

3.8.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 3

- [1] H.W. Dommel, T. Liu, EMTP User Group, EMTP Rule Book, Vol 1 y 2, 1995.
- [2] H.W. Dommel, EMTP User Group, EMTP Theory Book, BPA, 1987.
- [3] Grupo de Investigación de Sistemas Eléctricos de Potencia GISEP-CAUE, Introducción al uso del EMTP, Universidad Tecnológica Nacional Fac. Reg. Santa Fe, 1997.
- [4] R. Bianchi Lastra, Manual de uso del ATP, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería, Octubre 1991.
- [5] Department of Engineering Professional Development, College of Engineering, Introduction to the Electromagnetic Transients Program, University of Wisconsin-Madison/Extension, 1997.
- [6] M. Kizilcay, T. Pniok, "Digital simulation of fault arcs in power systems". European Transactions on Electrical Power Engineering/ETEP, vol.1, N°1, January-February 1991, pp. 55-60.
- [7] J. Martinez Velazco, "Representación Avanzada de Interruptores mediante el EMTP". 4^{tas} Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, Porto, Portugal, Julio 1995, pp. 253-260.
- [8] K. Nakanishi, Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers, Marcel Dekker Inc, 1991.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] CIGRE, Working group 13.01: "Applications of black box modelling to circuit breakers". ELECTRA-CIGRE, N° 149, August 1993, pp. 40-71.
- [12] 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
- [13] U. Habedank, "Application of new arc model for de evaluation of short-circuit breaking test". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 8, N°4, October 1993, pp. 1921-1925.
- [14] W. Gimenez, O. Hevia, "Metodología para la modelización del arco eléctrico a partir de oscilogramas de ensayos". III Seminario Argentino de usuarios del EMTP, 26 y 27 de Noviembre de 1998, Buenos Aires, Argentina.
- [15] U. Habedank, "On the mathematical description of arc behaviour in the vicinity of current zero". ETZ Archiv, Vol 10, 1988, pp. 339-343.
- [16] H. Teuchert, "La Escuela del Técnico Electricista". Tomo III. Ed. Labor, 1936.
- [17] W. Widl, P. Kirches, W. Egli: "Use of integral arc models in circuit-breakers testing and development". IEEE Transaction on Power Delivery, October 1988, pp. 1685-1691.
- [18] W. Press, B. Flannery, S. Teukolsky, W. Vetterling: "Numerical Recipes". Cambridge University Press, 1989.
- [19] García Melayo, "Programación en FORTRAN 77", Ed. Paraninfo S.A., 1992.

Para finalizar, un análisis comparativo entre las distintas posibilidades de cálculo de los parámetros brinda la forma de encontrar el mejor camino para realizar la simulación del ensayo del interruptor, lo cual es de suma importancia a la hora de comenzar a estudiar el proceso de interrupción de corriente en cuanto al ahorro de tiempo se refiere.

La metodología desarrollada incluyó detenidamente el cálculo de los valores de los parámetros y los métodos actualmente disponibles en la literatura combinados en seis programas desarrollados especialmente los cuales combinan las posibilidades de utilizar los modelos de Mayr y de Cassie, el comportamiento de los parámetros como constantes o variables y utilizar el método de cálculo propuesto por Amsinck o el Asturiano.

En lo que respecta al Método Asturiano es un nuevo desarrollo obtenido en el trabajo de esta tesis, el cual permite la determinación de los valores de los parámetros a partir de un sólo ensayo sobre un interruptor, ensayo que no necesariamente debe ser el de una reignición como lo era la condición impuesta por el método de Amsinck. Esta característica del método creado trae consigo la ventaja de reducir notablemente la cantidad necesaria de ensayos que se deben realizar para determinar el valor de los parámetros. Otra ventaja notable es la capacidad para realizar los cálculos utilizando todos los datos disponibles y no solamente a aquellos que se corresponden mutuamente con valores luego del paso por cero de la corriente como lo es el método de Amsinck.

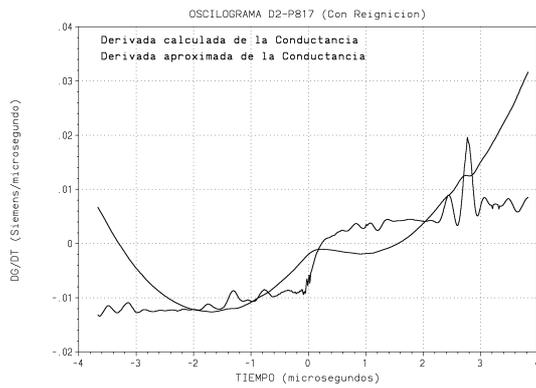
La eficacia del Método Asturiano fue evaluada respecto primeramente al método de Amsinck y luego con respecto a los valores de los parámetros otorgados por el fabricante de interruptores que facilitó los oscilogramas utilizados en éste trabajo, no mostrando diferencias notables con los otros valores pero sí su ventaja de poder utilizarlos con aquellos oscilogramas en donde el método de Amsinck se mostró defectuoso, lo que lo convierte en un método más robusto para el cálculo de los parámetros.

En el mismo sentido, las aproximaciones que realizan estos programas fueron evaluadas respecto de un software de utilización comercial no mostrando diferencias hasta la séptima cifra significativa.

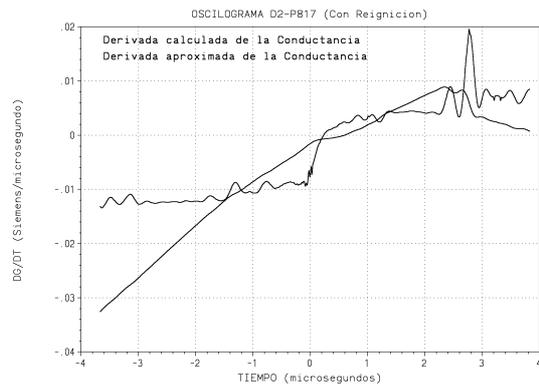
Para terminar con el tratamiento de los métodos de cálculo de parámetros, se demostró la ineficacia del método llamado Generalizado ya que con registros reales de ensayos su comportamiento no es lo deseable que se quisiera, como se muestra en la literatura la cual usa trazos realizados a mano alzada que distan muchísimo de los que se obtienen durante un ensayo real en laboratorio.

Por otra parte, el diseño utilizado en los programas de cálculo de parámetros permite su utilización independientemente ya sea a partir de registros de derivada de corriente o de corriente, juntamente con la tensión, lo cual brinda la posibilidad de utilizarlos en aquellos ensayos en donde hasta no se tenga el mismo equipamiento de obtención, registro y procesamiento posterior de datos; aparte brindan la aptitud de admitir registros de no tan buena calidad como los hasta aquí empleados, a través del uso del coeficiente de suavizado de datos. Además la posibilidad de ver en pantalla tanto los valores de las aproximaciones como de la aproximación gráfica que realizan a través de un programa de graficación, dan la ventaja de discernir la conveniencia de uno u otro método de cálculo antes de realizar las simulaciones lo que se traduce en una ganancia de tiempo notable a la hora de estimar previamente los resultados.

Otro ítem que es necesario destacar en el desarrollo de este capítulo, es la interpretación física que se brinda con respecto a la forma de tratar el comportamiento de los parámetros de los modelos comparando una conducta constante en el tiempo versus una variable respecto de la conductancia del arco.

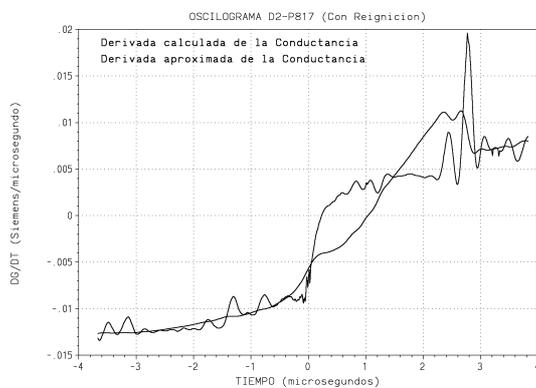


(a) Ecuación de Mayr

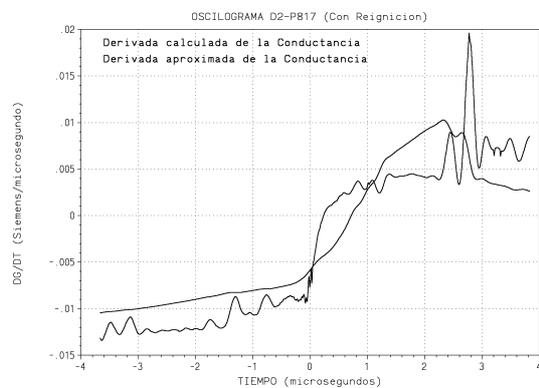


(b) Ecuación de Cassie

Figura N°3-29: Aproximación obtenida empleando parámetros constantes y método de Amsinck.



(a) Ecuación de Mayr



(b) Ecuación de Cassie

Figura N°3-30: Aproximación obtenida empleando parámetros variables y método de Amsinck.

Para este caso, empleando el método de Amsinck, las diferencias entre las ecuaciones se acentúan ya que surge del análisis de las dos figuras anteriores que, habiendo tomado los datos al azar con la única condición de que el ensayo posea reignición, la aproximación empleando la ecuación de Mayr se comporta mejor que la de Cassie independientemente del comportamiento de los parámetros del modelo. Además, si comparamos a todas las figuras obtenidas con el mismo método entre sí, se puede observar para los dos casos que, si bien la ecuación de Cassie es más recomendada para las regiones de alta corriente, si se escoge una dependencia funcional de sus parámetros se obtiene una aproximación de mucha mejor calidad que empleando la ecuación de Mayr con parámetros constantes. Es decir que para el caso en estudio es más importante elegir el tipo de comportamiento de los parámetros variables con la conductancia, que el modelo en sí.

3.7.- CONCLUSIONES

En éste capítulo se ha empleado la técnica llamada “Caja Negra” para la simulación del funcionamiento de interruptores de potencia, partiendo de los modelos básicos propuestos por Mayr y por Cassie para los cuales se realizó un tratamiento especial en el comportamiento de los parámetros incluidos en estas ecuaciones diferenciales.

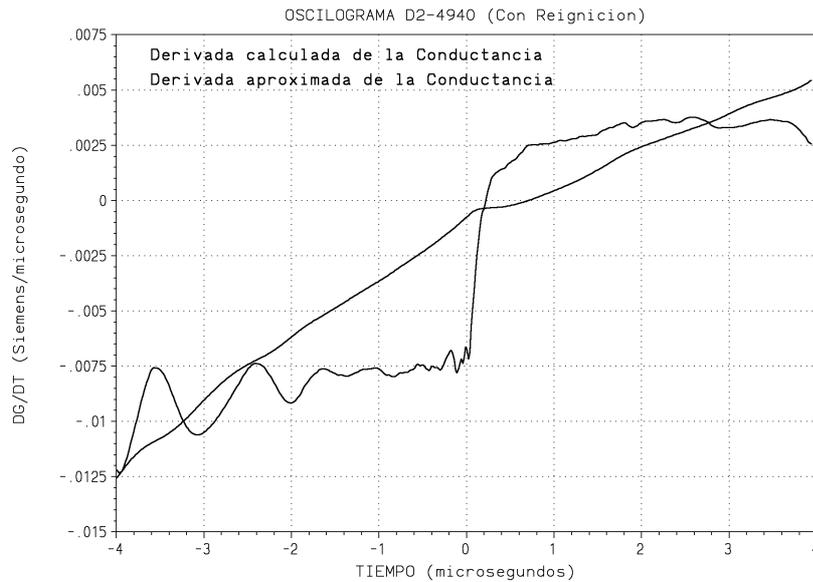
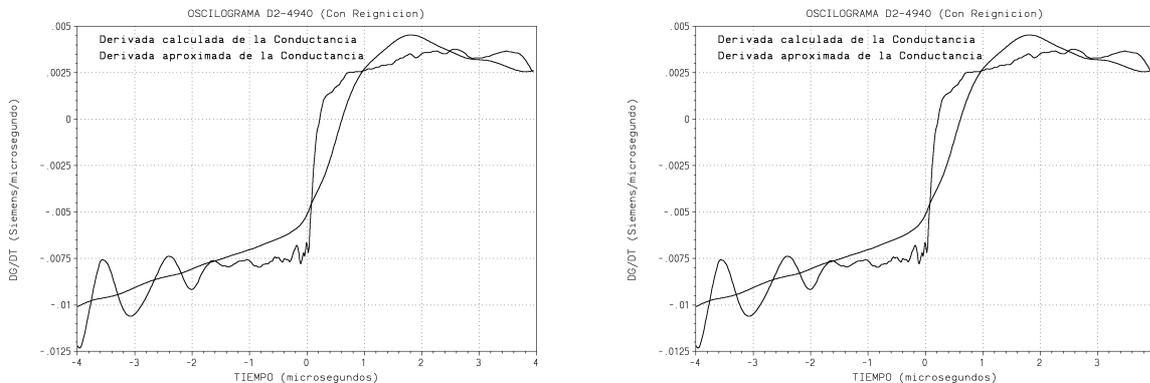


Figura N°3-27: Aproximación obtenida empleando el modelo de Cassie y parámetros constantes.

En cambio, si se utiliza parámetros variables con la conductancia, la calidad de ambas aproximaciones es, aparte de indiscutible, muy buena para ambos casos, con lo cual no existen preferencias por uno en particular según se puede ver en la figura siguiente donde se ejemplifica sobre las aproximaciones realizadas.



(a) Ecuación de Mayr

(b) Ecuación de Cassie

Figura N°3-28: Aproximación obtenida empleando parámetros variables.

Entonces, si se usan parámetros variables con la conductancia el comportamiento de las aproximaciones son similares entre sí existiendo sólo un poco de diferencia cuando se utilizan parámetros constantes.

Para el caso de escoger el método de Amsinck se tendrían las aproximaciones siguientes.

3.6.3.- COMPARACIÓN GRÁFICA ENTRE LOS MODELOS DE MAYR Y DE CASSIE

Las ecuaciones diferenciales propuestas por Mayr y por Cassie para representar al arco eléctrico tienen la particularidad de utilizar dos parámetros que necesitan ser determinados por alguno de los métodos propuestos pero independientemente de estos, la literatura [7,9] recomienda utilizar a la ecuación de Mayr para el período de la corriente próximo al cero mientras que a la de Cassie para la región de alta corriente. Por esto, las figuras que se presentan a continuación ejemplifican la variación de la derivada de la conductancia respecto del tiempo, que es el término de la izquierda de ambas ecuaciones y la aproximación que se logra para parámetros constantes y variables pero siempre utilizando el Método Asturiano de determinación de parámetros.

