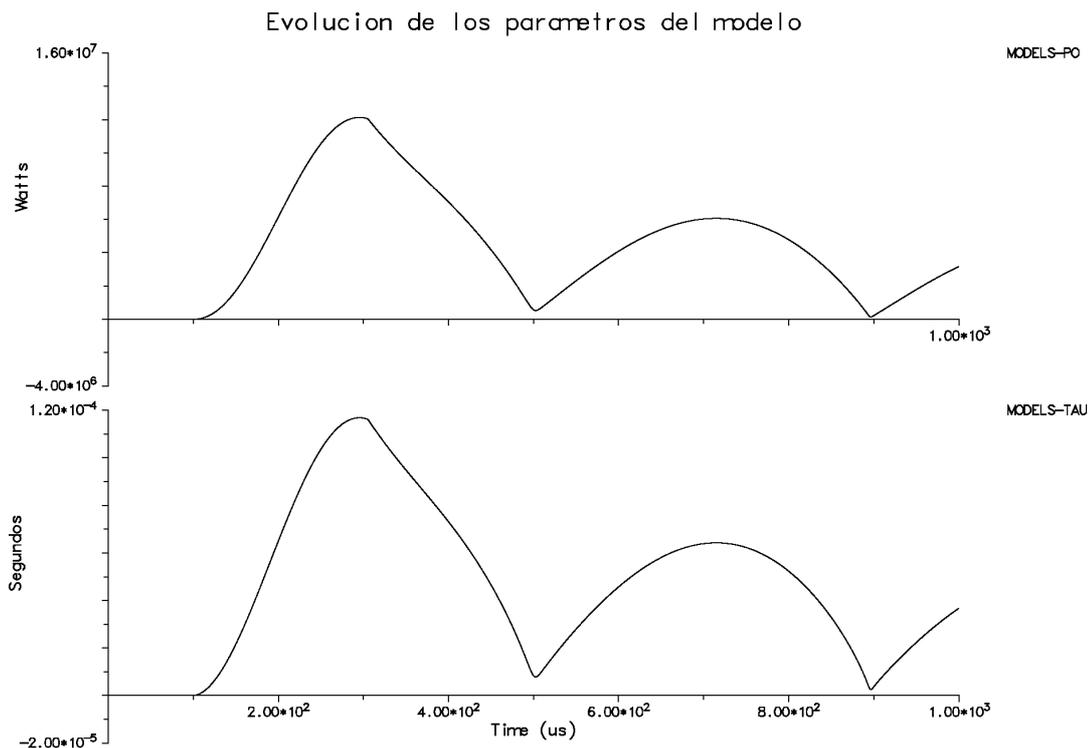


Figura N°4-32: Evolución de los parámetros del modelo durante la reignición.

Las dos figuras siguientes muestran en detalle de la evolución de la tensión con línea continua, la corriente con línea punteada y la conductancia con línea a trazos pequeños, para el caso de tener una apertura del arco, la primera de ellas y la segunda es para una reignición.

En la primera de ellas, figura 4-33, la evolución general de la corriente y la de la conductancia son suaves hasta el momento de la apertura donde ambas se anulan simultáneamente. En cambio la tensión debe pasar del valor determinado por la ecuación del modelo al nuevo valor impuesto por el circuito asociado y es por eso que comienza a oscilar alrededor de este valor impuesto externamente.

La segunda figura, para el caso de la reignición, la corriente ni siquiera intenta apagarse por unos instantes y atraviesa el eje cero de forma continua y sin alterar su trayectoria mientras que la conductancia luego de la reignición, comienza a aumentar paulatinamente. Por su parte la tensión, que antes de la reignición poseía un valor determinado por la ecuación de Cassie ahora debe asumir otro valor, también impuesto por la misma ecuación pero del otro lado del eje cero continuando así su evolución durante la simulación hasta la próxima reignición donde cambiará nuevamente su ubicación.

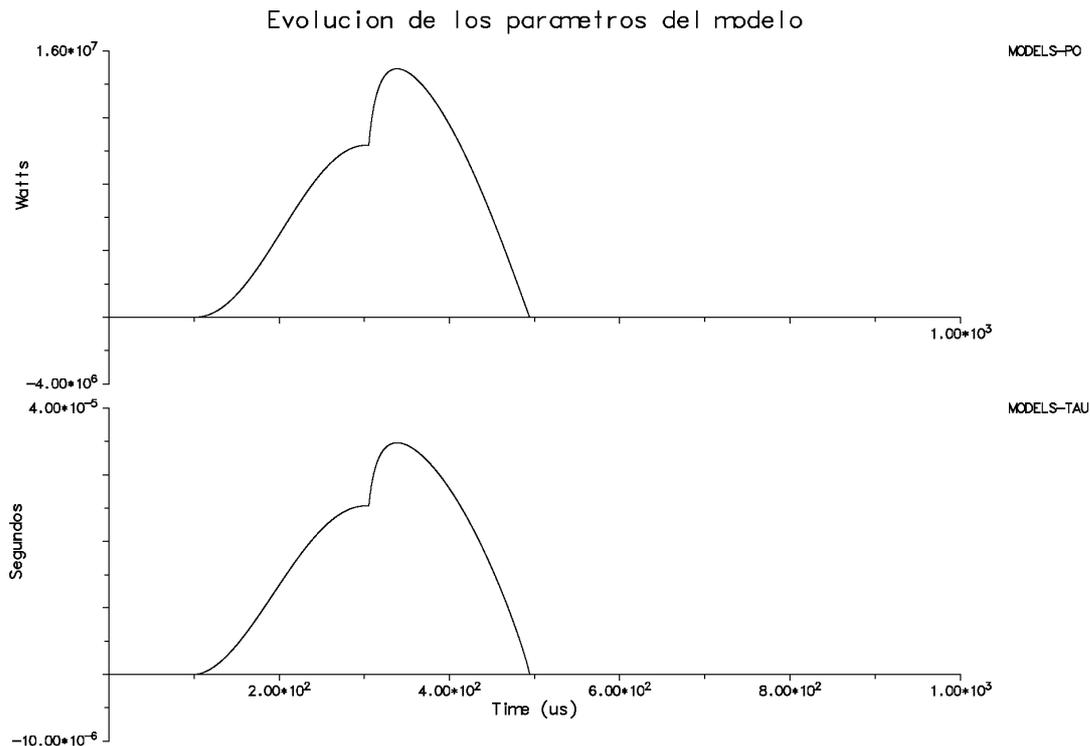


Figura N°4-31: Evolución de los parámetros del modelo durante la apertura.

En la figura anterior que ejemplifica sobre el comportamiento de los valores que toman los parámetros para el caso de la apertura, se puede apreciar la forma similar que toman ambos ya que son proporcionales a la conductancia y como ésta posee ese pequeño salto para unos 300 [ $\mu$ s] también lo poseen los parámetros del modelo de Mayr disminuyendo progresivamente hasta el instante de la apertura del arco.

En caso de simular una reignición con el modelo de Mayr y parámetros variables, el comportamiento de los parámetros de la ecuación responderá a la forma general mostrada en la figura siguiente, donde ya no existe el escalón que antes existía para 300 [ $\mu$ s] y en cambio sí permanece la forma general de la curva para ambos parámetros y, como consecuencia de su proporcionalidad con la conductancia, la evolución de los valores de los parámetros en los instantes donde se produce la reignición son indicativos de la cercanía o no de la apertura definitiva del arco.

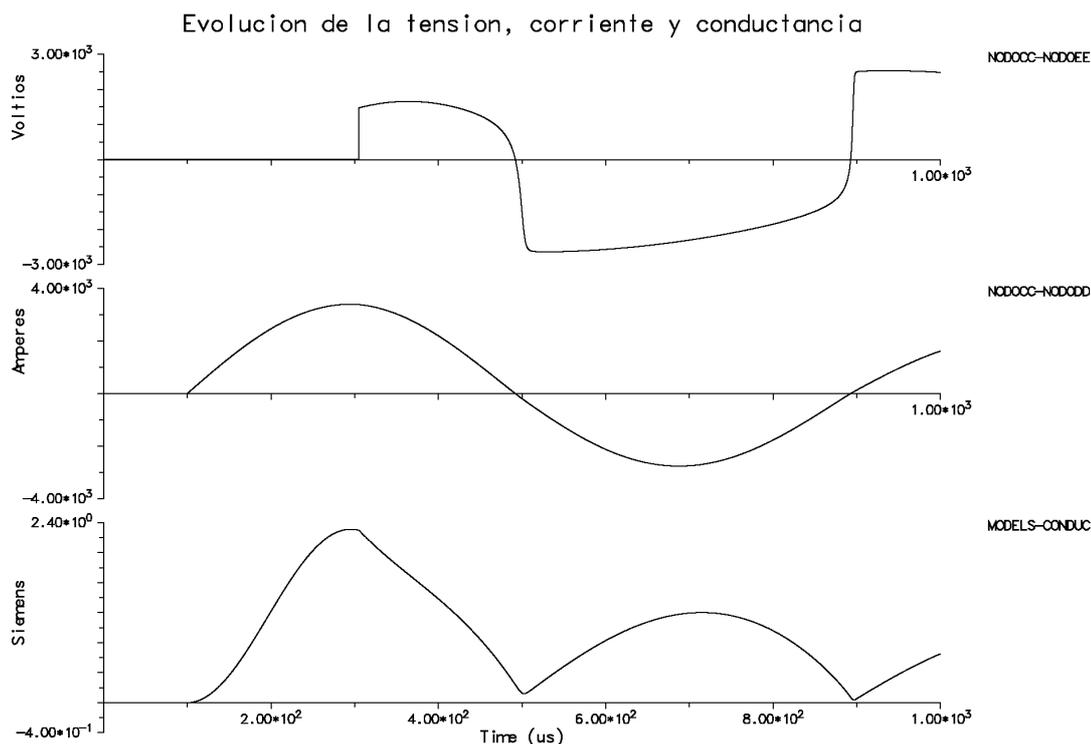


Figura N°4-30: Reignición simulada con el modelo de Mayr con parámetros variables.

La evolución de la curva de la corriente tiene un comportamiento suave y responde a su evolución natural mientras que la conductancia del arco, al igual de lo que ocurriera durante la apertura, asume un valor determinado por el usuario para momentos antes del nacimiento del arco para luego ser el resultado de la solución de la ecuación diferencial del modelo.

Al igual de lo ocurrido con parámetros constantes donde la magnitud de los picos de tensión es indicativa de la proximidad o no de la apertura definitiva, aquí el mínimo valor de la conductancia para cada reignición indica la cercanía de una interrupción definitiva de forma que si en reigniciones sucesivas disminuye su valor próximamente se llegará a la apertura del arco, y si va en aumento el interruptor no será capaz de interrumpir la corriente que circula por él.

con  $Q = Aq.g^{Bq}$  y  $P_o(g) = Ap.g^{Bp}$ . Los valores de los parámetros que se utilizan en este apartado se han escogido de tal forma que representen de forma general el comportamiento del arco eléctrico sin ser valores que se correspondan específicamente con un oscilograma determinado.

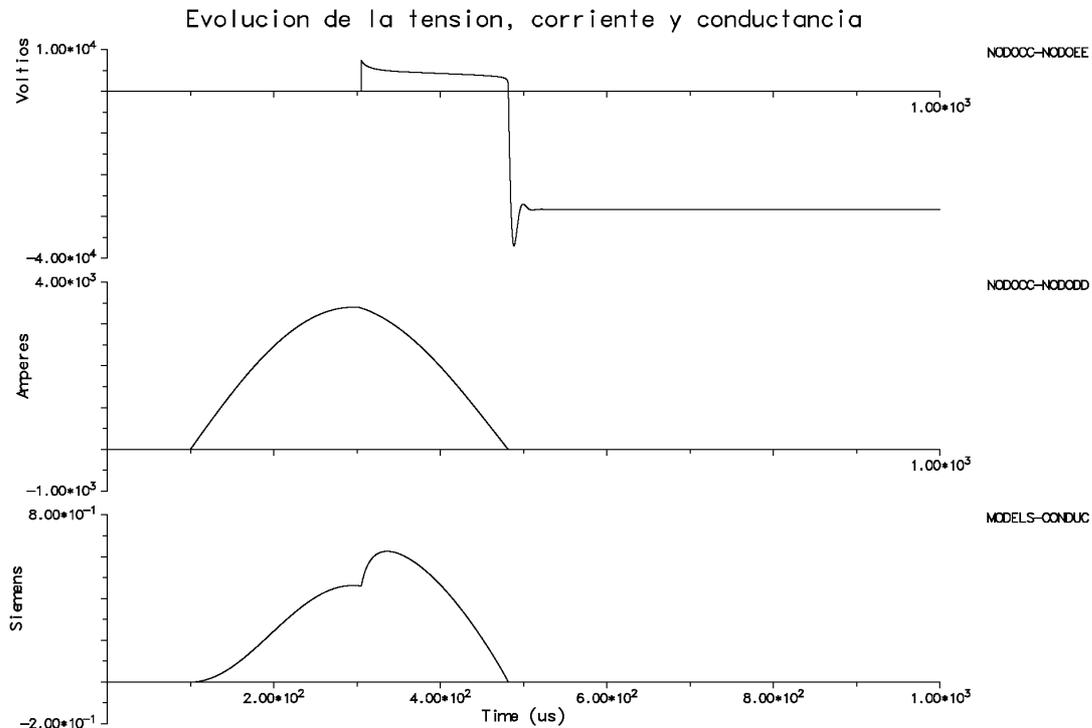


Figura N°4-29: Apertura simulada con el modelo de Mayr con parámetros variables.

La apertura del arco simulada con el modelo de Mayr, que se aprecia en la figura anterior, es similar a la presentada para parámetros constantes donde se distingue un pico de tensión al comienzo del arco, alrededor de los 300 [μs] y para este caso, no se presenta instantes antes de la apertura que se verifica a los 500 [μs]. Además la tensión aquí asume valores superiores que los anteriores para la región de alta corriente, en cambio los valores que toma la corriente son similares a los obtenidos con parámetros constantes.

Por su parte la conductancia comienza el ensayo con valor igual a cero ya que no circula corriente pero al circular ésta, si bien en la realidad el valor sigue siendo cero. Para evitar tener un brusco salto para cuando nace el arco eléctrico, se la fuerza a ser proporcional a la corriente que circula en esos instantes por el interruptor de forma de tener para un tiempo próximo a los 300 [μs] un valor cercano al calculado para el primer instante de establecimiento del arco.