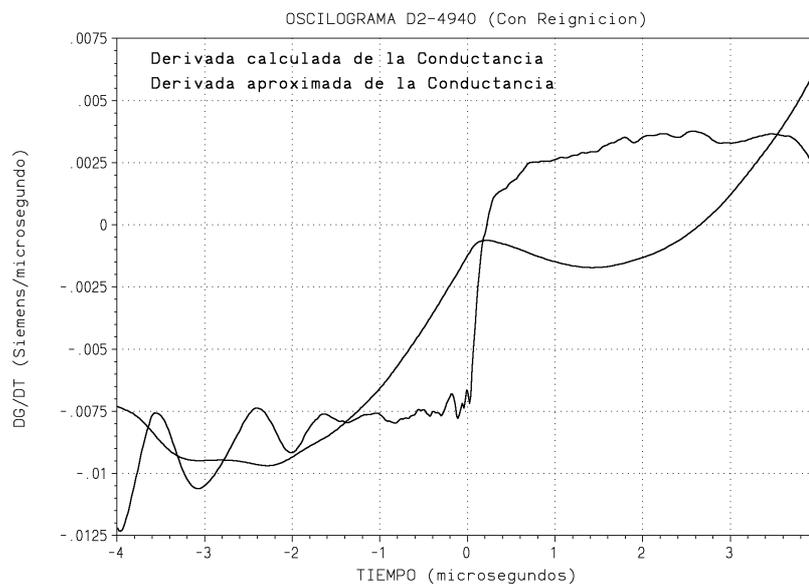


Figura N°3-26: Aproximación obtenida empleando el modelo de Mayr y parámetros constantes.

La figura anterior, que fuera obtenida para un ensayo con reignición, muestra una buena aproximación para la parte izquierda de la figura y cruzando después, en sólo dos ocasiones a la curva de la derivada calculada; esto implicaría un buen comportamiento de la aproximación sólo al comienzo de la curva. Lo mismo sucede con la aproximación realizada usando el modelo de Cassie pero con la diferencia que la región donde ocurre la mejor aproximación tiene una amplitud menor que la lograda para la ecuación de Mayr. Por lo tanto y sólo para este caso, el comportamiento de la aproximación lograda usando el modelo de Mayr sería mejor que el de Cassie.

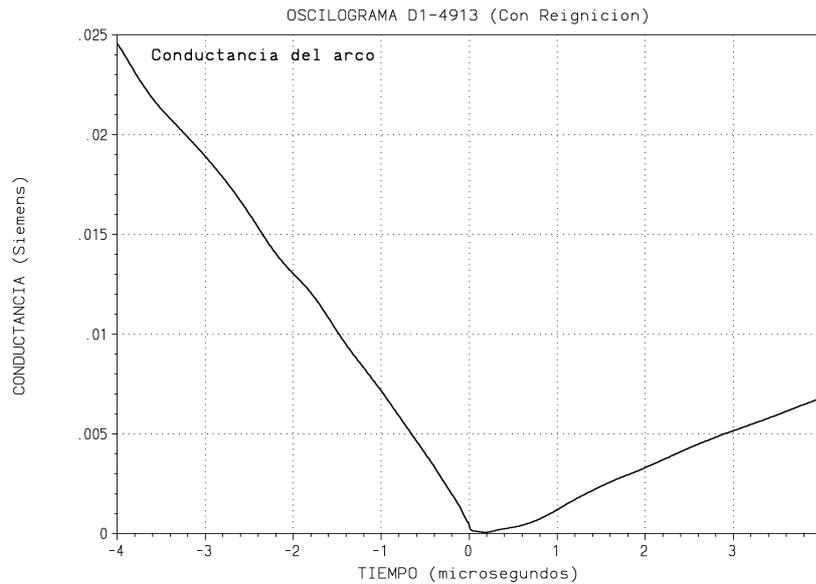


Figura N°3-25: Conductancia del arco para un ensayo con reignición.

Aplicando la condición impuesta por el método de Amsinck de existencia de conductancia a ambos lados de la reignición, se tiene como resultado que existe un recorte en el tiempo útil para el cálculo de los valores de los parámetros causada por la diferencia entre las pendientes de ambos tramos de curva que se agudiza cuanto mayor sea esta diferencia. De esta manera, el valor de conductancia que fija los límites para el cálculo es el mínimo valor máximo que corresponde al extremo derecho de la curva de conductancia; como más lejos de éste punto no existe otro a la derecha, éste valor de conductancia se debe trasladar a la porción izquierda de la curva obteniéndose un recorte de los datos que se encuentren más hacia la izquierda del punto de igual valor de conductancia.

En otras palabras, el mínimo valor máximo de la conductancia se corresponde con un tiempo positivo de 4 [μ s] aproximadamente y tiene un valor siempre positivo de alrededor de 0,007 [S] que, trasladado a la porción izquierda de la curva, le corresponde un tiempo de -1 [μ s] aproximadamente. Entonces, como para valores menores que -1 [μ s] no existe porción de conductancia luego de la reignición que permitan el empleo del método de Amsinck, se deberán desechar con lo cual se recortan los datos considerablemente.

Este recorte de datos, si se analiza la figura, se traduce a que sólo son válidos para el cálculo, los datos existentes a la derecha de -1 [μ s] hasta 4 [μ s] luego de la reignición lo que equivale a recortar casi el 40% de los datos disponibles para el cálculo.

En cambio, al no tener el condicionamiento de existencia de conductancia a ambos lados de la reignición de valores semejantes, el Método Asturiano utiliza a todos los puntos disponibles desde -4 [μ s] antes y hasta 4 [μ s] luego del paso por cero de la corriente.

Este recorte en los datos para el método de Amsinck y no para el Asturiano es la razón por la cual se obtiene una mejor concordancia de la aproximación de la derivada de la conductancia para la región próxima al cero de tiempo, mientras que el Asturiano, por calcular los valores de los parámetros con todos los datos, es que logra mejor aproximación para regiones más alejadas que la anterior. Diferencia ésta que se acentúa en caso de utilizar parámetros constantes.

diferencia sea cero para ningún punto de cálculo, es que la determinación de la potencia tiene un valor finito y no se presenta ningún tipo de indeterminación que equivaldría a dividir por cero en la fórmula citada anteriormente.

En cuanto a la aproximación que luego se hace de la potencia, lo que en realidad tiene importancia para su cálculo y también “peso”, es la magnitud de la diferencia entre cada pico y el valor aproximado para ese instante ya que, como la sumatoria de éstas diferencias debe ser mínima para toda la aproximación, se comprende la necesidad de reducir la amplitud de éstos picos.

Para la región comprendida a la izquierda de la conductancia igual a 0,005 [S], ya no tiene tanta influencia el factor de multiplicación debido al denominador de la fórmula de cálculo y pasan a tener influencia los valores de las potencias de las corrientes en el numerador ya que para conductancia tendiendo a cero implica que las corrientes en ambos ensayos también tienden a cero y el valor del numerador baja en dos órdenes mientras que el del denominador crece en un orden de magnitud.

Las tres razones que fueran expuestas anteriormente se han considerado como suficientes para continuar evaluando a partir de aquí, solamente a los métodos de Amsinck y Asturiano por el resto del trabajo.

3.6.2.2.- Análisis comparativo entre el método de Amsinck y el Asturiano

El método de Amsinck es aplicable a un ensayo en el cual se produzca una reignición del arco eléctrico luego del paso por cero de la corriente, lo que equivale a decir que existe una corriente distinta de cero para antes y después del cero de tiempo que trae aparejada la existencia de una conductancia de un determinado valor. Basada en la existencia de esta conductancia a ambos lados del cero de tiempo, el método de Amsinck se basa para la obtención de los parámetros mediante un procedimiento que ya se describió anteriormente.

Si se analiza con detenimiento la figura siguiente, que representa la variación de la conductancia durante un ensayo con reignición, se podrá observar la forma con la cual se acerca al cero de tiempo y luego se aleja; suponiendo rectas a ambas porciones de la curva, se puede decir que la conductancia antes del cero tiene “mayor pendiente” hablando en valor absoluto, que la porción ascendente de la misma curva. En otras palabras, la variación de la conductancia antes de la reignición es mayor que luego de producida ésta.

El mismo hecho se verifica en el cálculo de la tensión según Cassie debido a la propia conformación de la fórmula por lo cual, toda la explicación siguiente también es aplicable al cálculo de la tensión pero en menor grado ya que el denominador no contiene a la conductancia y toda la fórmula esta dentro de una raíz cuadrada lo que mitiga los efectos que se detallarán.

Sincronizando la gráfica de la potencia calculada con la de las diferencias entre las conductancias, con respecto a la conductancia y al eje cero de abscisas, se puede verificar lo dicho anteriormente estudiando la figura siguiente, la cual tiene dos regiones que servirán para el análisis.

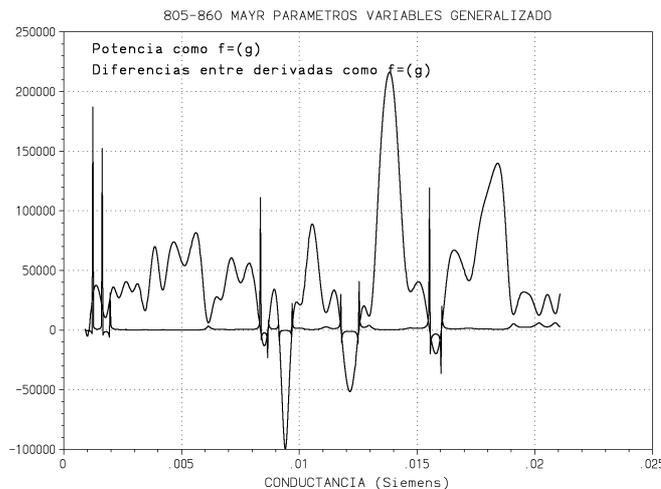


Figura N°3-24: Gráfico de la potencia y de la diferencia entre las derivadas de las conductancias para los dos ensayos.

Si tomamos la región comprendida a la derecha de la conductancia igual a 0,005 [S], se puede ver que cada pico de la potencia, que en el gráfico es la curva que casi siempre va pegada al cero del eje de abscisas y además es la que posee los picos más agudos, corresponde con el paso por cero de la diferencia entre las conductancias. Esto trae como consecuencia que, al estar en el denominador de la fórmula que calcula la potencia, en la práctica sea como un factor de multiplicación del numerador que en algunos casos puede ser de varios órdenes de magnitud; por ejemplo, el valor de la diferencia en la figura anterior, está ampliado 50 millones de veces

Si en particular analizamos el punto que representa el pico positivo de potencia que se encuentra más hacia la derecha de la figura anterior, es decir, para un valor de la conductancia igual a $1,55 \cdot 10^{-2}$ [S] aproximadamente, el valor de la diferencia entre las dos derivadas de la conductancia es aproximadamente igual a $1 \cdot 10^{-5}$ [S/ μ s], al que a su vez hay que multiplicarlo por $1,55 \cdot 10^{-2}$ [S] que es el valor de la conductancia en ese punto. Pasado el resultado anterior al denominador, se comporta como un factor de multiplicación de aproximadamente $6 \cdot 10^6$, lo que causa estos picos agudos en la curva de la potencia.

Lo anterior es también válido para todos aquellos puntos en los cuales el valor de la diferencia entre las derivadas de las conductancias cambien de signo. No obstante, como cada cambio de signo se presenta entre dos puntos contiguos de cálculo y nunca se verifica que la

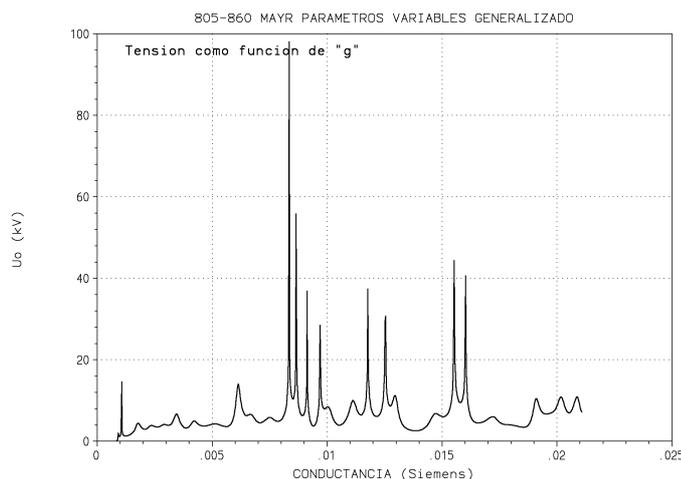


Figura N°3-22: Gráfico de la tensión calculada como función de la conductancia para el método Generalizado.

Como se explicó oportunamente, el método Generalizado utiliza dos oscilogramas de arcos distintos que pueden o no tener reignición, para el cálculo de los parámetros de las ecuaciones de Mayr o para la de Cassie, con las siguientes fórmulas:

$$P_0(g_1) = \frac{g'_A i_B^2 - g'_B i_A^2}{g_1 (g'_A - g'_B)} \quad \text{y} \quad U_{0(g_1)} = \sqrt{\frac{v_A^2 g'_B - v_B^2 g'_A}{g'_B - g'_A}}$$

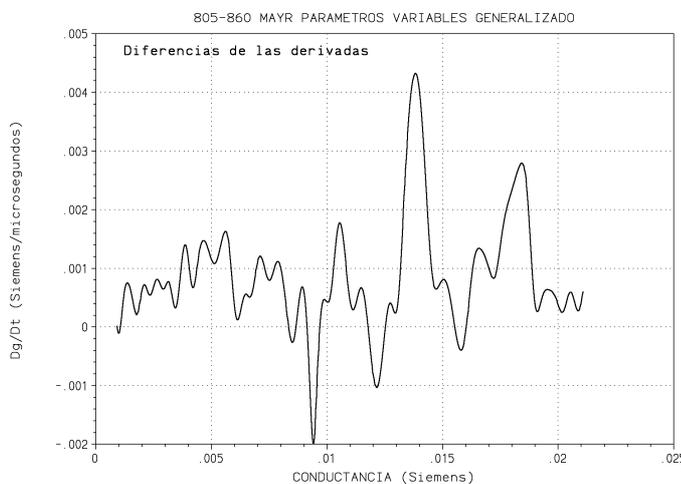


Figura N°3-23: Gráfico de la diferencia entre las derivadas de las conductancias para los dos ensayos.

La evolución de las diferencias entre las derivadas de las conductancias para los dos ensayos “A” y “B”, que es el denominador de las fórmulas anteriores, se puede ver en la figura anterior. En ella es necesario destacar su reiterado paso por el cero y en consecuencia posee valores positivos como negativos que luego influirán en el cálculo de los parámetros de la siguiente manera: un valor muy próximo al cero, equivale a multiplicar por varios órdenes de magnitud al numerador lo que trae aparejado esos picos, tanto de valor positivos como negativos.

El segundo problema radica en que es un método muy sensible a la calidad de las curvas de los datos y “admite” únicamente curvas muy suaves y que no se crucen entre sí ya que esta situación provoca divisiones por cero en la ejecución de los programas que abortan la misma. En este sentido, si combinamos todos los oscilogramas se pueden confeccionar alrededor de 136 posibles archivos de entrada para ejecutar los programas pero menos del 10% de ellos dan como resultado valores fiables.

El tercero es que si se quisiera ver dibujada la dependencia de los parámetros tales como la potencia del modelo de Mayr o la tensión del de Cassie, se podrá observar que ambas curvas poseen puntas muy agudas y hasta valores irreales como son potencia o tensión negativa que se analizarán a continuación.

La utilización del método Generalizado para el cálculo de los valores de los parámetros da como resultado unos gráficos particulares de la potencia calculada como función de la conductancia según el Mayrgen – modelo de Mayr - y de la tensión calculada como función de la conductancia con el Cassgen – modelo de Cassie. Ambas aproximaciones contienen picos o puntos singulares que se pueden apreciar en las figuras siguientes, para las cuales se quintuplicó la capacidad de cálculo de los programas para que no tenga influencia la cantidad de puntos que se toman para la determinación de los valores de los parámetros. El archivo de datos que se utilizó en éste apartado fue tomado al azar entre los pocos posibles.

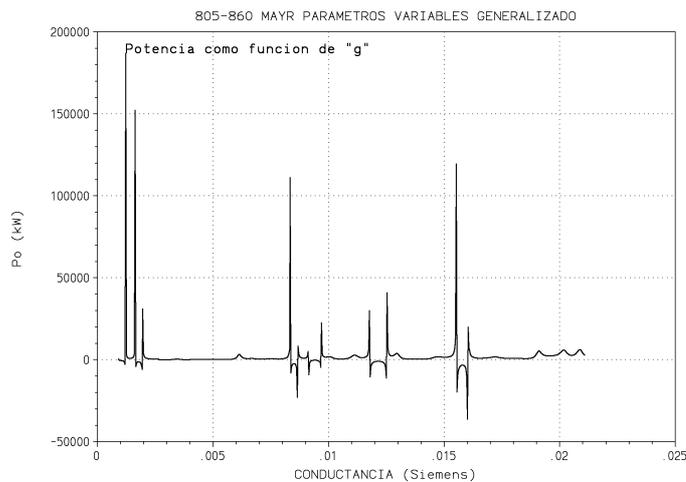


Figura N°3-21: Gráfico de la potencia calculada como función de la conductancia para el método Generalizado.

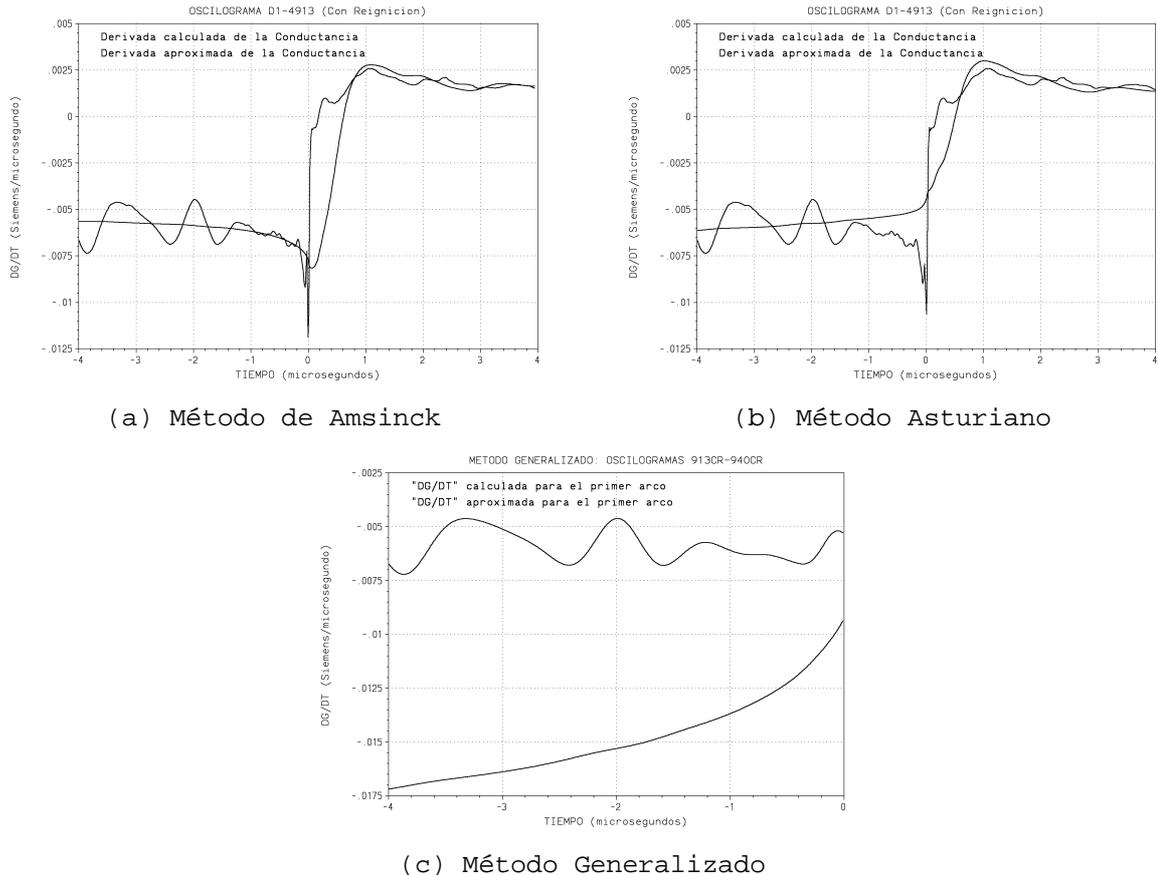


Figura N°3-20: Aproximaciones obtenidas usando el modelo de Mayr para los tres métodos, considerando variables a los parámetros.

Durante las comparaciones anteriores se tuvo especial cuidado en mostrar sólo aquellas figuras que combinen los parámetros involucrados en el modelo usado ya que en caso de pretender mostrar la evolución de cada uno de ellos para cada posibilidad, la cantidad de figuras a analizar en sí, sería prohibitiva como ya se mencionó.

Sin embargo, el análisis realizado sirve para determinar que, en caso de elegir el comportamiento de los parámetros como constantes tanto para el modelo de Mayr como para el de Cassie, el método de determinación de parámetros Asturiano es mejor que el de Amsinck ya que logra mejor aproximación respecto de la derivada de la conductancia quedando en último lugar el método Generalizado. En cambio, si se escoge variar los parámetros con la conductancia, el método de Amsinck para el modelo de Mayr se comporta un poco mejor que el Asturiano en la región próxima al cero, invirtiéndose éste comentario si es que se utiliza el modelo de Cassie. Lo que sí permanece invariable al modelo utilizado es que la aproximación que se obtiene usando el método Generalizado para parámetros variables es deficiente en ambas situaciones, trayendo la necesidad de realizar un estudio especial que se realiza a continuación.

3.6.2.1.- Análisis en particular del Método Generalizado

La aplicación del método Generalizado para la determinación de los valores de los parámetros de los modelos de Mayr y de Cassie a través de los programas “Mayrgen” y “Cassgen”, ha demostrado tener tres grandes problemas siendo el primero de ellos el descrito en el punto anterior, en cuanto a la aproximación que realizan.

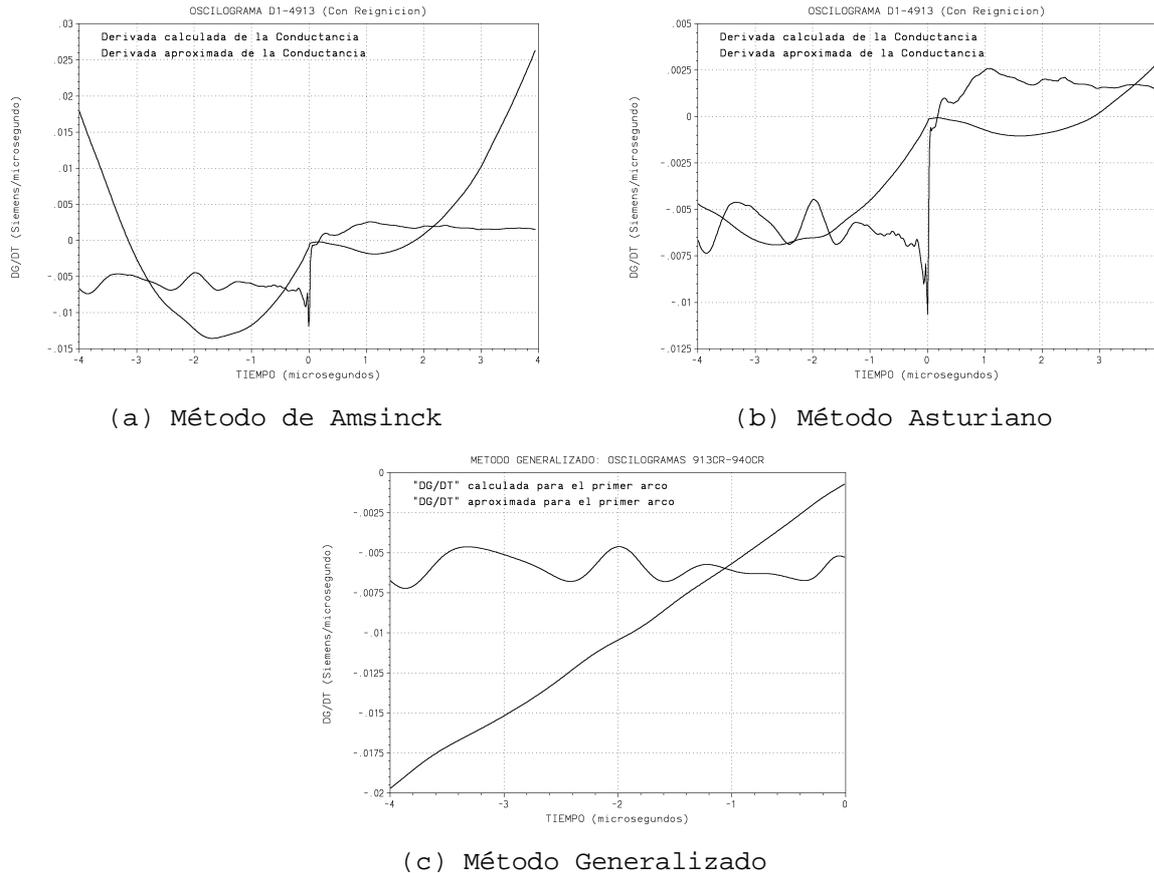


Figura N°3-19: Aproximaciones obtenidas usando el modelo de Mayr para los tres métodos, considerando constantes a los parámetros.

Para la figura posterior, al igual que lo mencionado anteriormente, hay que tener en cuenta que la aproximación que se logra utilizando parámetros variables está notoriamente influenciada por el método de cálculo. Además la aproximación de la figura 3-20 (c), es común a dos arcos eléctricos simultáneamente.

arcos eléctricos, es que no se tiene aproximación para tiempos mayores que cero. Respecto a la porción de aproximación que se muestra, la escala del eje de ordenadas es intermedia entre las dos anteriores y lo mismo ocurre para la aproximación ya que si se observa detenidamente las figuras, se podrá comprobar que esta aproximación cruza a la curva real por un punto intermedio entre los dos anteriores lo que indicaría una aproximación de valor promedio a las anteriores.

Como se demostró anteriormente, la representación del arco usando parámetros variables con la conductancia es mucho mejor que usando parámetros constantes y esa conducta se ve reflejada en el tipo de aproximación que realizan los métodos en estudio ya que, las aproximaciones realizadas con parámetros variables no muestran las divergencias antes presentes. Esto se puede apreciar en la figura siguiente.

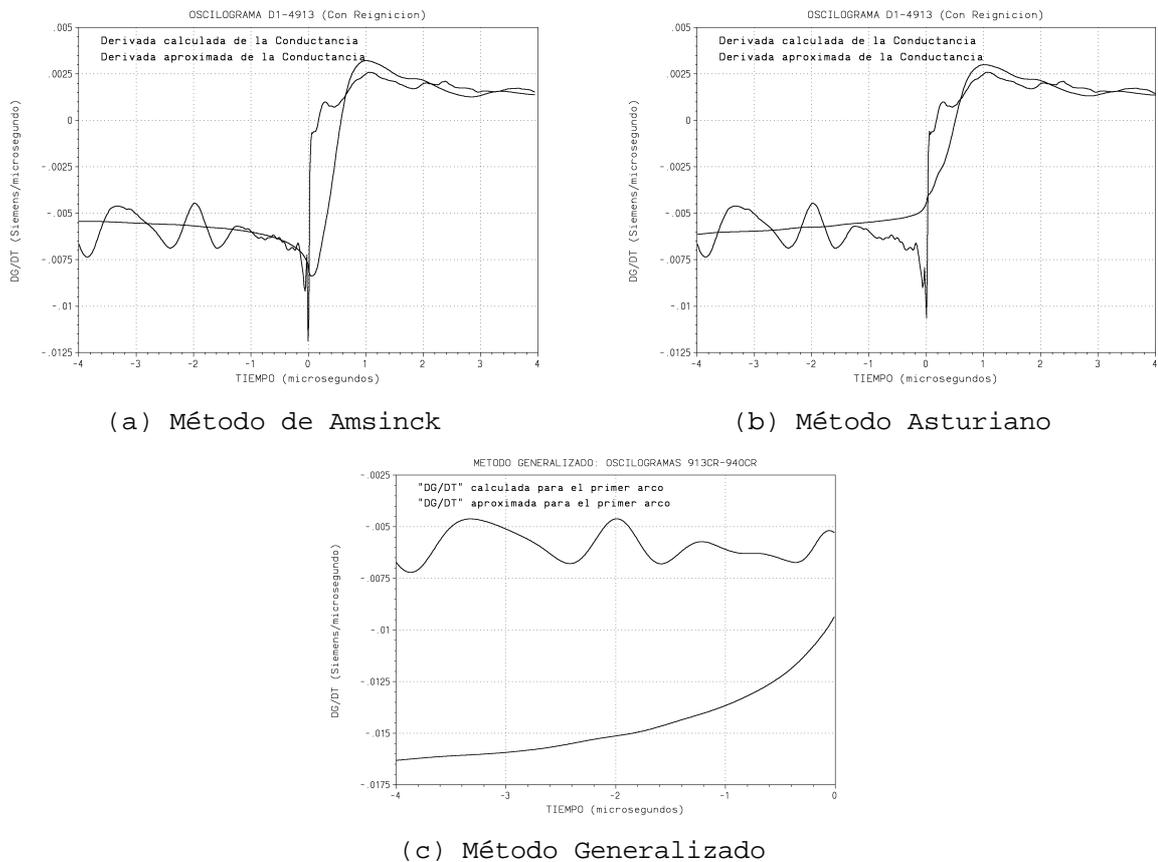


Figura N° 3-18: Aproximaciones obtenidas para los tres métodos usando parámetros variables.