Para el caso de reignición del arco, figura 4-30 y que se presenta a continuación, el primer pico de la curva de la tensión ya no se verifica y no es consecuencia del funcionamiento del modelo sino que está causado por el propio valor que asumen los parámetros del modelo empleados en esta simulación.

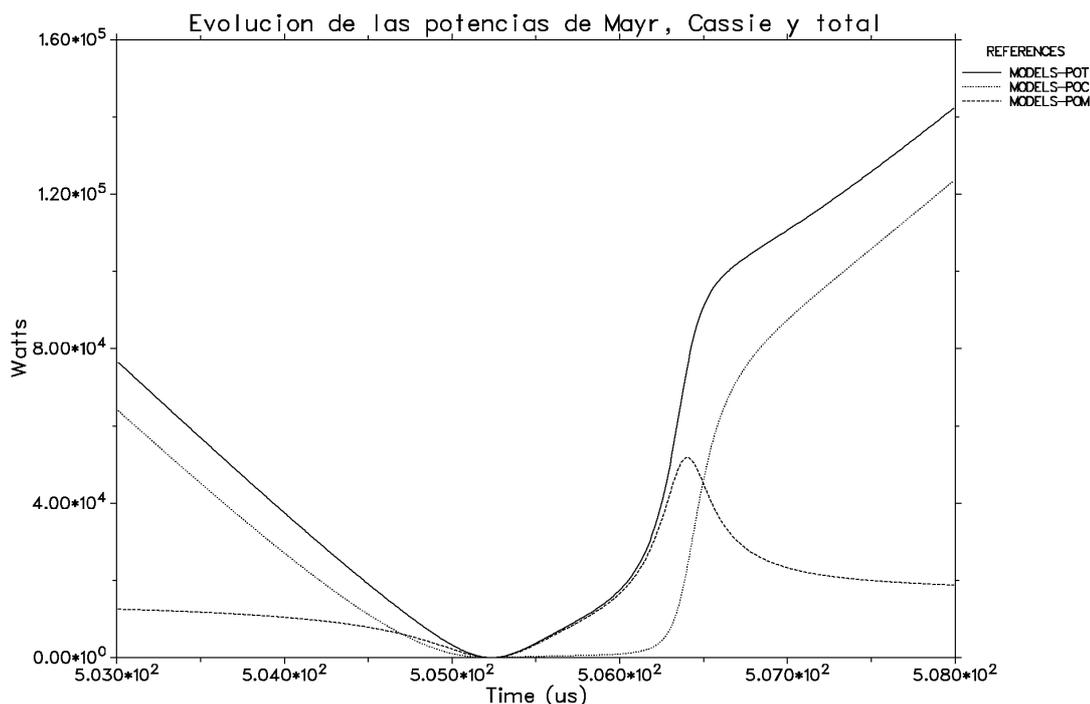


Figura N°4-28: Detalle del comportamiento de las potencias del modelo durante la reignición del arco eléctrico.

#### 4.4.- DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS MODELOS DE ARCO CON PARÁMETROS VARIABLES

La utilización de modelos de arco con parámetros dependientes de la conductancia tiene la particularidad de que éstos son especialmente difíciles de implementar en cualquier programa de simulación. Esto se debe a las sucesivas etapas por las que atraviesa el ensayo, diez en este caso, y que necesitan obligatoriamente acoplarse mutuamente de forma de evitar situaciones erróneas, especialmente si se habla de las condiciones iniciales de las simulaciones. Para las simulaciones que aquí se presentarán y sólo cuando los contactos están cerrados antes de la presencia del arco y cuando comienza a fluir corriente entre ellos, se ha relacionado a la conductancia del arco con la corriente que los atraviesa para evitar saltos de valores entre puntos de sucesivos de cálculo. Es decir que, para tiempos de entre 100 y 300 [µs] aproximadamente, la conductancia del arco en vez de tomar un valor igual a infinito que es lo que se corresponde con la realidad, asume un valor proporcional a la corriente que circula por el interruptor y sólo es para evitar saltos bruscos.

##### 4.4.1.- MODELO DE MAYR

Como se mencionara anteriormente, el modelo de arco propuesto por Mayr con parámetros dependientes de la conductancia responde a la ecuación diferencial

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

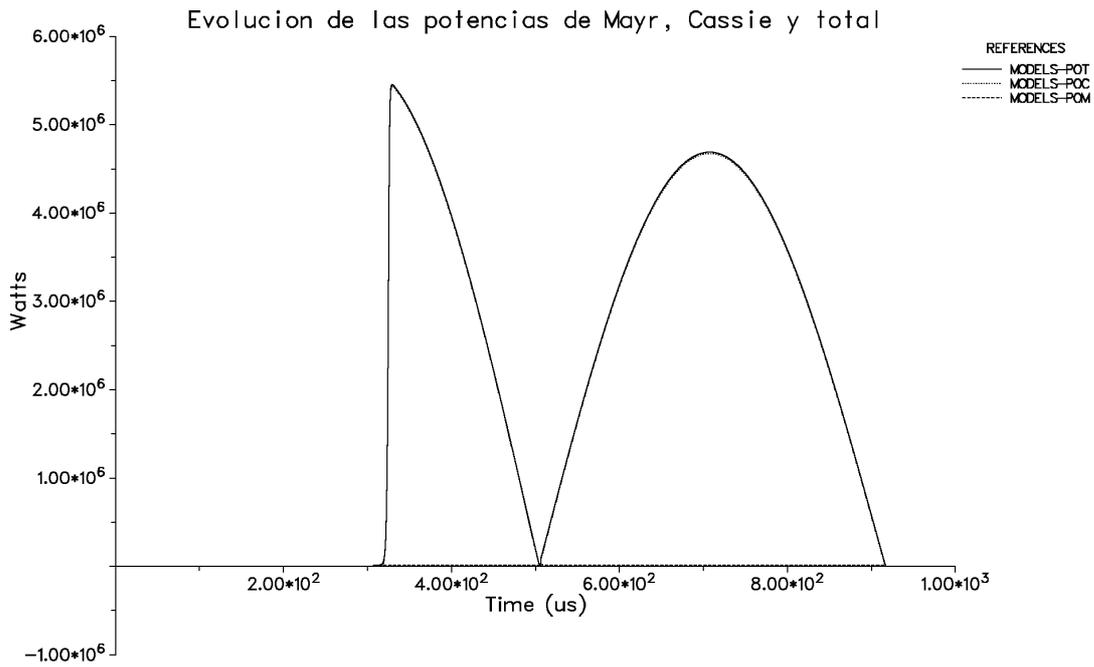


Figura N°4-26: Comportamiento de las potencias del modelo.

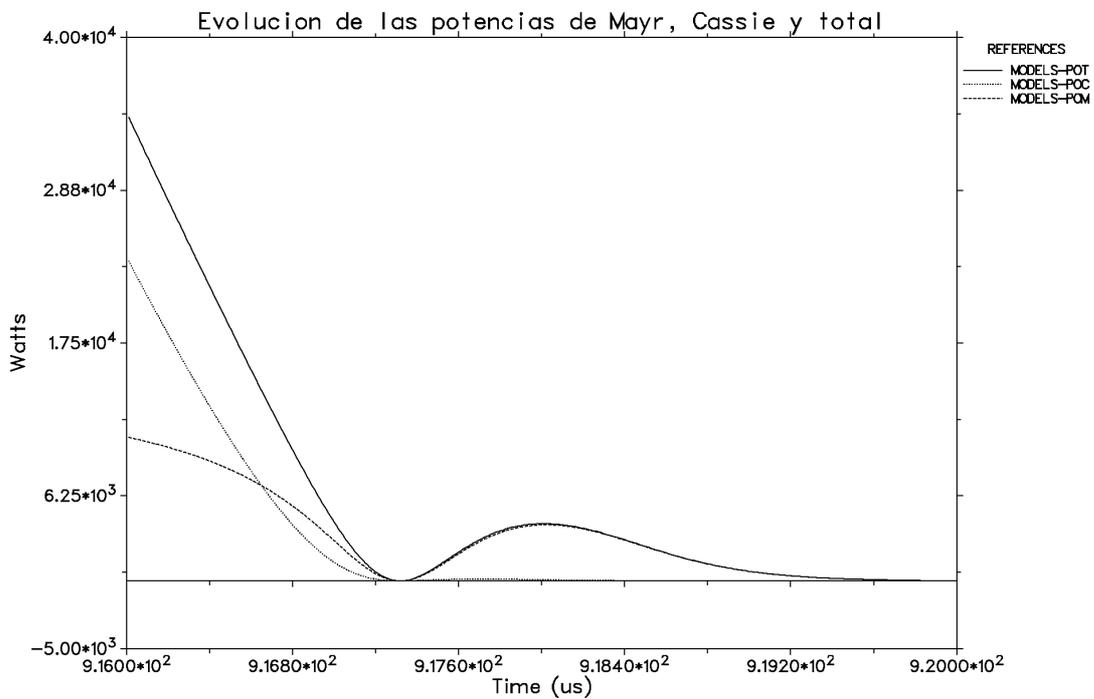


Figura N°4-27: Detalle del comportamiento de las potencias del modelo durante apertura del arco eléctrico.

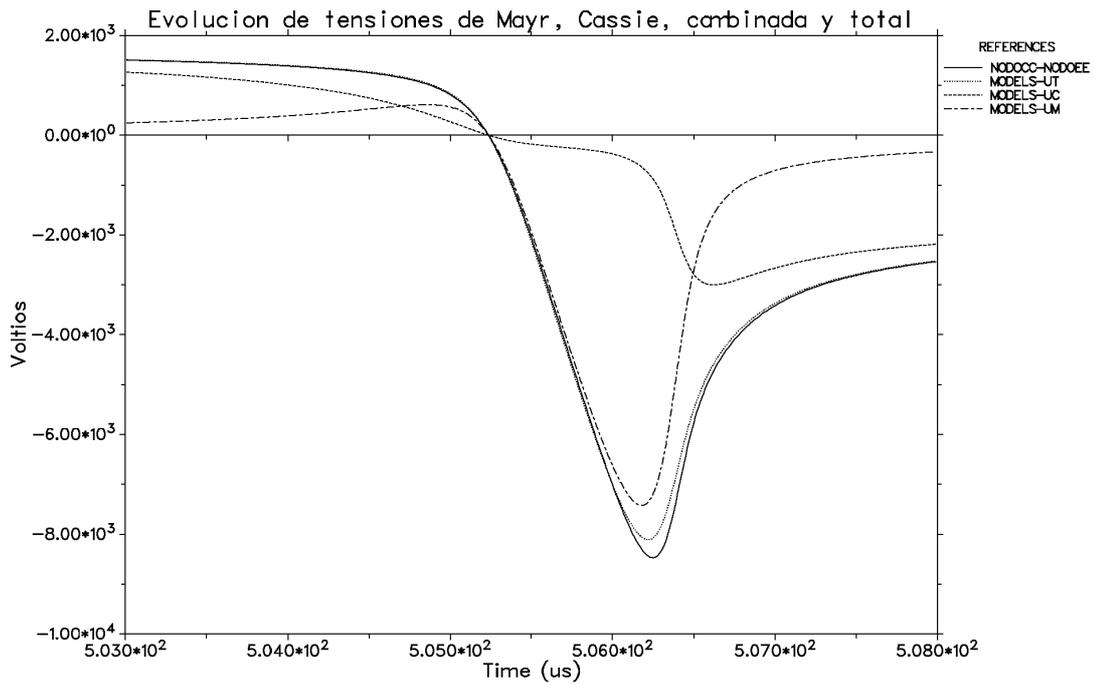


Figura N°4-25: Detalle del comportamiento de las tensiones del modelo durante la reignición del arco eléctrico.

De las figuras anteriores se puede establecer que el modelo de Mayr es más válido en la simulación del arco para sólo unos pocos microsegundos alrededor del paso por cero de la corriente o de la tensión - unos cuatro microsegundos aproximadamente independientemente de si se trata de una apertura o de una reignición - gobernando el resto de la simulación el modelo de Cassie. No obstante, el rango de variación de la influencia de cada modelo es también proporcional a la magnitud de los parámetros involucrados en cada ecuación diferencial.

Al igual de lo que sucediera con las tensiones, en las figuras siguientes se presenta la contribución de ambos modelos a la potencia total de arco calculada como el producto de la tensión impuesta por cada modelo, por la corriente que circula por el arco. De esta manera se puede llegar a interpretar como que la potencia que se está considerando es la que el medio refrigerante necesita extraer para lograr la anulación total del arco eléctrico. Aquí se puede apreciar que tanto para el caso de apertura como para la reignición, existe una distribución del aporte de cada modelo diferenciado por la cercanía o no al cruce por cero de la corriente.

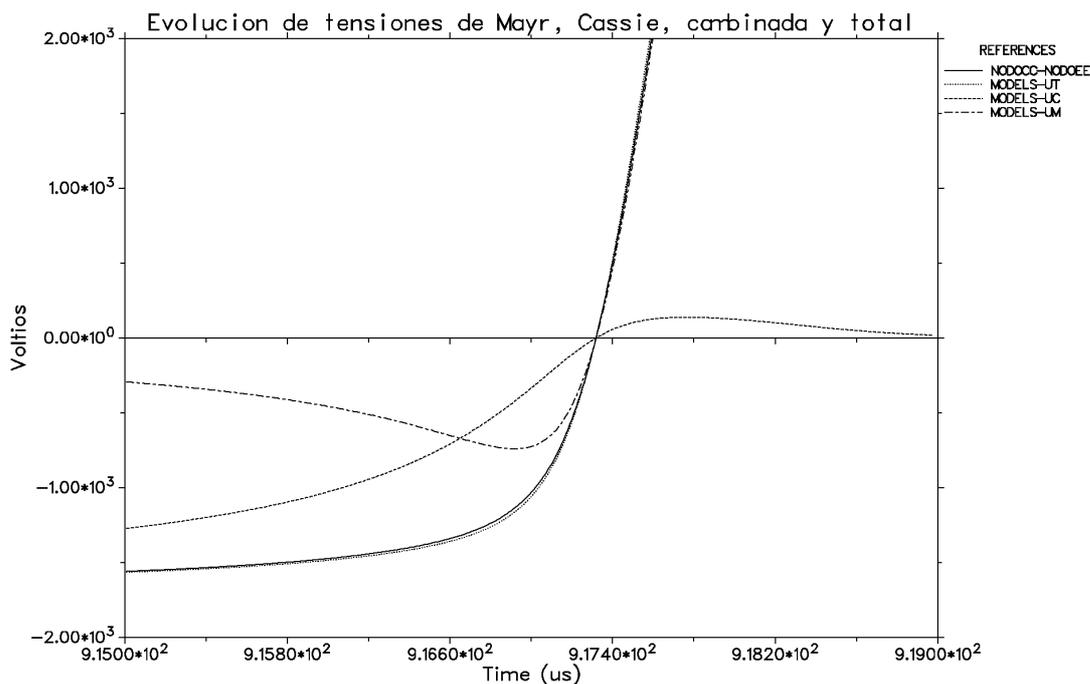


Figura N°4-24: Detalle del comportamiento de las tensiones del modelo durante la apertura del arco eléctrico.

A partir del cruce por cero de las tensiones existe un muy pequeño aporte de tensión debida al modelo de Cassie hasta unos 920 [ $\mu$ s]. Por su parte, la magnitud de la tensión impuesta por Mayr es la que gobierna la tensión de arco eléctrico en esta zona próxima al cero de la corriente. Luego y no mostrado en la figura 4-24, se produce un brusco descenso de la tensión de Mayr, para un tiempo superior a 920 [ $\mu$ s] y que se debe a que ya se ha satisfecho la condición de “mínima conductancia” y a partir de este instante se considera al interruptor como que ha logrado una apertura exitosa.

La tensión resultante en el interruptor para antes del cruce por cero de las tensiones es igual a la que realmente provoca el arco eléctrico. Luego, para tiempos superiores a 918 [ $\mu$ s] ya se nota la influencia del circuito asociado al interruptor de forma que la tensión final es diferente y de menor valor, respecto de la tensión combinada del arco eléctrico. Visto de esta forma, la influencia del circuito de prueba del ensayo, no tiene gran peso sobre la distribución interna de las tensiones del modelo combinado.

Por otra parte, es interesante analizar la que sucede en la misma simulación pero unos microsegundos antes donde se produce la reignición del arco, para la cual se presenta la figura 4-25, en donde se cumple con lo dicho respecto a la distribución de tensiones para los instantes previos al cruce por cero. Luego de este instante, la contribución total del modelo a la tensión en bornes del interruptor, es mayoritaria, pero se manifiesta una tensión impuesta por la red en el pico de tensión negativo de la misma polaridad que la impuesta por el modelo.

Aquí, por el contrario de lo sucedido en el caso de apertura, la tensión impuesta por Cassie, en vez de aproximarse al cero desde su valor negativo, vuelve a incrementarse y simultáneamente la tensión debida a Mayr comienza a disminuir bruscamente, combinándose ambas para lograr la evolución de tensión mostrada en línea de puntos.

Al igual que lo ocurrido en las figuras anteriores, la tensión total causada por la acción combinada de los modelos se representa con una línea continua, la línea de puntos es causada por el modelo de Cassie mientras que la línea a trazos pequeños es debida al modelo de Mayr. Si bien las evoluciones de las tensiones son parecidas tal cual puede verse en la figura 4-23, luego se mostrarán los detalles de la reignición y de la apertura definitiva del arco, para así poder evaluar los aportes según cada modelo. Nuevamente, los valores de las tensiones no han sido escalados con el fin de poder observar claramente el aporte de cada modelo a la tensión resultante.

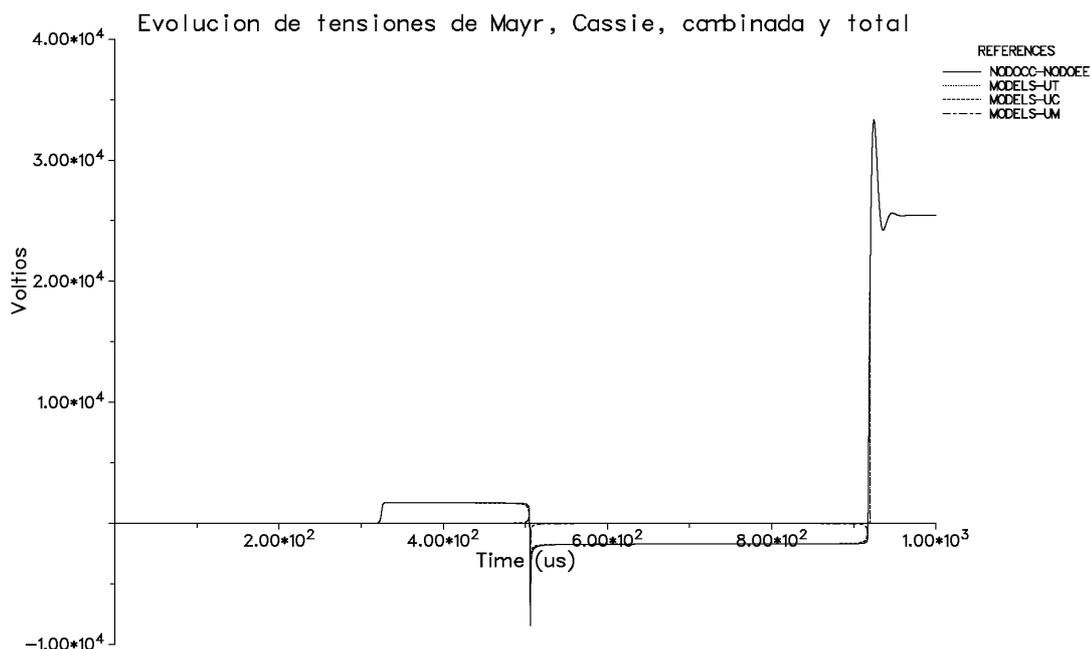


Figura N°4-23: Comportamiento de las tensiones del modelo.

El aporte del modelo de Cassie a las tensiones se puede observar en las regiones de alta corriente, cobrando importancia el aporte del modelo de Mayr en los cruces por cero de ésta última. Ahora bien, la suma combinada de ambos modelos es la tensión que trata de imponer el arco eléctrico al interruptor pero éste a su vez, está solicitado por el circuito eléctrico asociado de forma que la tensión resultante total es la suma de la combinada de los modelos más la impuesta por la red. En las figuras de las tensiones, figuras 4-23 a 4-25, la línea continua representa la evolución de todas las tensiones impuestas en bornes del interruptor - es decir las del arco más la de la red - la línea a puntos es la tensión combinada del modelo, la línea a trazos pequeños es la tensión de Cassie mientras que la restante es la tensión impuesta por el modelo de Mayr.

El detalle del comportamiento de las tensiones para la simulación de la apertura, figura 4-24, muestra de qué manera ambos modelos se distribuyen su aporte a la tensión combinada del modelo. Para tiempos menores a 915 [ $\mu$ s] la tensión es puramente debida al modelo de Cassie y para 916,5 [ $\mu$ s] aproximadamente, el aporte es mitad y mitad. A partir de 917 [ $\mu$ s] la tensión es puramente debido a Mayr, anulándose la tensión de Cassie.

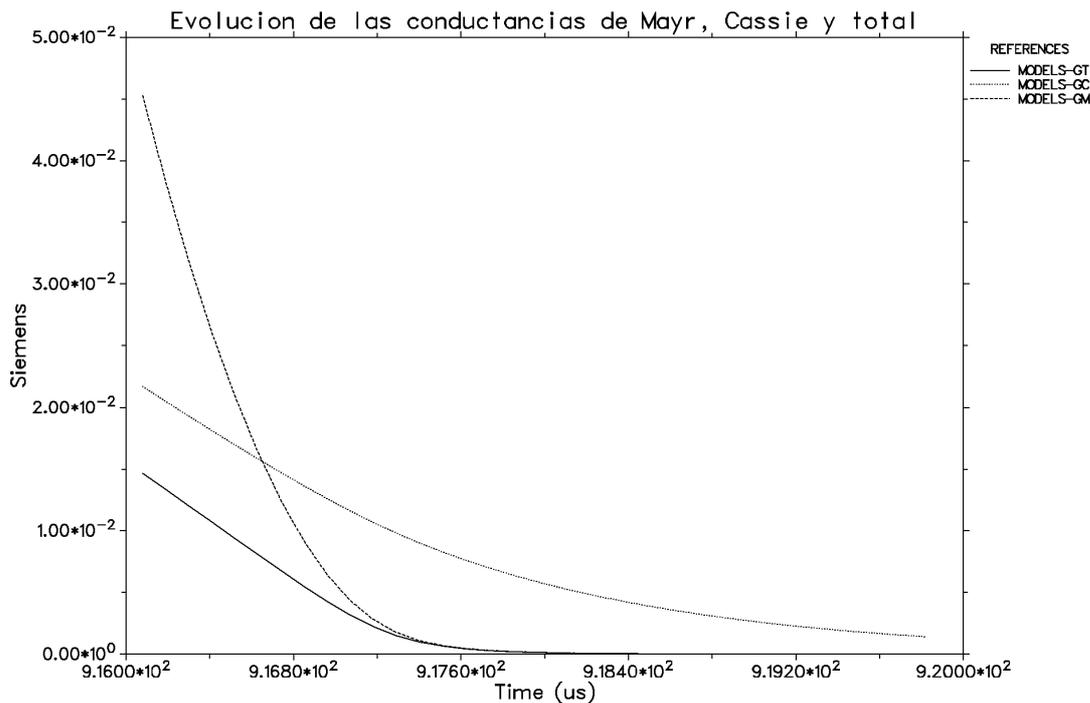


Figura N°4-21: Detalle del comportamiento de las conductancias del modelo durante la apertura del arco eléctrico.

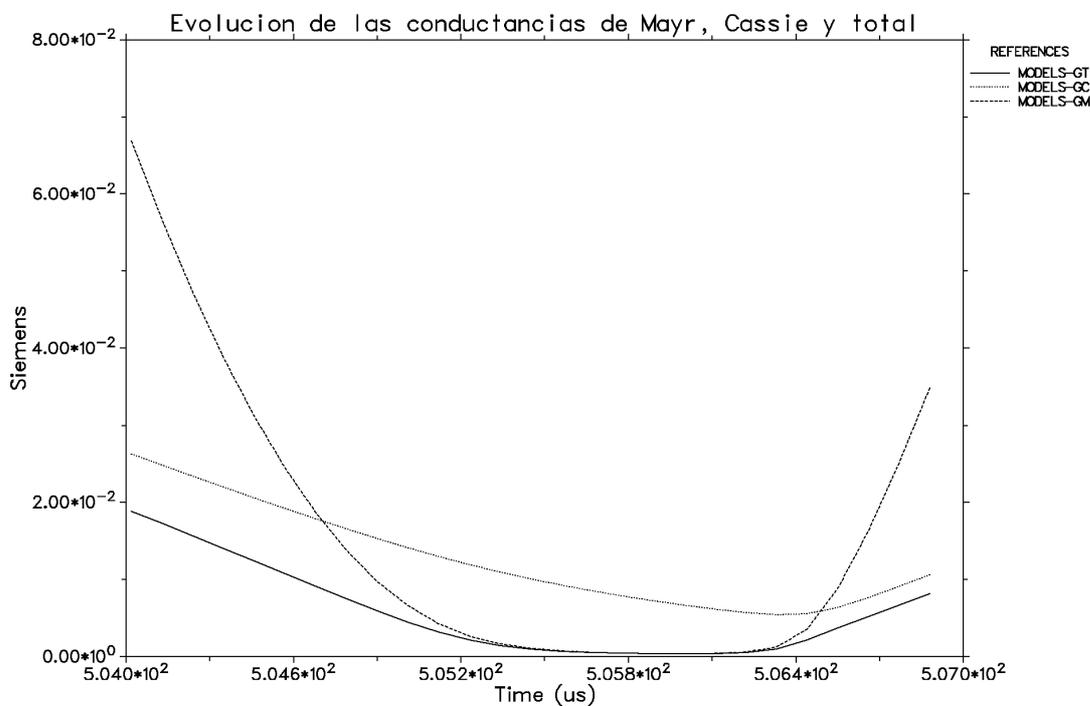


Figura N°4-22: Detalle del comportamiento de las conductancias del modelo durante la reignición del arco eléctrico.

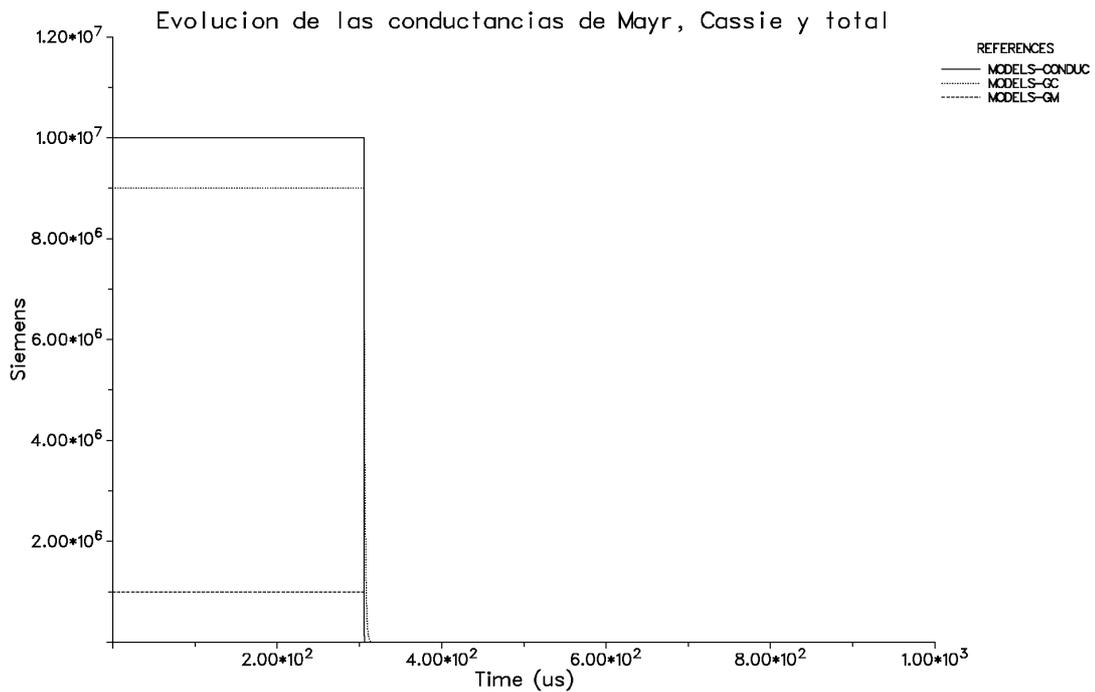


Figura N°4-20: Comportamiento de las conductancias del modelo.