En este punto se debe aclarar que la aproximación de la figura 3-18 (c) está calculada para dos arcos y es la misma aproximación para ambos juegos de datos. Esto trae como consecuencia que “aparentemente” la aproximación que se muestra sea “pésima” si se la toma sin analizar la aproximación que se logra para la derivada de la conductancia del segundo arco; pero como aquí sólo se busca un sentido comparativo, la aproximación que se obtiene se muestra con este fin haciendo las aclaraciones que correspondan.

Si se quisiera utilizar el modelo de Mayr, seguirían siendo válidas las consideraciones anteriores ya que utilizando parámetros constantes la aproximación lograda con el método de Amsinck es válida para la región cerca del cero y deja de serlo para los extremos mientras que la aproximación según el Asturiano es mas pareja y representativa a todo lo largo de la conductancia calculada, según puede verse a continuación.

a decir que la representación usando el método de Amsinck con parámetros constantes es más valedera cerca del cero de tiempo que para puntos alejados ya que en los extremos de la figura se aprecia como diverge la aproximación que se efectuó.

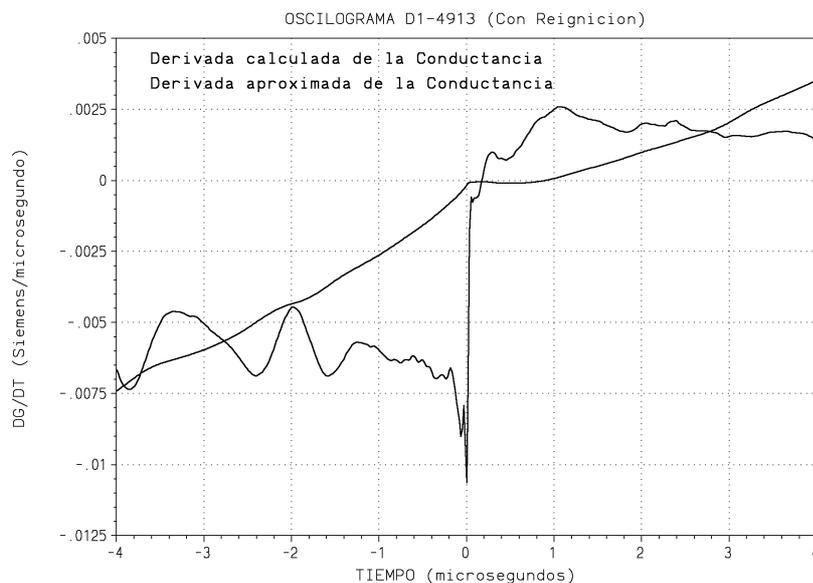


Figura N°3-16: Aproximación obtenida con el Método Asturiano para parámetros constantes.

Usando el Método Asturiano, la curva de la derivada aproximada cruza en varias partes a la derivada calculada y si bien la representación cerca del cero no sería tan buena como la anterior, se puede observar claramente como es más representativa de lo sucedido en un rango mucho mayor de tiempo, sirviendo de esta manera para representar también a los puntos más alejados del cero. Además hay que tener en cuenta que para este caso la amplitud de la escala del eje de ordenadas es mucho menor que el caso precedente.

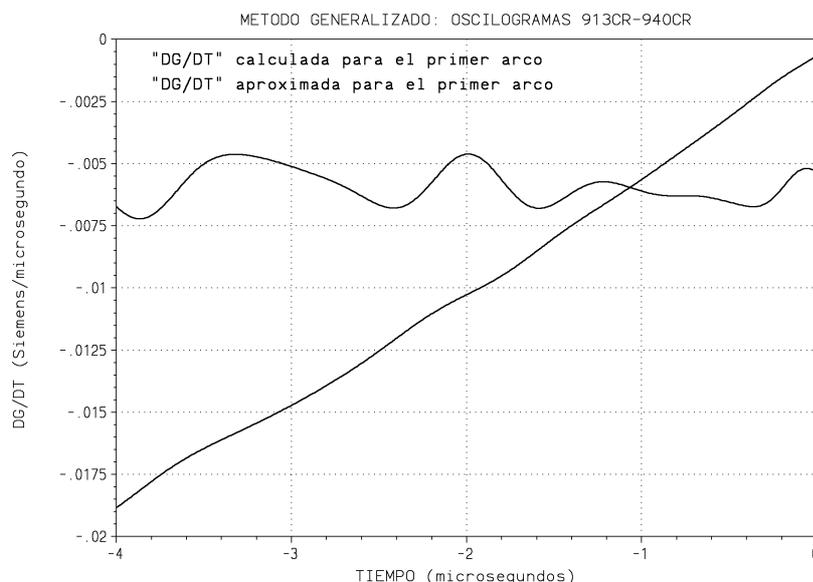
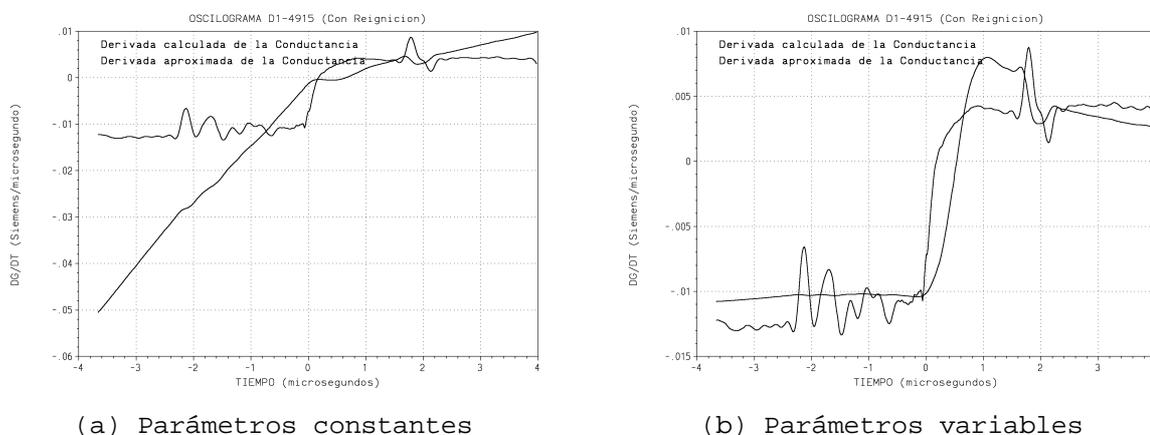


Figura N°3-17: Aproximación obtenida con el método Generalizado para parámetros constantes.

La figura anterior representa la aproximación lograda utilizando el método Generalizado que, como sólo utiliza los valores registrados antes del cero de corriente para dos

Por otra parte, si se quisiera utilizar la ecuación de Cassie para estudiar el comportamiento de las aproximaciones para parámetros constantes o variables con la conductancia, se obtendrían los mismos resultados tal cual se puede observar en la figura siguiente.



(a) Parámetros constantes (b) Parámetros variables
 Figura N°3-14: Comparación entre parámetros constantes y variables usando la ecuación de Cassie

3.6.2.- COMPARACIÓN GRÁFICA ENTRE LOS MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

Las figuras que se muestran a continuación reflejan la aproximación que se logra para cada uno de los tres métodos de determinación de parámetros estudiados usados con el modelo de Cassie y parámetros constantes. Evidentemente, debido a la cantidad de posibilidades de representación que son factibles de lograr en este ítem - una por cada parámetro más dos por cada tipo de comportamiento más tres métodos más dos modelos serían 24 figuras en total - sólo se presentará la variación de la derivada de la conductancia respecto del tiempo, que es el término de la izquierda de los modelos estudiados.

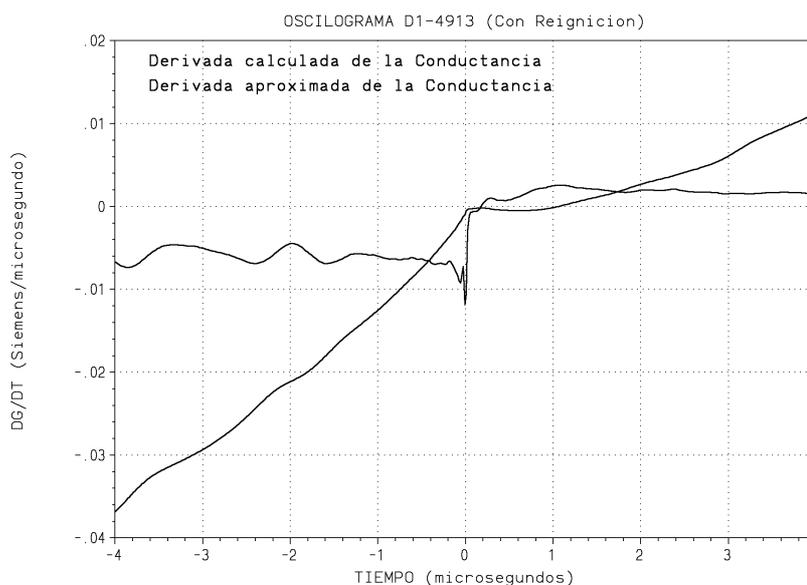


Figura N°3-15: Aproximación obtenida con el método de Amsinck para parámetros constantes.

En la figura anterior se puede observar la forma en que la derivada aproximada de la conductancia cruza a la real calculada en tres puntos próximos al cero de tiempo. Esto equivale

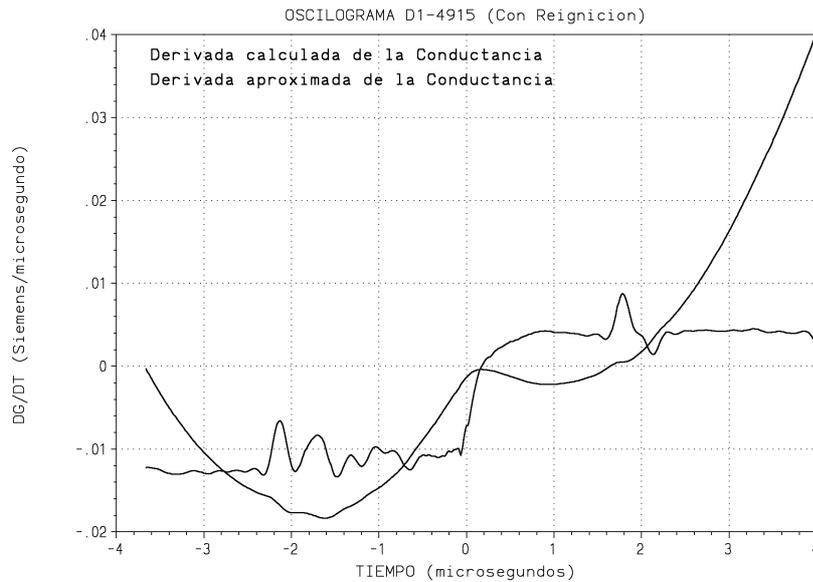


Figura N°3-12: Variación de la derivada de la conductancia alrededor del cero de corriente para parámetros constantes.

En tanto la figura 3-12 muestra el valor real calculado de la derivada de la conductancia y su aproximación, obtenida de considerar los parámetros del arco como dependientes de la conductancia. Nótese el cambio en la escala del eje de ordenadas para cada figura.

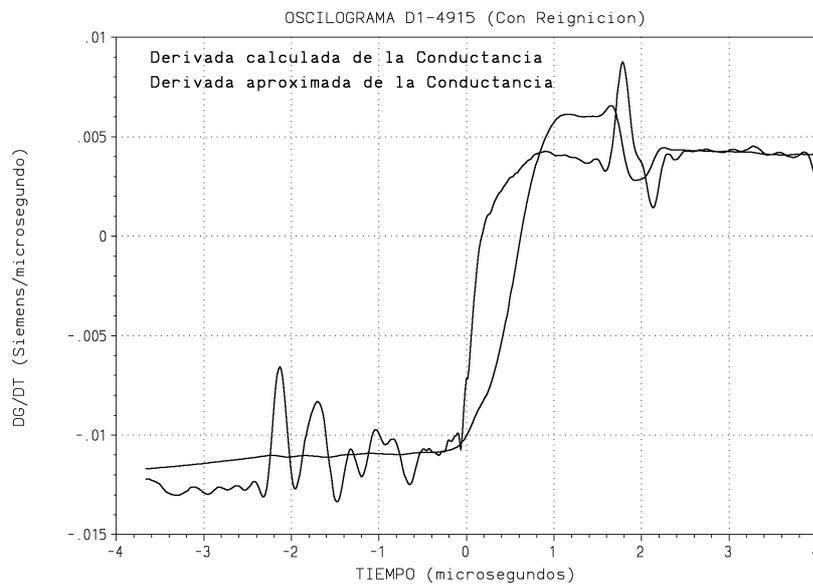


Figura N°3-13: Variación de la derivada de la conductancia alrededor del cero de corriente para parámetros variables con la conductancia.

Como conclusión se puede decir que de una simple observación de las figuras anteriores se aprecia la mejor aproximación que se logra al considerar los parámetros de la ecuación de Mayr como dependientes de la propia conductancia del arco eléctrico. Si bien los errores no son acumulativos como se podría presuponer con un análisis paso a paso del proceso de determinación de los parámetros, la aproximación final de la variación de la conductancia no presenta grandes disparidades como se hubiera podido esperar con sólo examinar las cuatro primeras figuras.

cual se está utilizando para esta parte de la simulación un valor bien representativo de lo que ocurre en la realidad.

Cuando el arco tiende a “apagarse”, que se corresponde con la corriente y la conductancia próximas al cero, ocurre que se está siendo muy optimista en cuanto al funcionamiento del interruptor. La razón de lo anterior es que mientras para una conductancia igual a 0,0025 [S] se supone un valor de θ de 0,63 [μ s] en la realidad éste valor de la conductancia se corresponde con un valor de la constante de tiempo de 0,25 [μ s] Esto equivale a decir que se está suponiendo un arco mucho más estable y con menor rapidez de variación del que se tiene en la realidad (cuando la corriente está próxima al cero) con todo el error en la simulación que ello supone.

La interpretación física de la constante de tiempo, como un parámetro independiente de la conductancia y los errores que esta suposición implica, es más útil cuanto más nos alejemos del valor de g igual a 0,0075 [S].

Por su parte, la figura 3-11 representa la aproximación que se obtiene de considerar a la constante de tiempo como función de la conductancia y muestra como el resultado de la aproximación es mucho mejor que el logrado anteriormente y exime de cualquier tipo de comentarios al respecto.

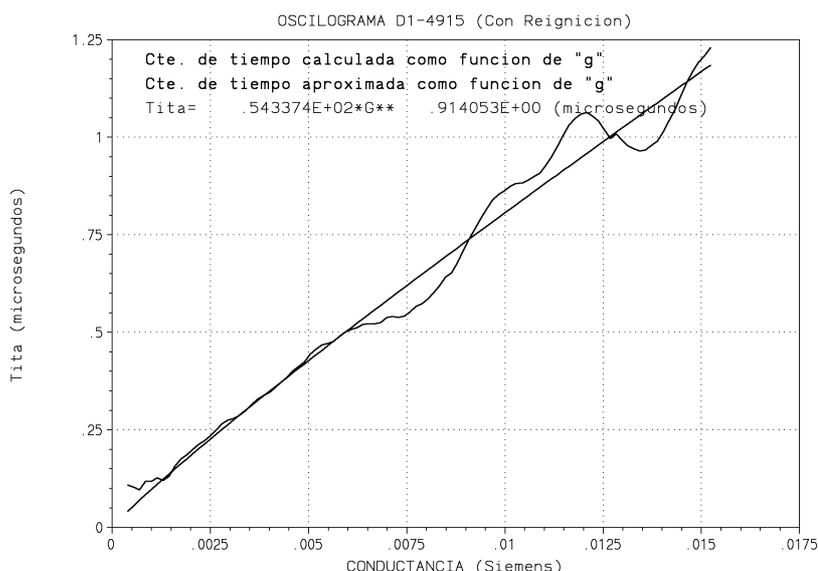


Figura N°3-11: Determinación de la constante de tiempo como función de la conductancia.

Ahora bien, tanto el valor de la potencia como el de la constante de tiempo se relacionan dentro del mismo término de la ecuación de Mayr con lo cual la propagación de los errores cometidos durante el proceso de aproximación de los parámetros se combinan de una forma particular. Para evaluar esta sumatoria de los errores, se muestra en la figura 3-12 la evolución real de la variación de la derivada de la conductancia, término de la derecha de la ecuación de Mayr, para todo el tiempo registrado junto con la aproximación que se obtiene considerando al valor de los parámetros como constantes.

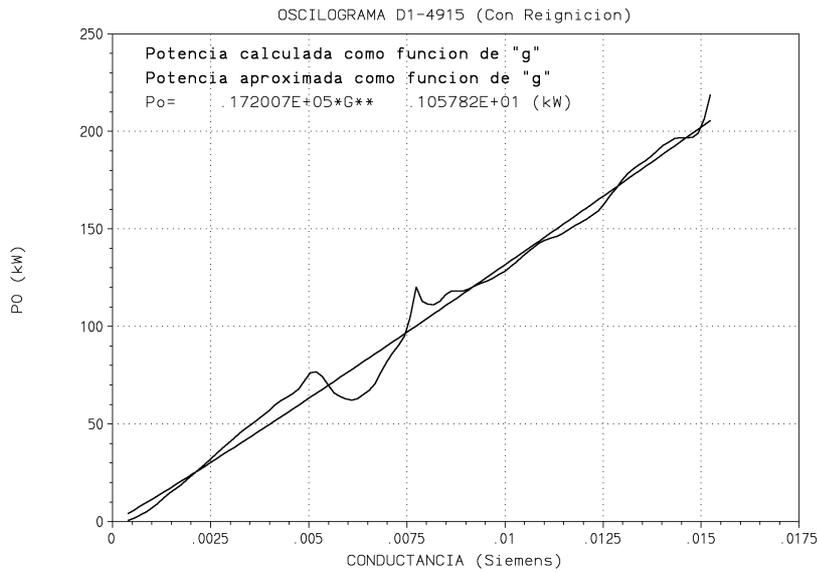


Figura N°3-9: Determinación de la potencia como función de la conductancia.

Al igual que en el caso de la potencia, si repetimos el proceso de aproximación como parámetro invariable para la constante de tiempo se tiene la aproximación de la figura 3-10. El resultado de la aproximación se muestra en la región de los títulos de la figura.

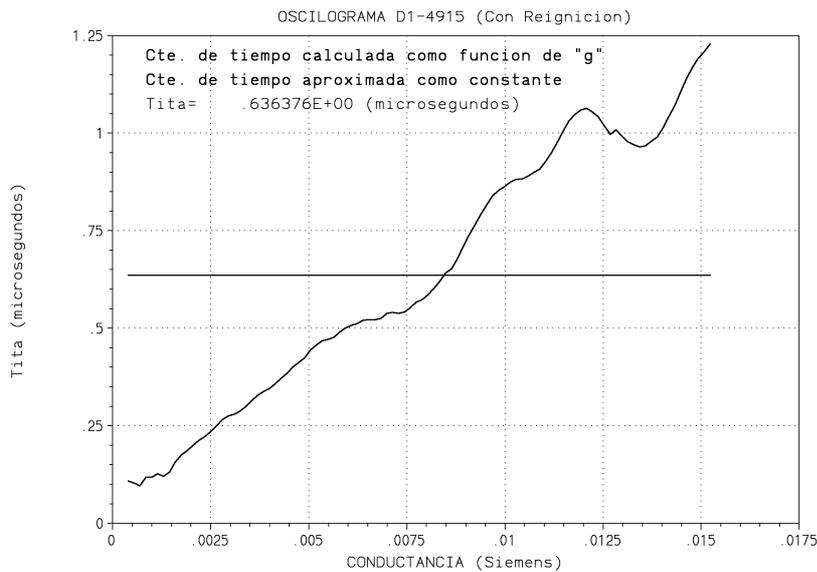


Figura N°3-10: Determinación de la constante de tiempo como parámetro constante.

La interpretación física de la aproximación anterior es similar a la realizada para la potencia ya que para el mismo valor de la conductancia - g igual a $0,0125$ [S] - le corresponde un valor aproximado de la constante de tiempo igual a $0,63$ [μ s] con lo cual se está utilizando en la simulación un arco eléctrico mucho más inestable del que en realidad se tendría de utilizar el valor verdadero de Q igual a 1 [μ s].

En cambio para g igual a $0,0075$ [S] tanto al valor de la aproximación como al valor real le corresponden valores similares de la constante de tiempo y próximos a $0,63$ [μ s] con lo

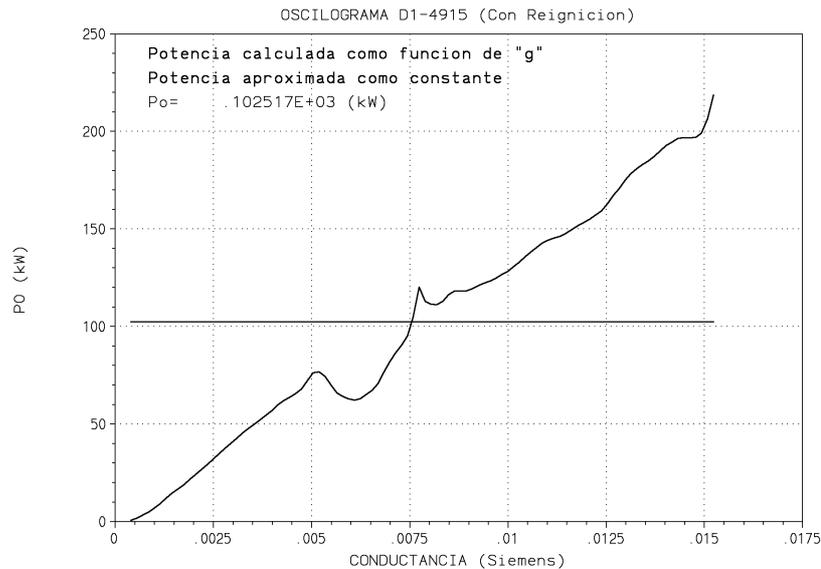


Figura N°3-8: Determinación de la potencia como parámetro constante.

La *interpretación física* que se puede hacer de la aproximación anterior es que por ejemplo, para una conductancia de 0,0125 [S] le corresponde una pérdida de potencia por enfriamiento real de 170 [kW] mientras que la aproximación realizada le otorga sólo 102 [kW]. Según lo anterior, en la realidad se está sacando más calor de la columna del arco de lo que se está suponiendo en el parámetro utilizado en la simulación, esto presupone un comportamiento más pesimista del funcionamiento del interruptor en esta parte de la simulación, es decir, en la región más alejada del cero de corriente.

Para una conductancia de 0,0075 [S] el valor resultante de la aproximación es muy parecido al que le corresponde en la realidad con lo cual en esta parte del gráfico se es más exacto y realista en los valores calculados.

En cambio cuando la conductancia g tiende a cero, es decir que la corriente i también tiende a cero, el valor de la potencia que el medio refrigerante está sacando del arco para g igual a 0,0025 [S] es de sólo 30 [kW] mientras que en las simulaciones le corresponde siempre el mismo valor con lo cual se está siendo muy optimista en cuanto al comportamiento del interruptor ya que se supone un “enfriamiento” tres veces superior al que en realidad ocurre. Por supuesto que toda la explicación anterior es mucho más válida cuando más pequeña sea g .

En cambio si se escoge una dependencia funcional de la potencia con la conductancia, se tiene la aproximación de la figura 3-9, donde se puede apreciar claramente la excelente aproximación del parámetro P_o , ya que representa a la potencia “refrigerante” muy bien independientemente del valor de la conductancia, con lo cual se gana en credibilidad y exactitud en la aproximación. En la parte superior del gráfico se presenta el tipo de dependencia de la potencia juntamente con los valores de los coeficientes de la aproximación.

información que aceptó los valores calculados como muy buenos para representar a estos arcos eléctricos.

3.6.- COMPARACIÓN GRÁFICA ENTRE LAS POSIBILIDADES PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS

Para realizar las comparaciones que a continuación se presentan, se han utilizado ensayos sobre dos interruptores de SF₆ de 145 [kV] de tensión nominal. Partiendo de los registros de derivada de corriente y de tensión, que son los que se miden directamente durante el ensayo, luego de limpiarlos y digitalizarlos se confeccionaron los archivos de entrada para poder emplear los programas con los cuales se pueden determinar los valores de los parámetros.

Para realizar un estudio comparativo que sea representativo de las distintas posibilidades sin caer en el extremo de compararlas a todas entre sí, la comparación se realizará entre las opciones de un mismo nivel de decisión; en otras palabras, primero se compara el comportamiento constante o variable de los parámetros, luego se comparan entre sí a los tres métodos de determinación de valores y para finalizar comparando la ecuación de Cassie con la de Mayr.

En todos los casos, la curva más irregular siempre responde a valores reales de cálculo, mientras que la más suave resulta de la aproximación que se realice oportunamente.

3.6.1.- COMPARACIÓN GRÁFICA ENTRE PARÁMETROS CONSTANTES Y VARIABLES

Este punto presenta una serie de figuras con la aproximación que se obtiene para la potencia y la constante de tiempo tratadas como constantes y como variables con una dependencia funcional de la conductancia del tipo potencial. También se muestra la derivada de la conductancia, siempre escogiendo como ecuación diferencial la propuesta por Mayr y con determinación de parámetros según el método de Amsinck, sólo a modo de ejemplo. Además se brinda una interpretación física de la aproximación de parámetros para cada caso.

La figura que a continuación se muestra, ejemplifica sobre la aproximación que se obtiene para la potencia refrigerante P_0 utilizando un parámetro constante para toda la simulación. La curva sinuosa responde al valor real calculado para la potencia como función de la conductancia utilizando a todos los datos disponibles, mientras que la línea recta horizontal es la aproximación cuyo valor se puede ver en la parte superior.

COMPARACION ENTRE VALORES DE “ Q ” EN [μ s]			
Oscilograma	Valor dado	Amsinck	Asturiano
D1-4915 (CR)	0,23	0,153	0,335
D1-4917 (SR)	0,23	---	0,313
D1-4948 (SR)	0,21	---	0,295
D1-4949 (SR)	0,22	---	0,327
D2-P805 (SR)	0,27	---	0,310
D2-P817 (CR)	0,34	0,235	0,384
D2-P844 (SR)	0,28	---	0,332
D2-P856 (CR)	0,25	0,341	0,348
D2-P860 (SR)	0,25	---	0,308

Tabla N°3-7: Comparación entre los valores de Q de la fórmula de Mayr, dados y calculados.

COMPARACION ENTRE VALORES DE “ U_o ” EN [kV]			
Oscilograma	Valor dado	Amsinck	Asturiano
D1-4915 (CR)	1,7	3,523	3,140
D1-4917 (SR)	3,1	---	3,017
D1-4948 (SR)	3,15	---	3,880
D1-4949 (SR)	3,62	---	3,456
D2-P805 (SR)	4,12	---	4,044
D2-P817 (CR)	1,98	3,949	3,319
D2-P844 (SR)	2,73	---	3,160
D2-P856 (CR)	2,82	4,683	3,726
D2-P860 (SR)	2,28	---	4,953

Tabla N°3-8: Comparación entre los valores de U_o dados y calculados.

Los valores dados de la tabla 3-9 que corresponden a la constante de tiempo de la fórmula de Cassie se toman todos iguales al valor de 1,3 [μ s], sin conocerse las razones de tal criterio.

COMPARACION ENTRE VALORES DE “ Q ” EN [μ s]			
Oscilograma	Valor dado	Amsinck	Asturiano
D1-4915 (CR)	1,3	0,680	1,891
D1-4917 (SR)	1,3	---	0,372
D1-4948 (SR)	1,3	---	1,214
D1-4949 (SR)	1,3	---	0,394
D2-P805 (SR)	1,3	---	0,796
D2-P817 (CR)	1,3	0,959	1,619
D2-P844 (SR)	1,3	---	0,650
D2-P856 (CR)	1,3	0,635	1,022
D2-P860 (SR)	1,3	---	1,855

Tabla N°3-9: Comparación entre los valores de Q de la fórmula de Cassie, dados y calculados.

Como puede observarse en las tablas anteriores no existen grandes diferencias entre los valores dados con los que aquí se han calculado, verificado esto con la propia fuente de

COMPARACIÓN EN LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS			
		Software Propio	Software Comercial
Parámetros	Tensión [V]	$U_0 = 5526,11 \cdot g^{0,887914}$	$U_0 = 5526,112 \cdot g^{0,088791527}$
Variables	Const. De tiempo [μs]	$\Theta = 67,5941 \cdot g^{0,946298}$	$\Theta = 67,594263 \cdot g^{0,94629877}$
Parámetros	Tensión [V]	$U_0 = 3522,78$	$U_0 = 3522,777$
Constantes	Const. De tiempo [μs]	$\Theta = 0,680165$	$\Theta = 0,68016351$

Tabla N°3-5. Resumen de los valores de los parámetros según el método escogido.