Analizando el detalle de las conductancias se puede observar que, para tiempos inferiores al cruce por cero de la corriente - tiempos menores a 916  $[\mu\text{s}]$  en la figura 4-21 - la conductancia total es casi totalmente impuesta por el modelo de Cassie mientras que para valores de tiempo cercanos a 917  $[\mu\text{s}]$  al tener valores semejantes ambas conductancias su resultante es compartida aproximadamente en partes iguales por ambos modelos. Teniendo prioridad a partir de aquí la conductancia impuesta por el modelo de Mayr.

Igual distribución de la acción de los modelos sobre la conductancia se observa en el caso de la reignición estando el modelo de Cassie al mando de la conductancia total para las regiones extremas de la figura 4-22 y el modelo de Mayr es el encargado de manejar la conductancia entre 505 y 506  $[\mu\text{s}]$ .

En las dos figuras analizadas y donde se presentan las relaciones entre las conductancias, los valores que asumen éstas son reales y no han sido escalados para su graficación.

4.3.3.1.- Separación del modelo combinado

La figura siguiente presenta el comportamiento del modelo combinado para el caso de la apertura del arco eléctrico en el segundo paso por cero de la corriente. Esta situación permitirá analizar la apertura y la reignición del arco en la misma simulación.

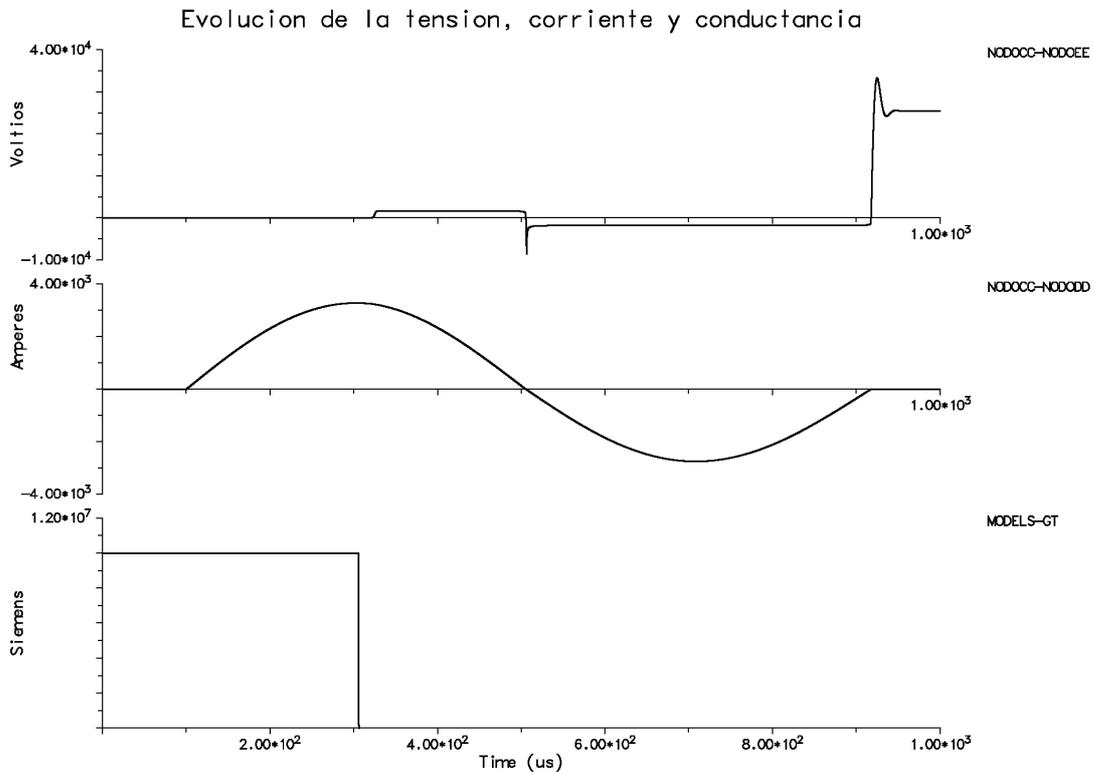


Figura N°4-19: Comportamiento del modelo Mayr+Cassie para la apertura del arco en el segundo paso por cero de la corriente.

Este apartado comienza con el estudio detallado del modelo combinado presentado anteriormente y la figura 4-20 que se encuentra a continuación, muestra la distribución de la conductancia durante todo el tiempo de simulación empleado. Para ella se debe aclarar que, como en realidad la región que más importa para el estudio es aquella en donde está presente el arco eléctrico y esta región recién comienza a partir de los 300 [μs] aproximadamente, esta figura es sólo demostrativa de la distribución de conductancias impuesta por el modelo antes del comienzo del arco eléctrico.

La participación de las conductancias del modelo de Mayr y la del de Cassie son del 10 % y del 90 % respecto de la conductancia total que se había impuesto para ambos modelos, tal cual se puede observar para tiempos inferiores al comienzo del arco eléctrico. Esta relación es sólo para facilitar los cálculos y sin importancia durante la existencia del arco eléctrico por lo tanto aquí no se cumple la relación entre conductancias descritas anteriormente. Para este caso la relación entre las conductancias, para tiempos inferiores a 300 [μs], es  $G_{total} = G_M + G_C$  y para tiempos mayores donde sí existe el arco eléctrico resulta  $1/G_{total} = 1/G_M + 1/G_C$ .

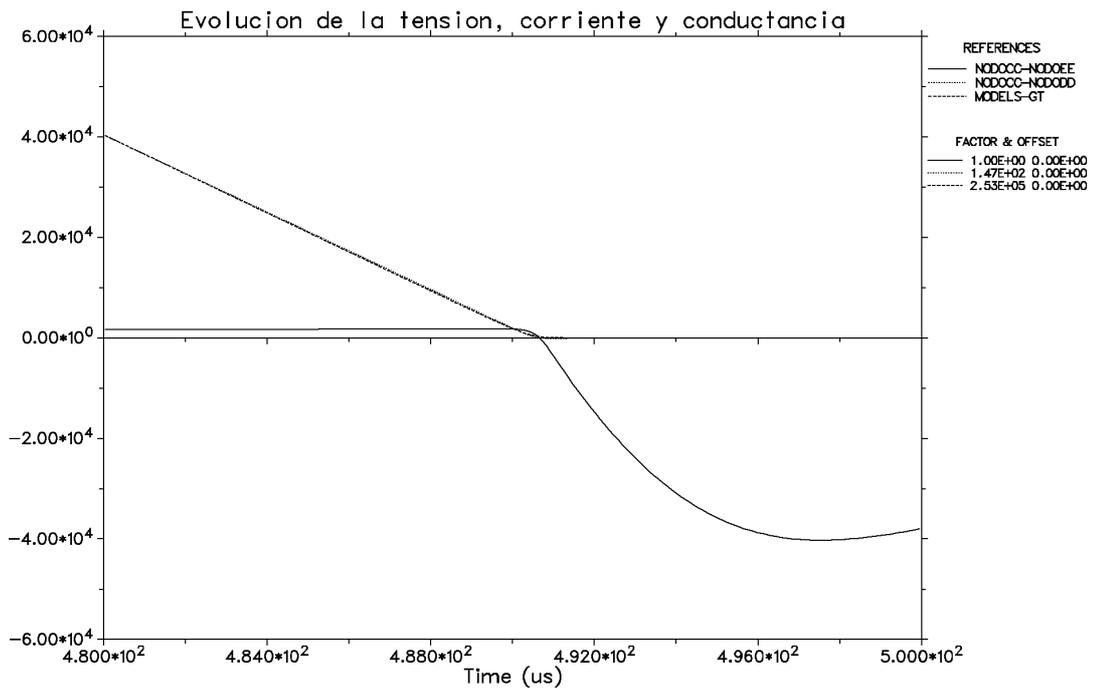


Figura N°4-17: Detalle de la apertura del arco eléctrico.

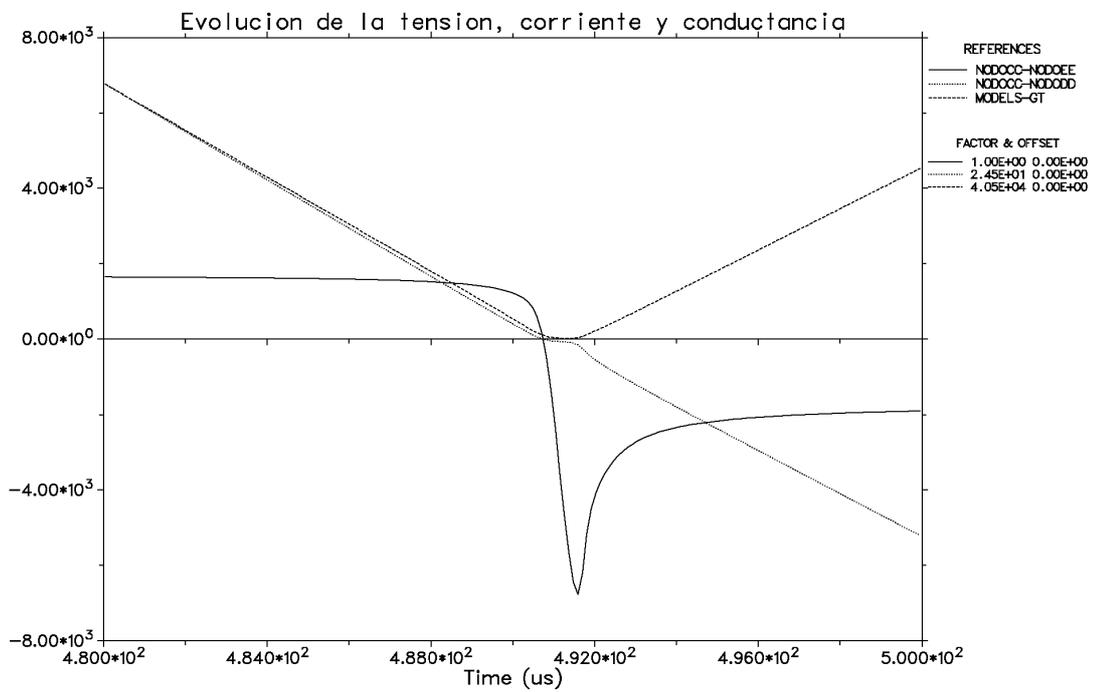


Figura N°4-18: Detalle de la reignición del arco eléctrico.

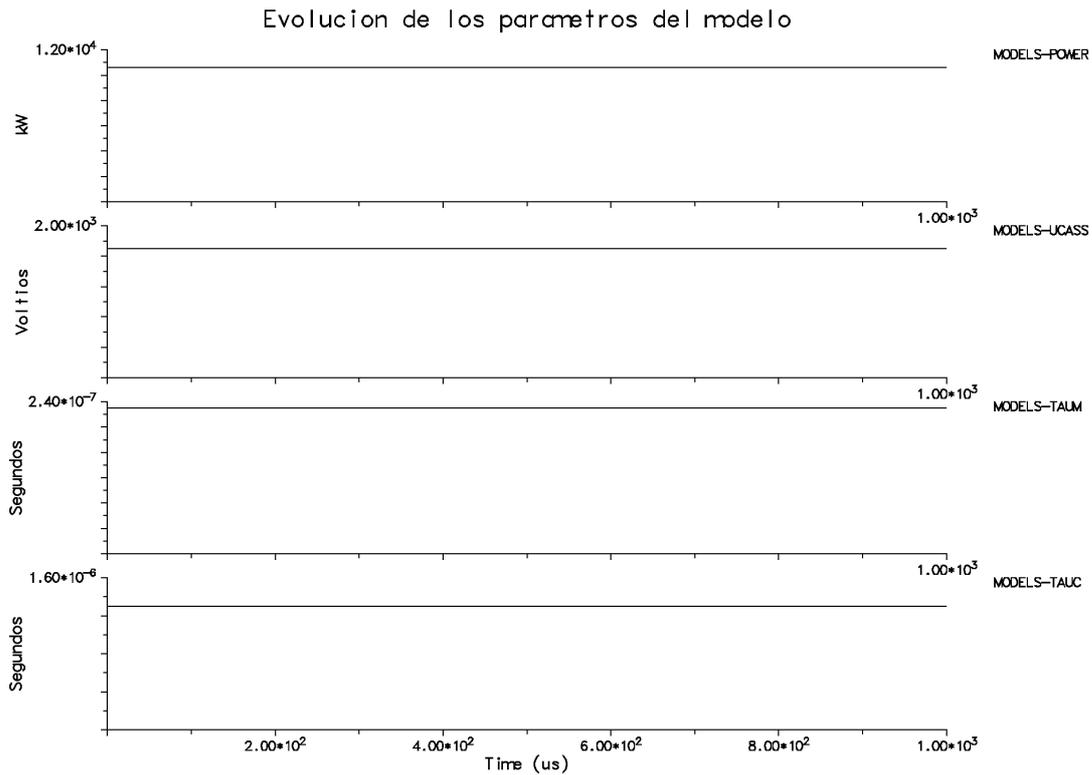


Figura N°4-16: Evolución de los parámetros del modelo combinado.

Para finalizar este ítem, a continuación se muestran los detalles de la evolución de la tensión, corriente y conductancia para el caso de una apertura exitosa y de una reignición del arco. En ellas se puede apreciar que tales evoluciones no presentan características especiales y se mantienen dentro de las formas generales ya analizadas.

Lo más llamativo para destacar son los valores prácticamente constantes que asume la tensión para antes del paso por cero de la corriente para el caso de la apertura exitosa. Además, si se analiza el detalle de la reignición se podrá ver una pequeña tendencia de la corriente a mantenerse próxima al eje cero alrededor de  $491 \mu\text{s}$ , que se puede interpretar como que el arco quiere apagarse pero no tiene la fuerza suficiente para hacerlo en este paso por cero de la corriente.

En el caso de la reignición del arco, se ve que la tensión en regiones alejadas del cero de corriente asume el valor establecido por el modelo de Cassie de manera constante, mientras que los picos que posee son la consecuencia de la utilización del modelo de Mayr.

Aquí existen dos indicadores de que la reignición se mantendrá firme, es decir, que el arco tiene pocas posibilidades de extinguirse; uno de ellos es la forma general de la corriente que tiene una evolución muy suave a partir del nacimiento del arco para un tiempo de 300 [μs]. El segundo es el valor comparativo de la magnitud de los picos de tensión en las dos reigniciones que presenta la figura, recordando que para estar cerca de la apertura exitosa la amplitud de dichos picos debería disminuir con cada reignición pero aquí no lo hace y se incrementan paulatinamente. Por su parte la curva que presenta la conductancia es similar a las formas ya estudiadas.