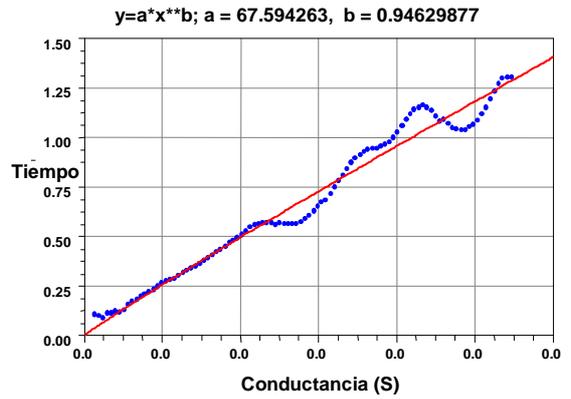
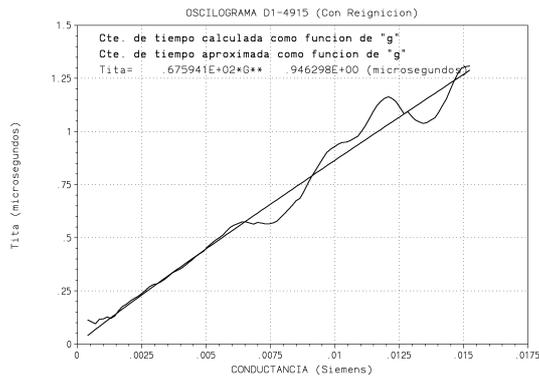
Evidentemente surge del análisis de la tabla anterior que la aproximación lograda para la determinación de los valores de los parámetros es excelente y aunque pareciera innecesario el desarrollo de programas especiales habiendo otro similar, el desarrollo se justifica a partir de una serie de opciones gráficas y de cálculo que son propias de los métodos para la determinación de los parámetros, como así también dependientes de la fórmula escogida de variación de los parámetros (subrutinas de suavizado, por ejemplo). También hay que tener en cuenta que cualquier programa comercial sólo aproxima funciones a curvas a partir de datos limpios y ya tratados.

3.5.3.- VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS PROGRAMAS

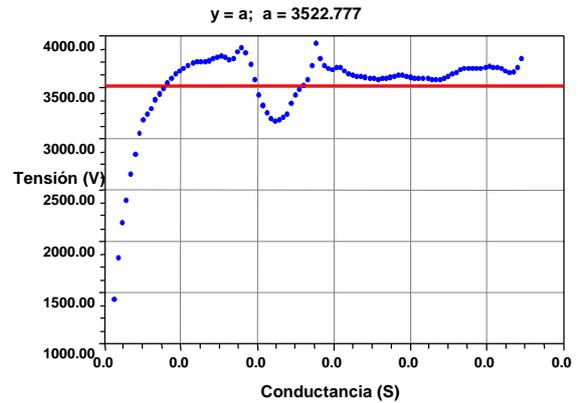
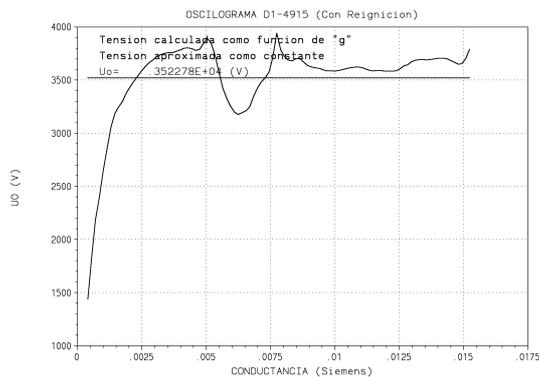
A continuación se presentan sólo a modo de verificación, cuatro tablas que contienen algunos valores de los parámetros tanto para la ecuación de Mayr como para la de Cassie ya que, para el resto de los oscilogramas, no fue posible conseguirlos a partir del proveedor de los oscilogramas. Además, a la hora de contar con estos valores, no se pudo determinar el método empleado para su cálculo por lo cual se presentan junto con los resultados de los dos métodos aquí empleados. El “---” significa que no es posible calcular éste valor por el método de Amsinck.

COMPARACION ENTRE VALORES DE “ P_o ” EN [kW]			
Oscilograma	Valor dado	Amsinck	Asturiano
D1-4915 (CR)	10,6	14,3	21,7
D1-4917 (SR)	19,1	---	34,0
D1-4948 (SR)	14,5	---	28,3
D1-4949 (SR)	17,8	---	35,1
D2-P805 (SR)	59,0	---	70,2
D2-P817 (CR)	32,0	23,0	39,8
D2-P844 (SR)	30,5	---	41,5
D2-P856 (CR)	28,3	3,3	37,2
D2-P860 (SR)	18,8	---	26,1

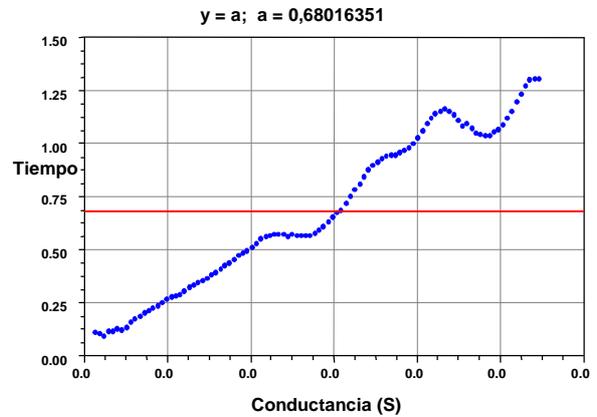
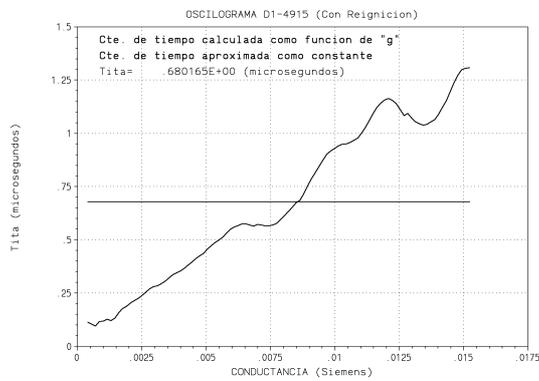
Tabla N°3-6: Comparación entre los valores de P_o dados y calculados.



(b) Aproximaciones para los coeficientes de la función de la constante de tiempo como variables de la conductancia.



(c) Aproximaciones para los coeficientes de la función de la tensión como constantes.



(d) Aproximaciones para los coeficientes de la función de la constante de tiempo como constantes.

Figura N°3-7: Comparación entre las aproximaciones de los programas desarrollados y un software comercial.

3.5.1.4.- Procedimiento a partir de un único ensayo

Al igual que los casos anteriores el tratamiento diferencial que recibe éste método comienza a partir de las tablas de tensiones y corrientes ya creadas y sincronizadas respecto del tiempo tal cual se realiza en todos los programas. Para este caso el procedimiento empleado sólo calcula la conductancia real y su derivada.

Luego automáticamente estima un valor de parámetros entre unos márgenes establecidos y según la ecuación del modelo elegida, Mayr o Cassie, crea una tabla de derivada de la conductancia con estos parámetros estimados inicialmente que, en un caso ideal y perfecto, debería ser idéntica con la calculada a partir de los datos reales aunque en la realidad es imposible que se verifique esta casualidad.

Luego mediante una subrutina de ajuste, encuentra el par de valores de coeficientes estimados inicialmente que mejor ajustan los valores de la derivada de la conductancia estimada con la real calculada a partir de los datos, es decir, se obtienen P_0 y Q ó U_0 y Q con los que se satisface la condición de que

$$\sum_{i=1}^n [g'(t) - g'_e(t)]^2 = MINIMO$$

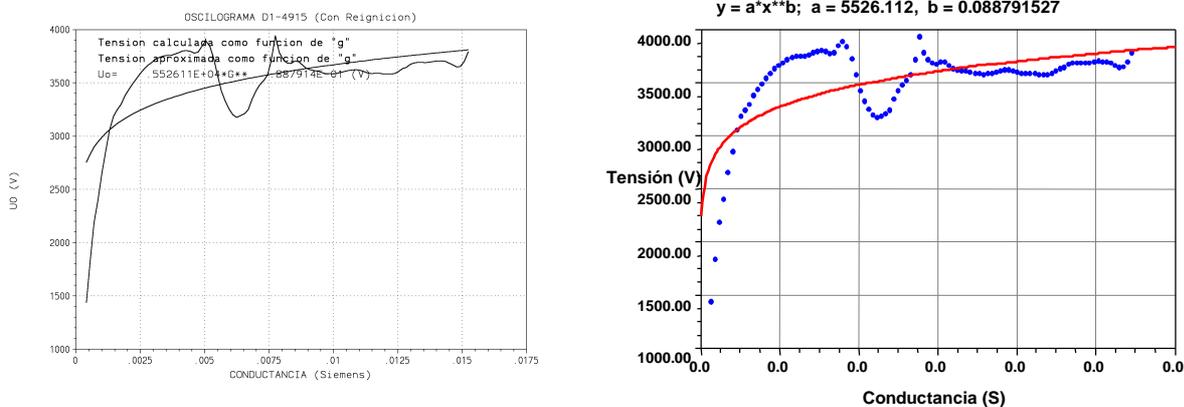
El programa tiene incluida la opción de determinar a los coeficientes P_0 y Q ó U_0 y Q como constantes para todo el cálculo y también los puede calcular de acuerdo a una función de la forma

$$P_0 = A_p \cdot g^{B_p} \quad \text{y} \quad \Theta = A_q \cdot g^{B_q}$$

para la cual calcula A_p , B_p , A_q y B_q , convenientemente.

3.5.2.- VERIFICACIÓN DE LAS APROXIMACIONES QUE REALIZAN LOS PROGRAMAS

A modo de ejemplo se muestra una comparación entre las aproximaciones en los valores de los parámetros que se logran internamente durante la ejecución de los programas desarrollados junto con los valores que se obtienen de un programa de uso comercial. En la figura N°3-7 se puede apreciar que no existen mayores diferencias entre los valores hallados.



(a) Aproximaciones para los coeficientes de la función de la tensión como variables con la conductancia.

Si, en cambio se desea utilizar el modelo de Cassie, para los cien valores de conductancia calcula la tensión que le corresponde a cada uno de ellos por doble interpolación lineal: por cada punto de conductancia $g(t)$ se determinan sus tiempos t_A y t_B en las tablas de valores decrecientes y crecientes de la conductancia. Luego, para esos tiempos t_A y t_B se determinan las tensiones v_A y v_B en la tabla de tensiones $v(t)$.

Después e independientemente del modelo escogido, para cada uno de los cien valores de conductancia hallados se calcula su derivada $g'(t)$ numéricamente como:

$$g'(t) = \frac{g(t - \Delta t) - g(t + \Delta t)}{2 \cdot \Delta t}$$

y empleando las ecuaciones descritas en el método de Amsinck:

$$P_0(g_n) = \frac{g'_A i_B^2 - g'_B i_A^2}{g_n (g'_A - g'_B)}, \quad \Theta(g_n) = \frac{g_n (i_B^2 - i_A^2)}{i_A^2 g'_B - i_B^2 g'_A}$$

$$U_{0(g_n)} = \sqrt{\frac{v_A^2 \cdot g'_B - v_B^2 \cdot g'_A}{g'_B - g'_A}}$$

obtiene P_0 , Q y U_0 para cada uno de los valores de la conductancia g , siendo “n” un valor de los cien calculados.

Para finalizar, utilizando la rutina de ajuste anterior se determinan los valores de P_0 , Q y U_0 que más aproximan los valores medidos a los calculados, ya sea como valores constantes o variables según una función predefinida.

3.5.1.3.- Procedimiento a partir de dos ensayos de apertura

Este procedimiento es similar al anterior y comienza con el cálculo del mínimo valor máximo de conductancia entre las dos tablas de conductancia de los dos ensayos y con el máximo valor mínimo, de forma que entre ambos puntos siempre se cumpla que existan valores de conductancias en los dos ensayos. Luego, y entre los valores extremos hallados, se divide la tabla anterior en cien valores de conductancias equiespaciados y para cada uno de ellos se calcula el tiempo que le corresponde en cada uno de los ensayos

Para el modelo de Mayr, se calculan las corrientes que le corresponde a cada uno de los cien valores por interpolación lineal al igual que el procedimiento anterior: para cada punto de conductancia $g(t)$ se determinan sus tiempos t_A y t_B en las tablas de valores de conductancias de cada ensayo; luego para esos tiempos t_A y t_B se determinan las corrientes i_A e i_B en las tablas de corrientes $i(t)$ correspondiente a cada ensayo en forma separada. En cambio, para el modelo de Cassie lo que se determina son los valores de tensiones v_A y v_B en cada ensayo. Luego, independientemente de lo anterior, calcula para los cien valores de conductancia su derivada $g'(t)$ numéricamente como:

$$g'(t) = \frac{g(t - \Delta t) - g(t + \Delta t)}{2 \cdot \Delta t}$$

en ambas tablas y emplea las mismas ecuaciones para el cálculo de los valores de los parámetros que fueron descriptas en el punto anterior.

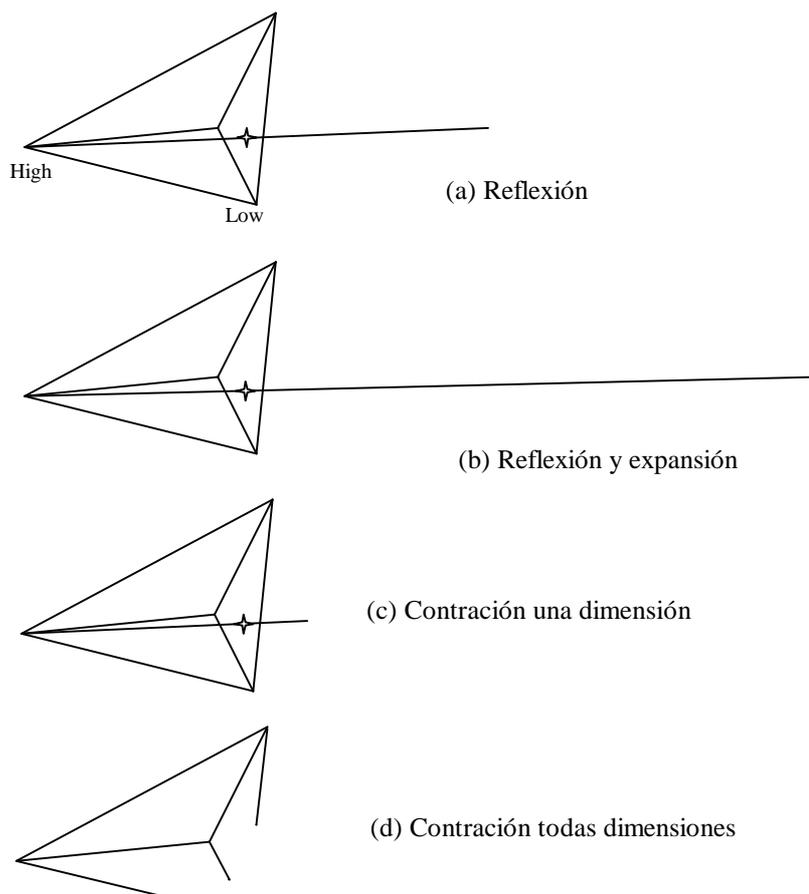


Figura N°3-6: Posibles resultados para un paso de cálculo del método Simplex.

A continuación se describe cómo se han tratado y solucionado matemáticamente, para cada uno de los programas creados, la implementación del método de cálculo para la determinación de los parámetros, según las posibilidades ya enunciadas.

3.5.1.2.- Procedimiento a partir de un ensayo con reignición

El tratamiento realizado según el método basado en la reignición del arco eléctrico, comienza con la división de la tabla de conductancias calculadas en dos partes: una parte decreciente hasta el tiempo igual a cero y otra parte creciente a partir del tiempo cero (véase la figura del método de Amsinck), ya que se toma este instante como el que marca la reignición del arco. Luego, entre las dos tablas de conductancias, toma el mínimo valor máximo de la conductancia que garantice la existencia de valores en ambas ramas y efectúa un barrido en el eje de la conductancia, tomando un total de 100 valores equiespaciados, entre el mínimo valor máximo hallado en el paso anterior y el mínimo de ambas tablas que es el momento para el cual se produce la reignición.

Luego, si se emplea el modelo de Mayr, para los cien valores equiespaciados de conductancia se determinan dos valores de corriente que le corresponde a cada uno de ellos por doble interpolación lineal de la siguiente manera: por cada punto de conductancia $g(t)$ se determinan sus tiempos t_A y t_B en las tablas de valores decrecientes y crecientes de la conductancia; luego, para esos tiempos t_A y t_B se determinan las corrientes i_A e i_B en la tabla de corriente $i(t)$.

La confección de los programas fue realizada buscando una generalización en la forma de la entrada de los datos así, un archivo de entrada para el programa “Mayrams”, también puede ser utilizado por el “Cassast”, aunque los métodos de cálculos sean distintos. Además todos los programas pueden dar como resultado los valores de los parámetros con un comportamiento constante a lo largo del tiempo o bien como variables con la conductancia, con sólo modificar un parámetro del archivo de entrada. Así, por ejemplo, por cada juego de datos en los cuales se tenga presente una reignición, se podrán ejecutar al menos cuatro programas: dos debido al método de Amsinck de cálculo y dos más debido al Asturiano, con lo cual se obtienen cuatro juego de valores de parámetros para cada comportamiento de los mismos; es decir, al final se tienen ocho juegos de valores por cada ensayo con reignición.

Al ejecutar cada uno de los programas, la pantalla del ordenador presenta una serie de mensajes con los pasos que va cumplimentando y mostrando los resultados de aquellos cálculos que se van realizando, para terminar en una pantalla donde se presenta un resumen del modelo usado, el método empleado y el tipo de comportamiento de los parámetros junto con los resultados de los valores encontrados. Todos los programas poseen opciones de graficación donde se encuentran: $u(t)$, $i(t)$, $P_o(t)$, $di(t)$, $du(t)$, $g(t)$, $R(t)$, $dg/dt(t)$ leída, $P_o(g)$, $Q(g)$, $P_o(t)$, $Q(t)$, $dg/dt(t)$ y $g(t)$ ambas calculadas y también los valores de las aproximaciones que de ellas se realizan, junto con el valor de algunos puntos característicos como son la di/dt , dv/dt y R en tiempo cero. También poseen la opción de suavizar las imperfecciones que pudieran estar presentes en la lectura de las curvas mediante un “coeficiente de suavizado” y además permiten ingresar como dato indistintamente a la corriente o a su derivada.

3.5.1.1.- Procedimientos utilizados según el método escogido

Durante la confección de los programas se han utilizado distintos procedimientos para llegar a obtener el conjunto de ecuaciones que permitieran mediante su resolución, obtener el valor del parámetro según el modelo buscado; no obstante, el método de minimización para ese parámetro fue común a todos ellos.

El método de minimización de funciones que se emplea en la obtención del valor final del parámetro buscado, se basa en la aplicación del método Simplex [18]. Este método puede ser explicado gráficamente como el movimiento de un poliedro flexible, el cual tiene las posibilidades de “moverse” libremente en función del error que comete la aproximación que realiza respecto de una de sus caras.

El poliedro a cada paso calcula el error que comete entre el valor real que tiene que aproximar, que en la figura 3-6 es la cruz, y el valor calculado con la función impuesta por el usuario, que en la figura son los vértices del poliedro, de forma que, al mayor error calculado lo refleja en la cara opuesta a fin de ir encerrando el valor buscado. Luego de satisfacer la condición de error máximo, alcanza el valor buscado. A este método también se lo puede conocer como el del “caballo ciego”.

RESUMEN DE LOS PROGRAMAS DESARROLLADOS			
NOMBRE DEL PROGRAMA	ECUACIÓN DEL MODELO	MÉTODO EMPLEADO	COMPORTAMIENTO DE PARÁMETROS
MAYRAMS	Mayr	Amsinck (un sólo ensayo con reigñición)	Constantes y variables
CASSAMS	Cassie	Amsinck (un sólo ensayo con reigñición)	Constantes y variables
MAYRAST	Mayr	Asturiano (un sólo ensayo)	Constantes y variables
CASSAST	Cassie	Asturiano (un sólo ensayo)	Constantes y variables
MAYRGEN	Mayr	Generalizado (dos ensayos)	Constantes y variables
CASSGEN	Cassie	Generalizado (dos ensayos)	Constantes y variables

Tabla N°3-4: Resumen de los programas desarrollados.

Todos los programas tienen la misma estructura general y, con algunas diferencias, siguen la misma lógica de cálculo que se presenta en la figura 3-5 junto con la secuencia de pasos que se ejecutan dentro de cada uno de los programas.

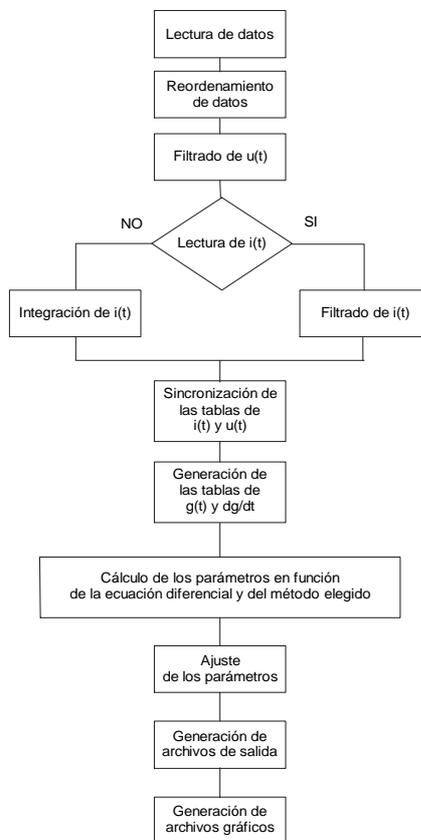


Figura N°3-5: Diagrama de flujo general de los programas desarrollados.

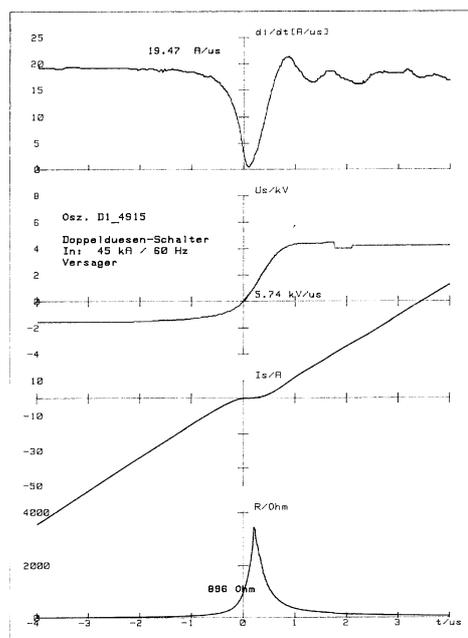


Figura N°3-4: Formato del tipo de datos de los oscilogramas.

La figura N°3-4, muestra un oscilograma típico de un interruptor de hexafluoruro de azufre de tensión nominal de 145 [kV] impreso en papel, según fueron los datos de ensayos a partir de los cuales se desarrolló la metodología. La primera curva representa la derivada de la corriente en el arco y es la que realmente se mide durante el ensayo de apertura del interruptor, junto con la tensión en bornes que es la segunda curva; mediante integración de la primera se obtiene la corriente en el arco, que cruza por el cero, siendo la última curva la resistencia del arco calculada a partir de las anteriores.

Aquí es necesario resaltar que durante el ensayo de la figura se produjo una reignición del arco eléctrico en el intento de apertura que, si hubiera sido exitoso la corriente luego de su paso por cero seguiría manteniendo su valor nulo.

La metodología que se empleó contempla una serie de pasos que comienzan con la lectura de los oscilogramas con un scanner, luego para mejorar la definición de la curva se la debe limpiar y despejar de todos aquellos puntos de “suciedad” de forma que, al final del proceso, sólo se tenga la curva a digitalizar junto con aquellas referencias que necesite el programa digitalizador. Para finalizar se procede a digitalizar el oscilograma con lo cual se obtienen tablas de tiempo-derivada de corrientes y tiempo-tensiones, las cuales se utilizarán para confeccionar un archivo de entrada tal cual se muestra en el Apéndice N°I.

3.5.1.- PROGRAMAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS

Un paso importante en la metodología es aplicar un conjunto de programas especialmente creados en este trabajo, que combinan las posibilidades más usuales de cálculo de los parámetros junto con una nueva forma de obtenerlos llamada “Método Asturiano”. Desarrollados en lenguaje Fortran [18,19], utilizan como entrada un archivo “*.dat” para dar como salida un archivo de extensión “*.sal” que contiene un detalle de los pasos ejecutados y otro archivo “*.plo” que contiene las salidas gráficas. La principal diferencia entre ellos radica en el tratamiento matemático de los datos causado por la ecuación diferencial que se emplea para simular al arco.

▷ al instante t_2 (coincidente con el cero de la corriente total) se tiene,

$$i = 0 \quad \therefore \quad \theta(g_2) = -g_2/g'_2$$

De aquí se observa que para una determinada corriente de alta frecuencia, se puede determinar un par de valores de P_0 y q para un juego de valores de g y g' . Cambiando el tiempo de la inyección de corriente del circuito sintético también es posible tener otro juego de valores de P_0 y q . Repitiendo este proceso varias veces y empleando una regresión adecuada, se obtienen $P_0(g)$ y $q(g)$.

3.4.3.2.2.- Método de Zückler

Este método supone que para dos puntos muy cercanos las condiciones del arco no cambian entonces los valores de P_0 y q son los mismos para dos tiempos próximos. Si v e i son conocidos para los puntos t_1 y t_2 , entonces es posible obtener P_0 y q de la siguiente manera:

▷ para el tiempo t_1 :

$$\left. \frac{dg}{dt} \right|_{t=t_1} = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{i_1^2}{P_0} - g_1 \right) = g'_1$$

▷ para el tiempo t_2 :

$$\left. \frac{dg}{dt} \right|_{t=t_2} = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{i_2^2}{P_0} - g_2 \right) = g'_2$$

Como la corriente y la tensión se miden directamente para t_1 y t_2 entonces es posible calcular g_1 y g_2 . Partiendo del sistema anterior de dos ecuaciones con dos incógnitas y luego de operar se obtiene que:

$$P_0 = \left(\frac{i_2^2 \cdot g'_1 - i_1^2 \cdot g'_2}{g_1 \cdot g_2 - g_2 \cdot g_1} \right)$$

y

$$\Theta = \left(\frac{i_1^2 \cdot g_2 - i_2^2 \cdot g_1}{i_2^2 \cdot g'_1 - i_1^2 \cdot g'_2} \right)$$

3.5.- METODOLOGÍA DESARROLLADA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DEL MODELO DE ARCO.

Para la obtención de los valores de los parámetros de los modelos que representan al arco eléctrico fue necesaria crear una metodología que comience desde un oscilograma impreso en papel y termine con los valores buscados. La necesidad de tal amplitud fue motivada por el formato de los datos que se han utilizado y aunque la obtención de la información desde otro tipo de fuente, en general, representará un trabajo más sencillo ya que se podrán evitar algunos de los pasos que a continuación se detallarán; el formato de los datos que se poseían al comienzo del trabajo así lo impusieron.

donde $g'_e(t)$ es un valor calculado para un par de valores estimados de P_0 y Q , que se puede igualar al valor calculado empleando la primera ecuación a partir de los datos registrados. Luego si se efectúa un ajuste por mínimos cuadrados del conjunto calculado con los medidos, se obtiene el par de valores de P_0 y Q tales que

$$\sum_{i=1}^n [g'_m(t) - g'_e(t)]^2$$

sea mínimo, con lo cual se arriba a los valores que mejor representan a las mediciones según el procedimiento empleado.

De la misma manera se pueden seguir los pasos anteriores pero esta vez para la ecuación de Cassie para la cual también se obtendrán los valores de U_0 y Q que mejor aproximan la derivada de la conductancia estimada o calculada a la registrada.

3.4.3.2.- Métodos especiales para la determinación de parámetros

Al igual que los métodos para la determinación de parámetros como constantes, los métodos especiales se basan en alguna suposición o característica especial del circuito de medida para la determinación de los valores P_0 y Q , según lo cual Rijanto usa un circuito sintético de inyección de corriente para presuponer que no se entrega potencia al arco durante el ensayo, Zückler supone que los valores de los parámetros son similares para dos puntos próximos en el tiempo y Thiel-Welly supone una variación exponencial de los parámetros proponiendo un método que determina un juego de valores de P_0 y Q aceptando la constancia de los parámetros [12,14].