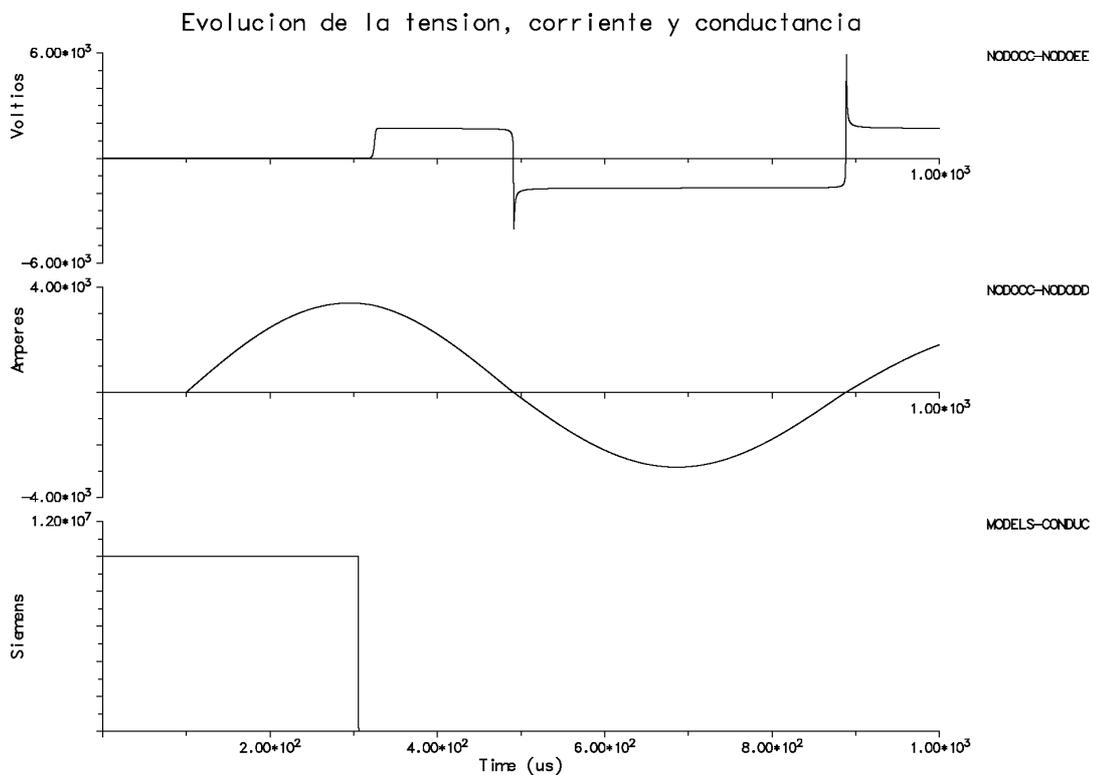


Figura N°4-15: Reignición simulada con el modelo de Mayr+Cassie con parámetros constantes.

Al ser este un modelo combinado que posee parámetros constantes, la figura siguiente muestra la evolución en el tiempo de los cuatro parámetros mostrando que éstos asumen los valores de los dos modelos anteriores siendo " $Q_M$ " y " $Q_C$ " la constante de tiempo de las porciones de Mayr y la de Cassie respectivamente.

#### 4.3.3.- MODELO COMBINADO DE MAYR+CASSIE

Este modelo es una combinación del modelo de Mayr conectado en serie con el modelo de Cassie y donde el resultado de la conductancia final es la suma de las conductancias de ambos modelos de la siguiente forma:

$$\frac{1}{g_{total}} = \frac{1}{g_{Mayr}} + \frac{1}{g_{Cassie}}$$

Así visto, la acción de control sobre la resistencia variable la comparten ambos modelos simultáneamente gobernando cada uno de ellos una porción de la conductancia total. Esto que obliga a utilizar cuatro parámetros para su utilización:  $P_o$  y  $Q_M$  para el modelo de Mayr y  $U_o$  y  $Q_C$  para el de Cassie.

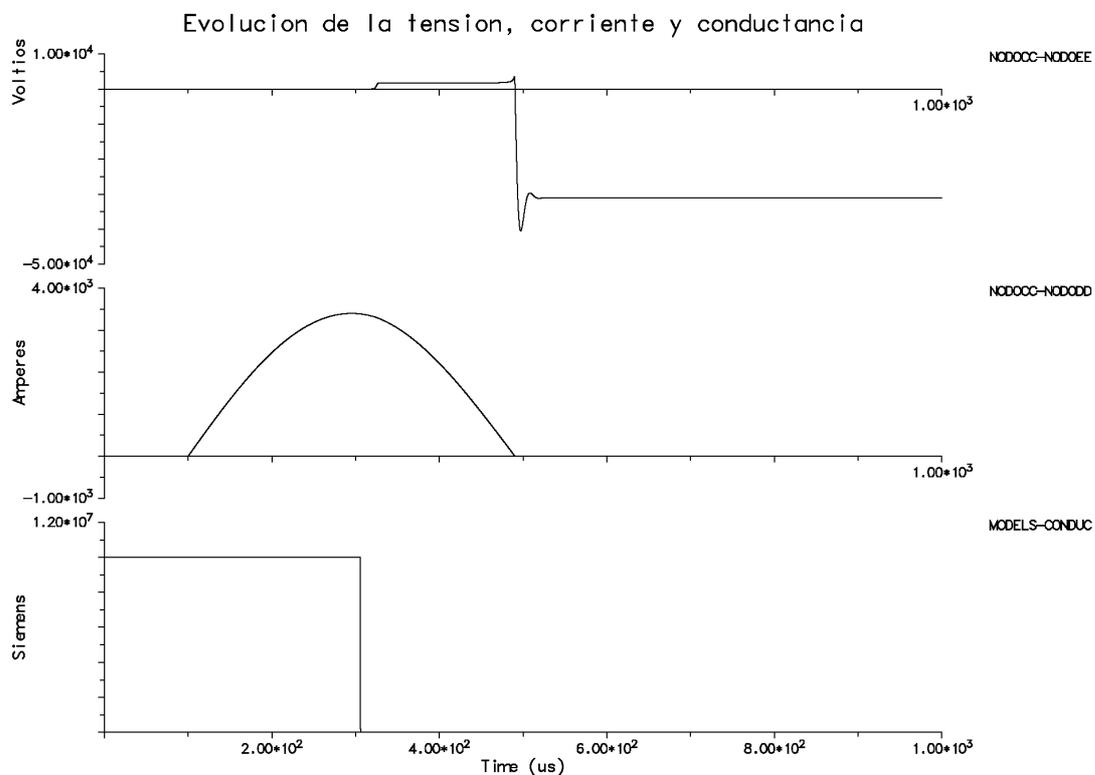


Figura N°4-14: Apertura simulada con el modelo de Mayr+Cassie con parámetros constantes.

En la figura anterior se presenta el comportamiento del modelo combinado Mayr+Cassie para el caso de representar la apertura de un interruptor. En ella se puede ver como la forma general de la tensión es la suma de la porción de Cassie, ya que luego de establecido el arco mantiene un valor constante, más la porción de Mayr, que es la que causa el pico antes de su paso por cero. Luego del cambio de polaridad, la curva de la tensión responde al comportamiento ya conocido mientras que la corriente y la conductancia mantienen las formas generales de sus curvas respectivas.

Para la simulación de la reignición del arco se modificó el valor del parámetro de la potencia de la fórmula de Mayr de forma de mantener el resto de los parámetros iguales a los utilizados en la figura anterior, si bien se hubiera podido modificar cualquiera de ellos.

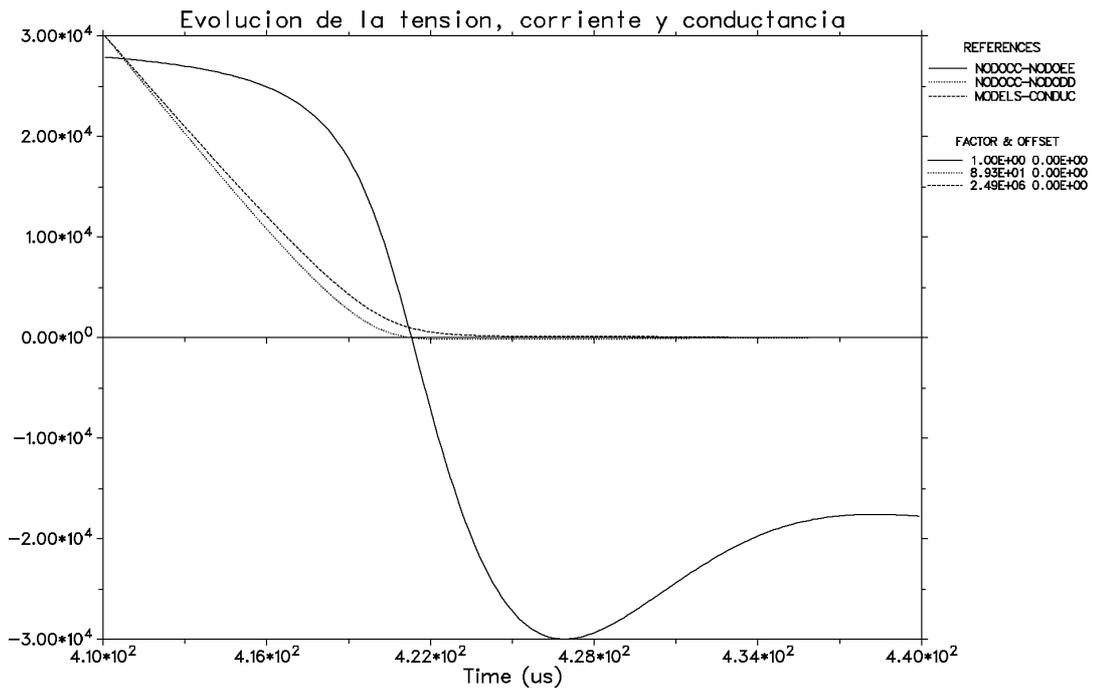


Figura N°4-12: Detalle de la apertura del arco eléctrico.

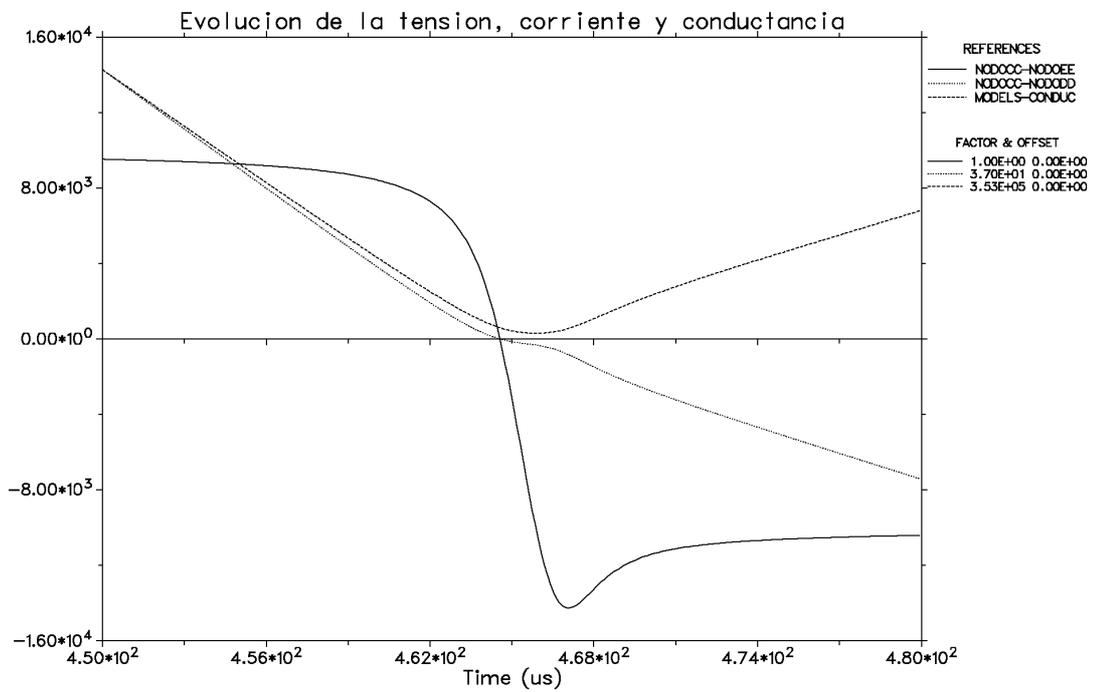


Figura N°4-13: Detalle de la reignición del arco eléctrico.

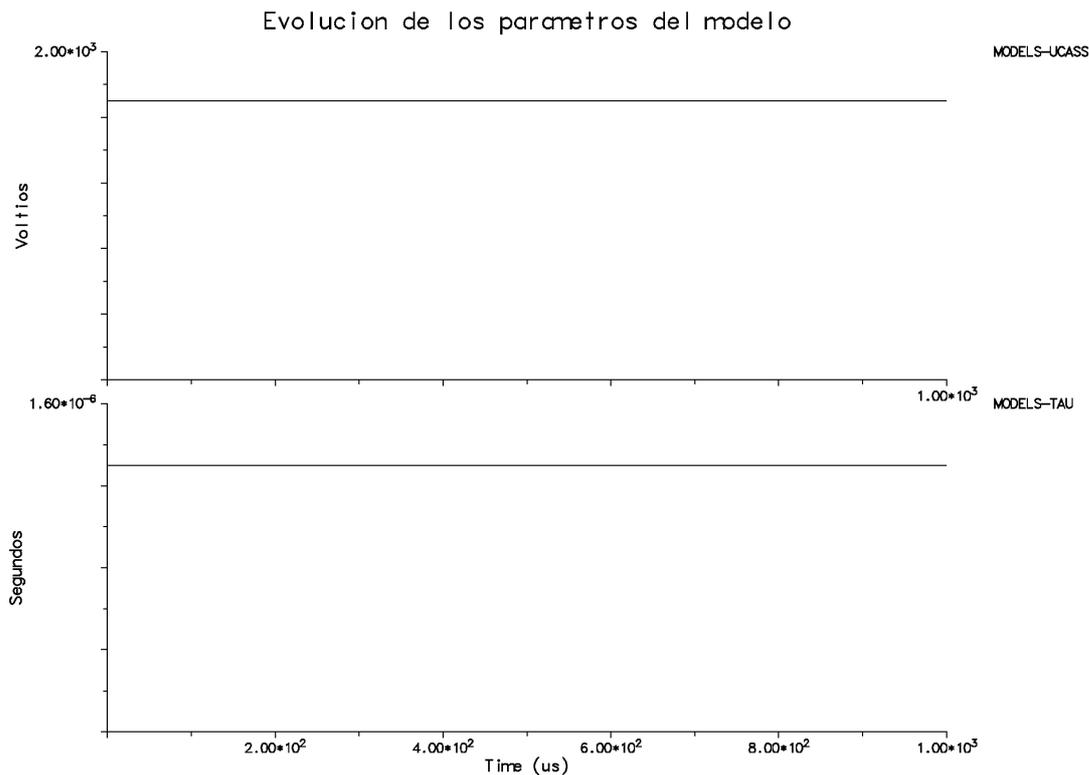


Figura N°4-11: Evolución de los parámetros del modelo de Cassie.

La evolución de la tensión en línea continua, la corriente en línea de puntos y la conductancia en línea a rayas pequeñas se muestran a continuación, figura 4-12, para el caso de simular una apertura exitosa con el modelo de Cassie como una ampliación de la figura analizada anteriormente.

La forma de la curva de la tensión es característica del modelo empleado y al contrario de lo que ocurría con el modelo de Mayr, su valor se mantiene prácticamente constante y desciende de forma paulatina invirtiendo su polaridad hasta tomar el nuevo valor impuesto por el circuito luego de una pequeña oscilación. El valor inicial de la tensión se corresponde con el del parámetro  $U$ .

Por su parte, al tomar la tensión un valor tan elevado, la forma general de la curva de la corriente y la de la conductancia, toman formas de variación muy suaves ya que en ningún momento podría producirse una reignición del arco con tal valor. En cambio si se disminuyera este valor hasta lograr una reignición, tal cual puede verse en la figura 4-13, la relación entre la tensión, corriente y conductancia tomarían la forma indicada en la figura en donde la corriente pasa de largo por su cero y la conductancia toma formas similares para antes y después de su mínimo. En los extremos de la figura la tensión toma valores semejantes y son los impuestos por el usuario a través del parámetro de la ecuación.

forma general de la curva de la corriente, no es modificada por este valor del parámetro. Luego del paso natural por el cero de corriente, vuelve a establecerse entre los contactos una tensión de valor similar al anterior luego de un pequeño pico repitiéndose este comportamiento tantas veces como reigniciones se produzcan.

La evolución de la amplitud de los valores máximos de la tensión es un indicador de la proximidad de la apertura exitosa del interruptor, a mayores valores existen menos posibilidades de apertura definitiva.

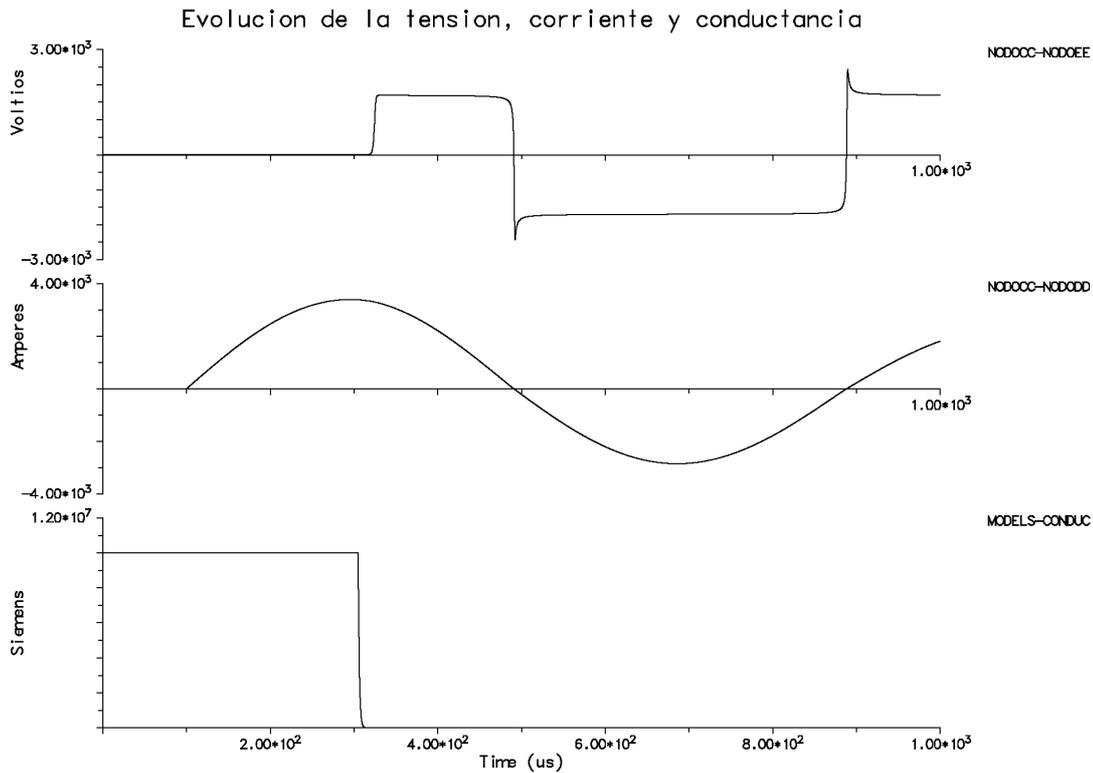


Figura N°4-10: Reignición simulada con el modelo de Cassie con parámetros constantes.

Al igual de lo que ocurriera para el modelo de Mayr, el comportamiento de los parámetros del modelo de Cassie permanece invariable con el tiempo y se puede observar en la figura 4-11.

Aquí el menor valor que toma la tensión es el causante de las sucesivas reigniciones del arco ya que, si se deseara simular una apertura exitosa, habría que elevar este valor convenientemente tal cual lo hecho para las figuras precedentes, aunque también se podría actuar sobre la constante de tiempo pero sólo dentro de ciertos límites próximos a la reignición. Es decir, la variación “gruesa” se debe realizar variando la tensión mientras que la “fina” se puede hacer actuando sobre la constante de tiempo.

#### 4.3.2.- MODELO DE CASSIE

La simulación utilizando el modelo propuesto por Cassie y representado por la ecuación

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left( \frac{v^2}{U_0^2} - 1 \right)$$

se muestra a continuación. Es característico también aquí, al igual que lo hiciera con el modelo de Mayr, el comportamiento de la tensión durante la simulación, no presentando picos cerca del cero de corriente y sí un valor prácticamente constante para regiones de alta corriente.

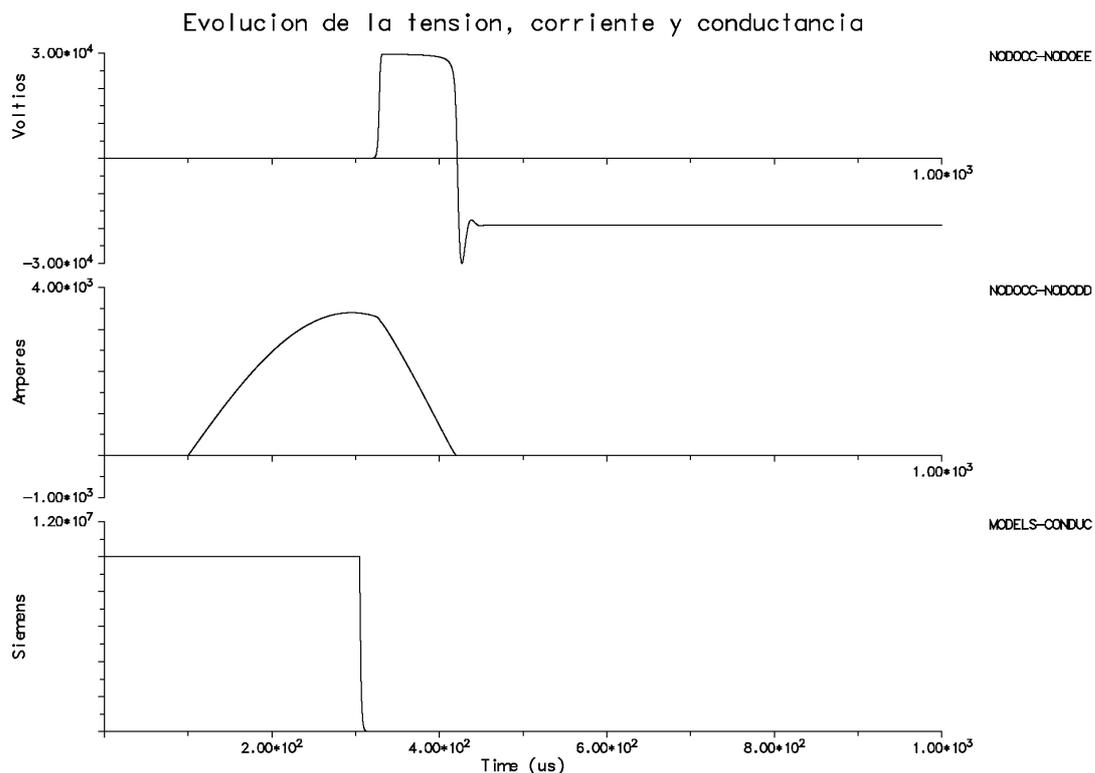


Figura N°4-9: Apertura simulada con el modelo de Cassie con parámetros constantes.

Con el comienzo de la separación de los contactos para un tiempo de 300 [μs] aproximadamente, se establece un arco eléctrico que dura unos 100 [μs] hasta el primer paso por cero de la corriente en donde se produce la apertura. La magnitud de la tensión impuesta a través del modelo de Cassie como el valor del parámetro  $U$  al arco eléctrico, es la causa de la modificación de la forma general de la curva de la corriente la cual se modificaría mucho menos en caso de imponer un valor inferior de tensión. Este valor de tensión se mantiene prácticamente constante durante la existencia del arco cambiando de polaridad con el cruce por cero de la corriente en donde, por desaparición del arco se establece un valor de tensión impuesta por el circuito asociado al ensayo luego de una pequeña oscilación al igual de lo que ocurría con el modelo de Mayr.

En la figura siguiente en donde se presenta la simulación para un caso de no apertura del interruptor empleando el modelo de Cassie, también se puede ver un similar comportamiento de la tensión estableciéndose un valor determinado por  $U$  una vez establecido el arco eléctrico. Al contrario de lo indicado para el caso de apertura, aquí la

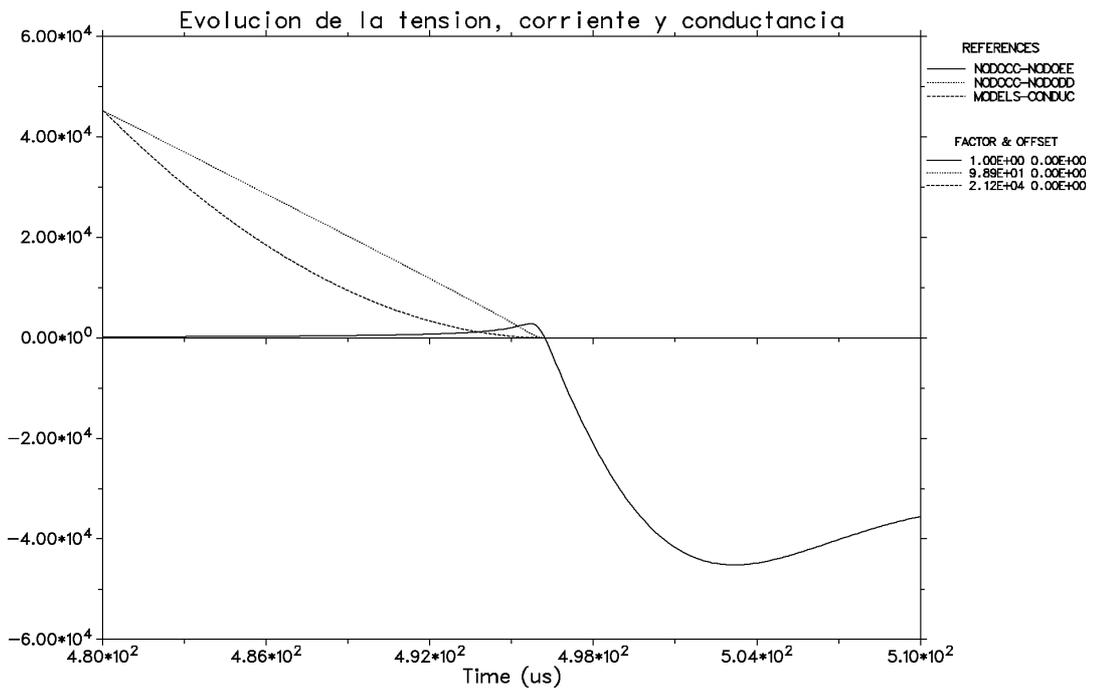


Figura N°4-7: Detalle de la apertura del arco eléctrico.

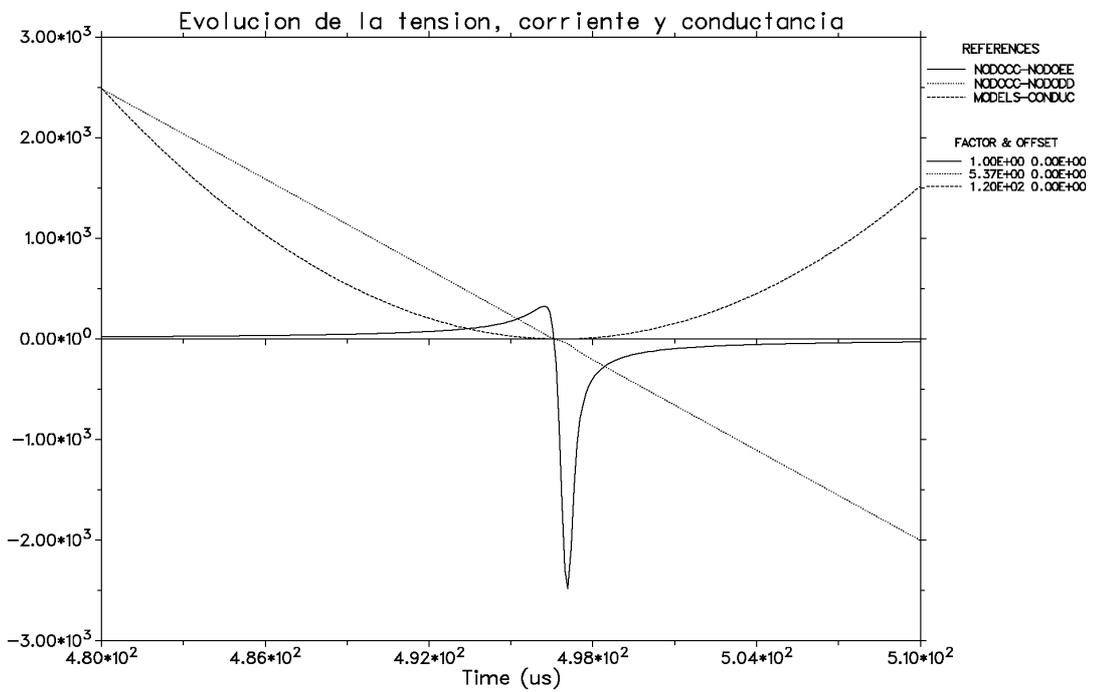


Figura N°4-8: Detalle de la reignición del arco eléctrico.

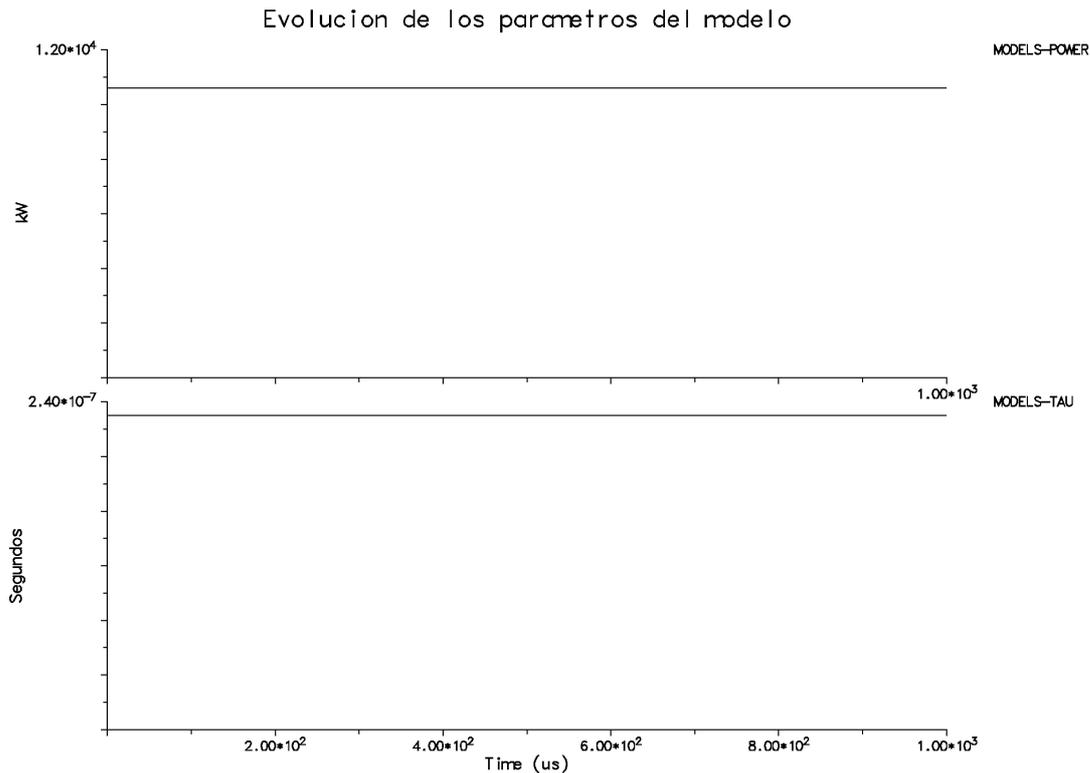


Figura N°4-6: Evolución de los parámetros del modelo de Mayr.

Recordando que la línea continua representa la tensión, la línea de trazos pequeños a la conductancia y la punteada a la corriente, se puede ver en la figura 4-7 un detalle de la apertura del interruptor en el primer paso por cero de la corriente estando las curvas convenientemente escaladas con los factores que se muestran en la parte derecha de la figura.

La evolución de la tensión, figura 4-7, presenta un pico de valor positivo que se corresponde con la casi anulación de la corriente seguida de un cambio de signo y posterior apertura definitiva del arco estando la oscilación alrededor del valor impuesto por la fuente y la rama “RC”, causado por las constantes eléctricas del circuito. La corriente presenta una evolución uniforme durante toda la simulación, mientras que, la conductancia hubo que ampliarla en más de dos mil veces.

Para el caso de la reignición del arco, la primera parte de la figura 4-8 se corresponde con lo anterior presentando las variables eléctricas de similar comportamiento, pero al producirse la reignición del arco la tensión prácticamente se vuelve a anular y la corriente sigue su curso natural sin tan siquiera intentar anularse por un instante. Por su parte la conductancia vuelve a crecer como era de esperarse tal cual puede verse a continuación.

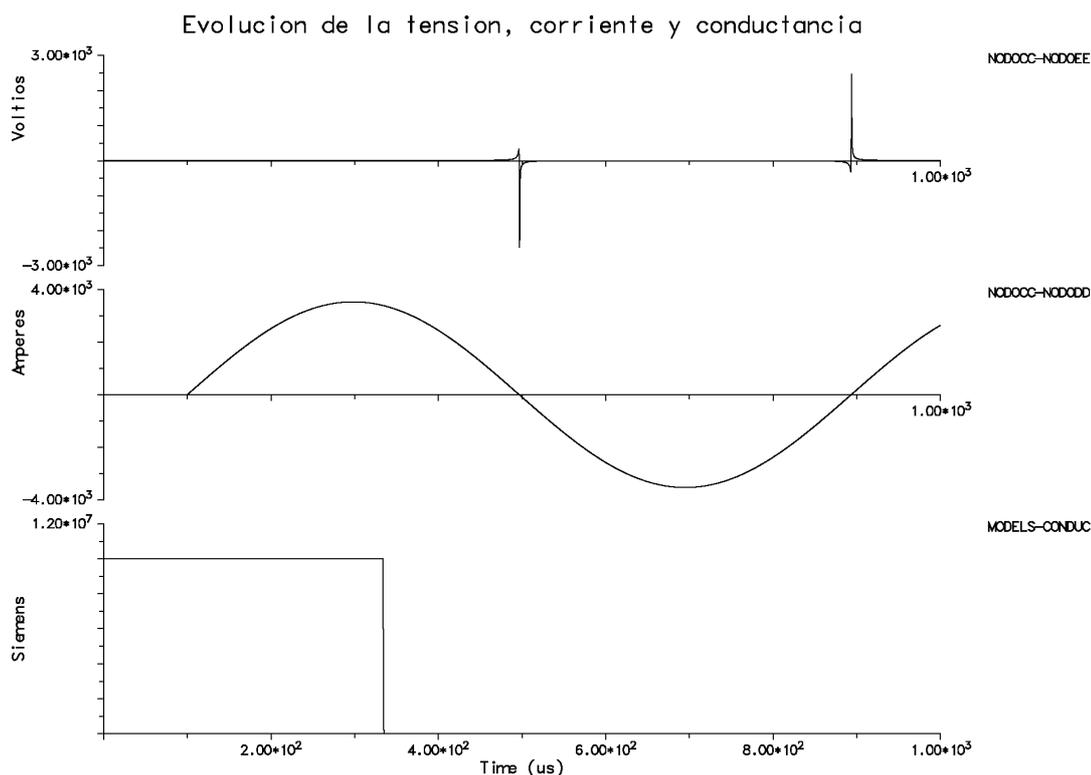


Figura N°4-5: Reignición simulada con el modelo de Mayr con parámetros constantes.

Para el caso de simular el intento de apertura del interruptor y su posterior fracaso, hay que modificar los valores de los parámetros que han sido oportunamente calculados. En este caso es más representativo y útil disminuir el valor de  $P_o$  a un valor para el cual no se verifique la apertura ya que, jugando convenientemente con este valor, es posible obtener la apertura definitiva del interruptor con cualquier paso por cero de la corriente.

En la figura anterior, se aprecia como la tensión del arco eléctrico es de la misma polaridad que la de la corriente presentando valores pequeños para corrientes elevadas y picos para su cruce por cero. La magnitud de los picos es gobernada por el parámetro de potencia mientras que la constante de tiempo actúa sobre la anchura del pico: una constante de tiempo mayor causa un pico más ancho y mucho más redondeado.

Por otra parte, si se analiza la magnitud de los picos, se tendrá un indicativo de la proximidad de lograr una apertura o no del interruptor de la forma que si aumenta con cada cruce por cero, no se verificará apertura alguna del interruptor mientras que, si su valor disminuye progresivamente, en algún paso por cero posterior a los simulados, se tendrá la ruptura definitiva del arco eléctrico.

La figura posterior indica un comportamiento constante para toda la simulación, de los dos parámetros del modelo utilizado.

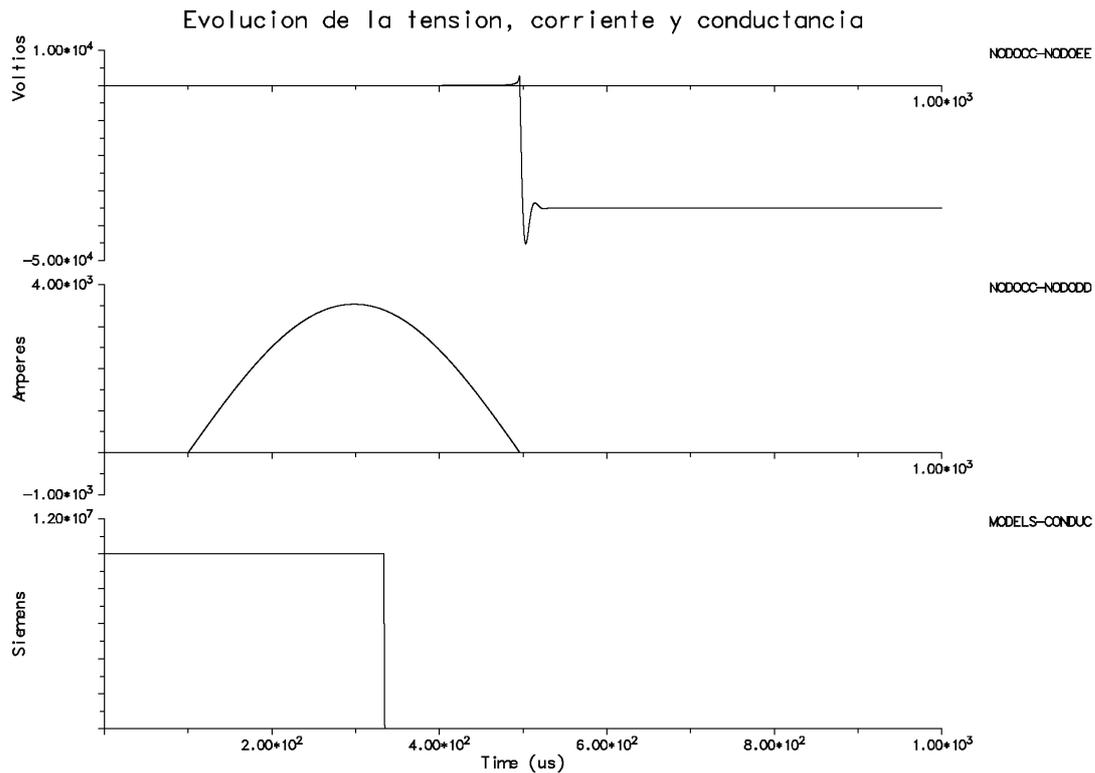


Figura N°4-4: Apertura simulada con el modelo de Mayr con parámetros constantes.

En la figura precedente se puede ver que la evolución de la tensión responde a las formas clásicas del arco eléctrico en donde posee valores muy bajos para elevadas corrientes y presenta un pequeño pico para el paso por cero de ésta última. El valor residual que asume al final de la simulación responde a la tensión impuesta por la fuente y la rama “RC” a los bornes del interruptor.

Por otra parte, la evolución de la corriente similar a un semiciclo resulta de la apertura del interruptor por el primer paso por cero de la misma. La conductancia, como se dijo anteriormente, posee un valor muy elevado para antes del nacimiento del arco, luego baja y se mantiene como la solución de la ecuación diferencial del modelo para, finalmente, adoptar un valor muy bajo interpretado por el usuario como el valor que representa la apertura definitiva del interruptor.

#### 4.3.- DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS MODELOS DE ARCO CON PARÁMETROS CONSTANTES

Para representar los modelos de arco que aquí se emplean, fue necesario codificar la ecuación diferencial que ellos utilizan para incluirlos en la sección de control de forma que sean “entendidos” por el programa de simulación. También hubo que incluir al circuito eléctrico detallado anteriormente.

Los modelos de arco que se emplean en las simulaciones son: el modelo de Mayr, el modelo de Cassie y un modelo llamado Mayr+Cassie o combinado, ya que utiliza una combinación de ambos modelos conectados en serie de manera que el resultado final es la conjunción de los precedentes [1,2,16-20].

Las figuras que a continuación se presentarán, responden a la simulación del comportamiento de cada modelo representando la tensión, corriente y la conductancia durante el período de simulación del ensayo y como la parte más importante es el paso por cero de la corriente, también se muestra para cada modelo una ampliación de esta zona a fin de poder comprobar la relación entre tensión corriente y conductancia.

Una de las características en la utilización de modelos con parámetros constantes es que el valor que asume la conductancia para antes del nacimiento del arco eléctrico, como para después de su presencia, responde a valores escogidos por el usuario y la elevada diferencia entre ambos, de aproximadamente catorce órdenes de magnitud, es la principal causante de su forma escalonada. El resto de valores comprendidos entre estos dos estados, uno de conducción de corriente y el otro de no conducción, resulta de la solución matemática de la ecuación diferencial que utiliza el modelo empleado.

##### 4.3.1.- MODELO DE MAYR

El comportamiento del modelo de arco propuesto por Mayr y que responde a la forma general de la ecuación,

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

es empleada para simular la apertura de un interruptor de potencia y se muestra en la figura 4-4.

Si bien en la tabla se presentan valores enteros de tiempos, son solo aproximaciones e indican una zona aproximada en la figura.

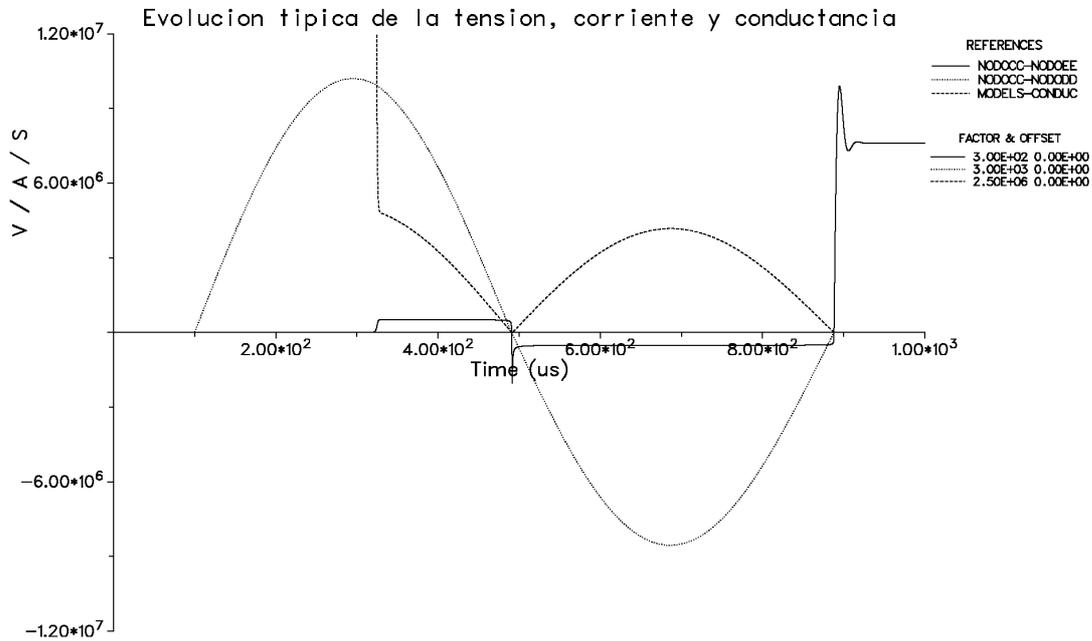


Figura N°4-2: Detalle de las zonas de la simulación del ensayo. Valores correspondientes al arco eléctrico.

#### 4.2.2.- SIMULACIÓN DEL INTERRUPTOR

Si bien existen diversas maneras de representar el interruptor de prueba con el ATP, la forma que aquí se emplea es la de controlar una resistencia variable desde la sección de control llamada “Models” [13-15]. El valor resultante de la resistencia resulta de tomar los valores iniciales de tensión y de corriente a la que se encuentra sometida al tiempo  $t$ , con ellos calcula el nuevo valor de la resistencia utilizando una ecuación diferencial previamente escogida y el resultado es el valor para  $t+Dt$ . El “interruptor serie” se utiliza para lograr la apertura total del interruptor simulado una vez que se cumpla la condición de que la conductancia total sea mínima y el “interruptor de inicialización” se emplea para simular las condiciones iniciales del circuito, abriendo automáticamente luego del primer paso de tiempo.

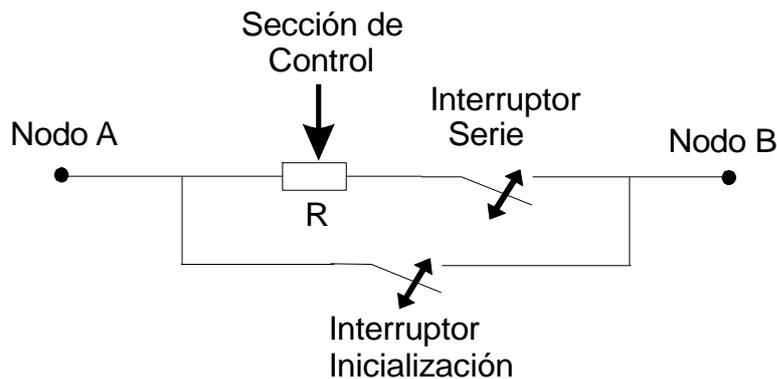


Figura N°4-3: Simulación del interruptor con el ATP.

Las distintas zonas del ensayo que se representarán en las simulaciones son:

ZONAS REPRESENTADAS EN LA SIMULACIÓN	
ZONA	CARACTERÍSTICAS
Zona 1: $t \leq 0$ [ $\mu\text{s}$ ]	Es la zona de las condiciones iniciales de simulación en donde el disparador se encuentra abierto y por lo tanto, no circula corriente alguna por ninguna rama del circuito; el interruptor de prueba se encuentra cerrado. La pila de capacitores de encuentra cargada a 35 [kV].
Zona 2: $0 < t < 100$ [ $\mu\text{s}$ ]	Las configuración del circuito no cambia, entonces no circula corriente alguna y la pila de capacitores está cargada a 35 [kV], siendo máxima la conductancia en el interruptor ya que está cerrado.
Zona 3: $t = 100$ [ $\mu\text{s}$ ]	Es el instante de cierre del disparador y con ello comienza a circular corriente por el circuito a una frecuencia y magnitud impuesta por la impedancia que ve la fuente. Mientras tanto, como el interruptor no recibió la orden de apertura, la corriente circula libremente y no existe tensión de arco. La magnitud de la conductancia es máxima y está impuesta por el operador.
Zona 4: $100 < t < 300$ [ $\mu\text{s}$ ]	Como el disparador está accionado y el interruptor de prueba cerrado, circula corriente tanto por la rama "RC" del circuito como por la falta simulada. La tensión en la fuente ya es menor que 35 [kV] y está disminuyendo. Los contactos del interruptor están cerrados con lo cual la conductancia es máxima y está esperando la "orden" de apertura.
Zona 5: $t = 300$ [ $\mu\text{s}$ ]	Se recibe la señal de apertura y por lo tanto comienza a nacer el arco eléctrico entre los contactos del interruptor. Esto hace que la conductancia ya no sea máxima y que aparezca una tensión mínima entre los bornes del interruptor a la vez que sigue circulando una corriente de valor muy próximo al instante previo. La tensión en la fuente continúa disminuyendo por el resto del ensayo.
Zona 6: $300 < t < 500$ [ $\mu\text{s}$ ]	Como ya se recibió la señal de apertura, el arco eléctrico está establecido entre los contactos del interruptor por lo tanto circula una corriente que establece una caída de tensión entre ellos siendo la conductancia de valor intermedio entre su máximo y mínimo.
Zona 7: $t \approx 500$ [ $\mu\text{s}$ ]	Es la zona de mutua influencia entre el circuito y el arco. Aquí la tensión se acerca al cero y luego lo atraviesa, con lo cual la corriente del arco también se hace cero. Tanto las características del circuito eléctrico que gobiernan la velocidad de variación de la corriente como las del interruptor que manejan su poder de corte influyen para que la apertura sea exitosa. Si no lo es, tal es el caso de la figura, la corriente comienza nuevamente a aumentar y con ello establece una tensión entre los bornes. Mientras tanto, la conductancia que había pasado por un mínimo, nuevamente comienza a incrementarse.
Zona 8: $500 < t < 900$ [ $\mu\text{s}$ ]	El arco sigue establecido entre los contactos y la conductancia es proporcional a la relación entre la corriente circulante y la tensión entre bornes.
Zona 9: $t \approx 900$ [ $\mu\text{s}$ ]	En este instante se produce la apertura definitiva del circuito causada por una disminución natural de la corriente más la influencia del gas refrigerante del interruptor.
Zona 10: $t > 900$ [ $\mu\text{s}$ ]	Existe una pequeña corriente residual circulando que pasados unos microsegundos se apaga automáticamente estableciéndose entre los contactos una tensión provocada por el equiparamiento de la tensión de la fuente con la de la rama RC respecto de tierra. La conductancia permanece siendo mínima.

Tabla N°4-1: Detalle de las zonas representadas en la simulación.

- ▷ Intervalo de alta corriente: Aquí el interruptor deberá ser solicitado de tal forma que, las condiciones previas al intervalo de interacción entre el interruptor y la red, deberán ser cumplidas.
- ▷ Intervalo de interacción: Donde el esfuerzo de la corriente de cortocircuito en el interruptor cambia hacia esfuerzos de alta tensión entre sus bornes y las características constructivas del interruptor juegan un papel predominante en su capacidad de cambio.
- ▷ Intervalo de alta tensión: Donde la respuesta del circuito asociado al interruptor fuerza los contactos con alta tensión.

## 4.2.- EL ENSAYO DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA

El circuito utilizado por el método de inyección de corriente establecido por la Norma IEC 56, se presenta en la figura 4-1. En él, se puede interpretar como que el “circuito de prueba” divide al circuito de ensayo en dos partes: una parte, que se encuentra gráficamente a su derecha, es la responsable de representar las condiciones del ensayo real antes del paso por cero de la corriente y otra parte, a su izquierda, que trate de responder a las solicitudes impuestas por la red luego del paso por cero.

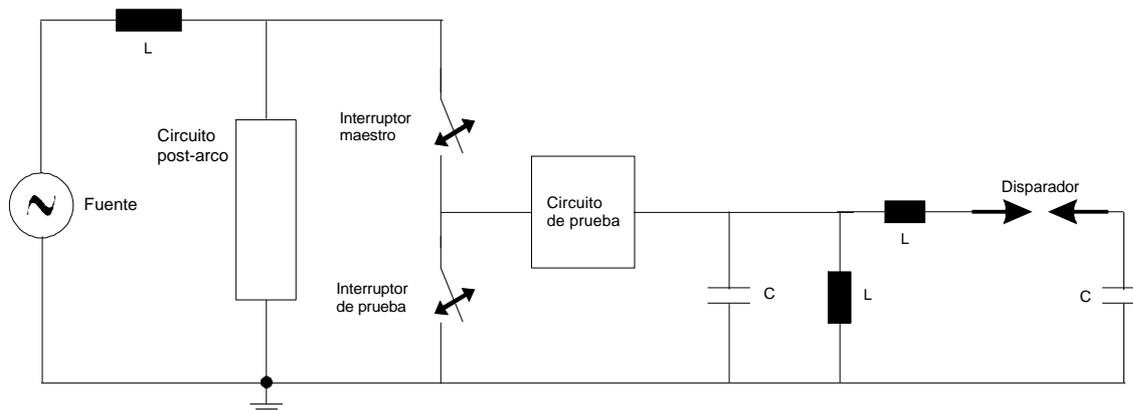


Figura N°4-1: Circuito eléctrico típico según el método de inyección de corriente.

La secuencia de operación del circuito anterior es: primero se carga una pila de capacitores hasta llegar a la tensión de ensayo, 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 o reignición le corresponde al interruptor ensayado, existe un interruptor maestro que trabaja de respaldo y que no se muestra en la figura anterior para simplificar la misma.

### 4.2.1.- SIMULACIÓN DEL ENSAYO

A la hora de simular la secuencia de operación del circuito del ensayo con el ATP se pueden distinguir varias partes o zonas que deben ser analizadas y que están plasmadas en la figura 4-2. En ella está representada la tensión con una línea continua, la corriente con una línea punteada y la línea a rayas pequeñas representa a la conductancia [5-11]. Todas las curvas anteriores están realizadas con el programa de graficación “GTPPLOT” y fueron escalas convenientemente a fin de poder ver cualitativamente la relación que las une; dichos factores se pueden ver en la parte “factor & offset” de la figura [12]. El tiempo total de la simulación alcanza a solo un milisegundo.

## **CAPÍTULO 4:**

### ***Simulación del Interruptor de Potencia con el ATP***

#### **4.1.- INTRODUCCIÓN**

Existen diversos tipos de maniobras que un interruptor de potencia puede realizar, de ellas, una de las más importantes es la maniobra en condiciones de cortocircuito; en estos casos uno o más interruptores son accionados para desconectar el elemento dañado del resto de la línea y así despejar la falta del sistema. Los ensayos que se realizan para verificar el comportamiento del interruptor en condiciones de cortocircuito son llamados “ensayos de potencia”, en ellos se prueba su capacidad de maniobra a través de una serie de ensayos simulando un cortocircuito en sus bornes terminales, ya que este ensayo reproduce la máxima corriente que el interruptor puede maniobrar en la red [1,2].

Por otra parte, la continua expansión de los sistemas eléctricos determinó la necesidad de permitir mayores intercambios de energía a través de un aumento en la capacidad de los componentes de redes, y con ello las tensiones y las corrientes utilizadas se han ido elevando en los últimos años. Además, todo componente de la red necesita ser protegido ante circunstancias de cortocircuito, lo que obligó a los interruptores a incrementar notoriamente su capacidad de corte. Este incremento en la capacidad de interrupción trajo como consecuencia la necesidad de ampliación de los laboratorios capaces de realizar ensayos directos, a niveles económicamente inaceptables, más aún si se tiene en cuenta que la tendencia no tiene vistas de disminuir [3]. A causa de esto, los “ensayos sintéticos” han venido ganando terreno los últimos años y es imperativo su uso en interruptores de potencia donde el poder de corte ya supera los 50 [kA] y se manejan tensiones del orden de 1000 [kV].

Los ensayos sintéticos son ensayos que se realizan con circuitos de prueba a tensión o corriente reducida y pueden ser de inyección de corriente o de tensión, según sea el caso del cual se trate. No obstante, el ensayo sintético debe cumplir una serie de condiciones para que represente con fidelidad las solicitaciones a las que el interruptor se verá sometido en la red [1]; estas condiciones son:

- ▷ 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.
- ▷ 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.

Para cumplir con los requisitos anteriores la Norma IEC 427 “Synthetic testing of high-voltage alternating circuit-breakers” establece tres intervalos básicos de tiempo que deberán ser satisfechos por el circuito sintético [4]:



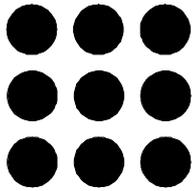
## RESUMEN

*El cuarto Capítulo realiza una breve introducción del ensayo en condiciones de cortocircuito que se realiza sobre los interruptores de potencia y que permite registrar arcos eléctricos a partir de los cuales se puede aplicar la metodología desarrollada y así realizar las simulaciones del ensayo realizado.*

*Para poder simular todo el ensayo a partir del cual se han obtenido los valores de los parámetros, se describen las distintas etapas del test y su representación en el Alternative Transients Program (ATP).*

*Por otra parte, se describe el funcionamiento de los modelos más habituales del arco eléctrico, los modelos propuestos por Mayr y Cassie y un modelo en serie combinando los anteriores; con parámetros constantes, proponiéndose una nueva interpretación de los parámetros como variables con la conductancia. Para todos ellos se detalla y explica su comportamiento durante toda la simulación del ensayo del interruptor.*





**Universitat Politècnica de Catalunya**  
**Departament d'Enginyeria Elèctrica**

## **CAPITULO 4:**

# **SIMULACIÓN DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA CON EL ATP**