3.4.3.2.1.- Circuito especial de inyección de corriente (o Método de Rijanto)

El método utilizado por Rijanto se basa en la ecuación de Mayr descrita con parámetros en función de la conductancia:

$$\frac{g'}{g} = \frac{1}{\Theta(g)} \left(\frac{v.i}{P_{0(g)}} - 1 \right)$$

Haciendo $g' = 0$, se tiene que $v.i = P_{0(g)}$. Entonces, si el circuito no entrega potencia al arco $v.i = 0$, es debido a que $i = 0$ y, por lo tanto,

$$\frac{g'}{g} = -\frac{1}{\Theta} \quad \therefore \quad \Theta = -\frac{g}{g'}$$

Con lo cual la obtención de los parámetros se reduce a conseguir puntos que pasen por el cero y el máximo y mínimo de g , es decir $g' = 0$, pudiéndose determinar separadamente P_0 y Q . Para esto se utiliza un circuito sintético de inyección de corriente de alta frecuencia sobre una corriente de cortocircuito obteniéndose así ceros de corriente y puntos de $g'=0$ de la siguiente manera,

▷ al instante t_1 (coincidente con un máximo de la corriente total) se tiene:

$$g' = 0 \quad \therefore \quad P_0(g) = i(t_1) \cdot v(t_1)$$

con $g(t_1) = i(t_1) / v(t_1)$

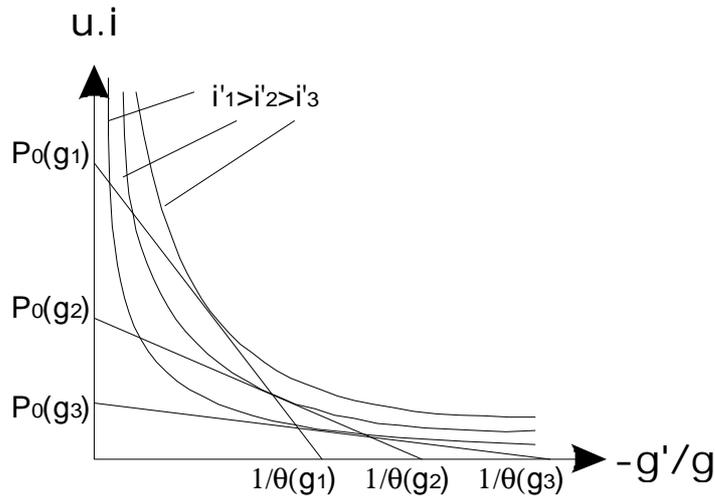


Figura N°3-3: Representación esquemática del método de Ruppe.

Si se tienen varios oscilogramas se pueden obtener un conjunto de puntos para P_0 en función de la conductancia, que se supuso igual para ensayos distintos, sobre el eje de abscisas y de la misma manera se tiene un conjunto de puntos de $1/Q$ sobre el eje de ordenadas.

Entonces, para obtener las funciones de $P_0(g)$ y $Q(g)$ se debe repetir el procedimiento anterior un número grande de veces de manera de tener un conjunto de puntos de $P_0(g_n)$ y $Q(g_n)$, siendo “n” el número del ensayo al que pertenecen los valores; de manera de obtener mediante una regresión adecuada las funciones buscadas.

3.4.3.1.4.- Método propio o Asturiano

Este nuevo método sólo necesita un único ensayo del interruptor para determinar los parámetros de la ecuación del modelo de arco elegido y este ensayo puede ser indistintamente tanto el de una reignición del arco como también el de una apertura exitosa, con lo cual se está frente a un método de aplicabilidad más general que los anteriores.

Consiste en determinar los parámetros a partir de los valores registrados de tensión y corriente (o su derivada) para lo cual se calcula la derivada de la conductancia para cada valor de tiempo t mediante

$$g'_m(t) = \frac{g_m(t - \Delta t) - g_m(t + \Delta t)}{2 \cdot \Delta t}$$

generando una tabla de valores de $g'_m(t)$, donde el subíndice “m” significa valor medido.

Por otra parte, a la ecuación de Mayr

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

se la puede expresar de la siguiente manera

$$\frac{dg}{dt} = \frac{g}{\Theta_e} \left(\frac{v \cdot i}{P_{0e}} - 1 \right) = g'_e(t)$$

Este método necesita de varios oscilogramas distintos debido a que parte del principio de que, siendo P_0 y Q funciones de la conductancia g , deben mantener su mismo comportamiento para distintos arcos eléctricos en similares condiciones, es decir, con i , di/dt y dg/dt comparables en magnitud, por lo tanto para utilizar éste método se deben contar con varios ensayos del mismo interruptor realizados bajo las mismas condiciones.

La demostración del procedimiento de basa nuevamente en la ecuación de Mayr,

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

de donde se despeja el producto $v.i$

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

Entonces la ecuación puede ser escrita como

$$v.i = f \left(\frac{g'}{g} \right)$$

que es similar a la ecuación de una recta de la forma

$$y = m.x + b$$

con $v.i$ como variable dependiente y g'/g como variable independiente, lo que da que el producto $P_0 \cdot Q$ es la pendiente de una recta donde están todos los puntos con el mismo valor de conductancia y por lo tanto, las intersecciones de esta recta con los ejes coordenados dan las siguientes ecuaciones:

▷ Intersección con el eje de ordenadas:

$$\Rightarrow v.i = 0 \quad \therefore \frac{1}{\Theta} = -\frac{g'}{g}$$

▷ Intersección con el eje de abscisas:

$$\Rightarrow -\frac{g'}{g} = 0 \quad \therefore P_0 = v.i$$

que son dos puntos P_0 y I/Q sobre la recta de igual conductancia.

$$g'_A = \left. \frac{dg}{dt} \right|_{t=t_A} \quad y \quad g'_B = \left. \frac{dg}{dt} \right|_{t=t_B}$$

y además:

$$v_A = v(t_A) \quad e \quad v_B = v(t_B)$$

Despejando de a $\Theta(g_1)$ de (1),

$$\Theta(g_1) = \frac{g_1}{g'_A} \left(\frac{v_A^2}{U_0^2(g_1)} - 1 \right) \quad (3)$$

e introduciéndola en (2) y despejando:

$$U_{0(g_1)} = \sqrt{\frac{v_A^2 \cdot g'_B - v_B^2 \cdot g'_A}{g'_B - g'_A}} \quad (4)$$

Introduciendo (4) en (1) y luego de operar

$$\Theta_{(g_1)} = g_1 \cdot \left(\frac{v_A^2 - v_B^2}{v_A^2 \cdot g'_B - v_B^2 \cdot g'_A} \right) \quad (5)$$

Con el proceso anterior sólo se han determinado un par de valores de $U_0(g_1)$ y $\Theta(g_1)$ como funciones de g_1 , pero si se repite todo lo anterior para varios valores de g a partir de la curva de la figura, y con una regresión adecuada, entonces se obtienen los valores de las funciones $U_0(g)$ y $\Theta(g)$.

En cambio, si utilizamos la ecuación de Mayr:

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

a los puntos “A” y “B”, lo cual luego de operar se llega a que los parámetros son:

$$P_0(g_1) = \frac{g'_A i_B^2 - g'_B i_A^2}{g_1 (g'_A - g'_B)} \quad (6)$$

y

$$\Theta(g_1) = \frac{g_1 (i_B^2 - i_A^2)}{i_A^2 g'_B - i_B^2 g'_A} \quad (7)$$

para el punto “ g_1 ”. Repitiendo el proceso anterior para varios puntos y realizando una regresión matemática se obtienen los valores de $P_0(g)$ y $\Theta(g)$.

Como se puede observar de la comparación entre las fórmulas (4) y (5) del punto anterior con las (6) y (7) del presente, se puede decir que las relaciones halladas para los parámetros $P_0(g)$ y $\Theta(g)$ son las mismas e independientes del método utilizado para su cálculo. Lo mismo ocurre para los parámetros, $U_0(g)$ y $\Theta(g)$ de la fórmula de Cassie, ya que (6) y (7) del punto anterior es idéntica a (4) y (5) del presente.

3.4.3.1.3.- Método a partir de varios ensayos de apertura (o de Ruppe)

a los puntos “A” y “B”, lo cual luego de operar se llega a que los parámetros son:

$$U_{0(g_1)} = \sqrt{\frac{v_A^2 \cdot g_B' - v_B^2 \cdot g_A'}{g_B' - g_A'}} \quad (6)$$

y

$$\Theta_{(g_1)} = g_1 \left(\frac{v_A^2 - v_B^2}{v_A^2 \cdot g_B' - v_B^2 \cdot g_A'} \right) \quad (7)$$

para el punto “ g_1 ”. Repitiendo el proceso anterior para varios puntos y realizando una regresión matemática se obtienen los valores de $U_0(g)$ y $\Theta(g)$.

3.4.3.1.2.- Método a partir de dos ensayos (o Generalizado)

Este nuevo método se lo puede considerar como una generalización del método anterior y se basa en la determinación de los parámetros del arco utilizando dos ensayos distintos del mismo interruptor y en idénticas condiciones de prueba, ya sean con o sin reignición térmica. En la figura siguiente se presentan superpuestas las conductancias respectivas a dos ensayos “A” y “B” del mismo interruptor sincronizadas a partir del tiempo cero, que es donde se produciría la reignición en caso de presentarse en alguno de los oscilogramas.

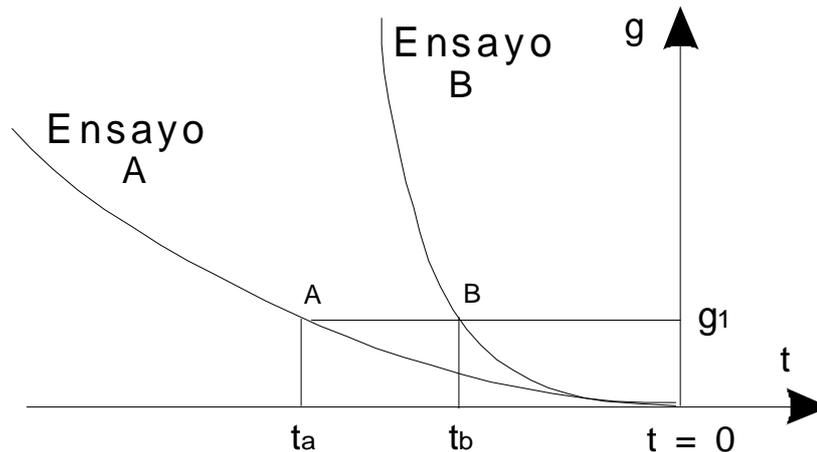


Figura N°3-2: Representación esquemática del método Generalizado.

En la figura anterior si aplicamos la ecuación de Cassie,

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

a los puntos t_A y t_B , y considerando además a P_0 y Θ como función de g :

$$g_A' = \frac{g_1}{\Theta(g_1)} \left[\frac{v_A^2}{U_0^2(g_1)} - 1 \right] \quad (1)$$

$$g_B' = \frac{g_1}{\Theta(g_1)} \left[\frac{v_B^2}{U_0^2(g_1)} - 1 \right] \quad (2)$$

donde:

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

a los puntos t_A y t_B , y considerando además a P_0 y Θ como función de g , se ve que:

$$g'_A = \frac{1}{\Theta(g_1)} \left[\frac{i_A^2}{P_0(g_1)} - g_1 \right] \quad (1)$$

$$g'_B = \frac{1}{\Theta(g_1)} \left[\frac{i_B^2}{P_0(g_1)} - g_1 \right] \quad (2)$$

donde:

$$g'_A = \left. \frac{dg}{dt} \right|_{t=t_A} \quad \text{y} \quad g'_B = \left. \frac{dg}{dt} \right|_{t=t_B}$$

y además:

$$i_A = i(t_A) \quad \text{e} \quad i_B = i(t_B)$$

Despejando a g_1 de (1) y (2) e igualando, tenemos que

$$g_1 = \left[\frac{i_A^2}{P_0(g_1)} - g'_A \cdot \Theta(g_1) \right] = \left[\frac{i_B^2}{P_0(g_1)} - g'_B \cdot \Theta(g_1) \right]$$

que es un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas. Operando:

$$\Theta(g_1) = \frac{1}{P_0(g_1)} \cdot \left(\frac{i_A^2 - i_B^2}{g'_A - g'_B} \right) \quad (3)$$

Introduciendo (3) en (1) y luego de operar

$$P_0(g_1) = \frac{g'_A i_B^2 - g'_B i_A^2}{g_1 (g'_A - g'_B)} \quad (4)$$

de la misma manera, poniendo (4) en (3) y operando,

$$\Theta(g_1) = \frac{g_1 (i_B^2 - i_A^2)}{i_A^2 g'_B - i_B^2 g'_A} \quad (5)$$

Con el proceso anterior sólo se han determinado un par de valores de $P_0(g_1)$ y $\Theta(g_1)$ como funciones de g_1 , pero si se repite todo lo anterior para varios valores de g a partir de la curva de la figura 3-1, y con una regresión adecuada, entonces se obtienen los valores de $P_0(g)$ y $\Theta(g)$.

Todo el mismo proceso anterior se puede repetir pero esta vez empleando la ecuación de Cassie:

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

La variable independiente de la fórmula 8 debe cumplir con la condición de estar suficientemente involucrada en la ecuación del modelo de forma de poder despejarla a fin de facilitar el análisis matemático que se debe realizar en todo modelo. A tal fin y de una simple observación de la forma de las ecuaciones tanto de Mayr como de Cassie, resulta evidente la elección de la conductancia g del arco eléctrico como variable independiente en el proceso de la determinación de los parámetros de ambas ecuaciones. Por lo tanto, a partir de ahora el problema de la determinación de los parámetros en las ecuaciones diferenciales de los modelos del arco, se reduce a calcular P_0 , U_0 y Q como variables de la conductancia con la forma presentada en la ecuación 8, es decir, $y = a.g^b$.

A continuación se detallan tres métodos para determinar los parámetros que tienen un elemento en común: la determinación de los valores de $P_0(g)$, $U_0(g)$ y $Q(g)$ se realiza a partir de oscilogramas de corrientes y de tensiones, tomando suposiciones adicionales que deben ser hechas para cada caso en particular. El método de Amsinck y el método Generalizado, suponen que los parámetros tienen la misma dependencia respecto de la conductancia antes y después del cero de corriente y método de Ruppe supone que la dependencia de los parámetros respecto de la conductancia se mantiene constante para varios ensayos con diferentes corrientes. El nuevo método propuesto, se lo puede considerar como más general que los anteriores por dos motivos: no necesita de un ensayo con reignición, condición necesaria para el método de Amsinck, y utiliza sólo un ensayo del interruptor para determinar los parámetros del modelo cuando el método de Ruppe y el generalizado necesitan por lo menos dos ensayos diferentes [8,11,12,14].

3.4.3.1.1.- Método a partir de un ensayo con reignición (o de Amsinck)

Este método es aplicable en la determinación de los parámetros de un arco eléctrico sólo en aquellos casos donde, durante el ensayo del interruptor, se produce una interrupción seguida de una reignición térmica, es decir, renacimiento del arco muy próximo al paso por cero de la corriente. Para determinar los parámetros, utiliza el oscilograma del ensayo del interruptor para confeccionar una tabla de valores para la conductancia del arco, partiendo de la corriente y de la tensión, en función del tiempo para unos microsegundos antes y después del cero de corriente, como se muestra en la figura siguiente:

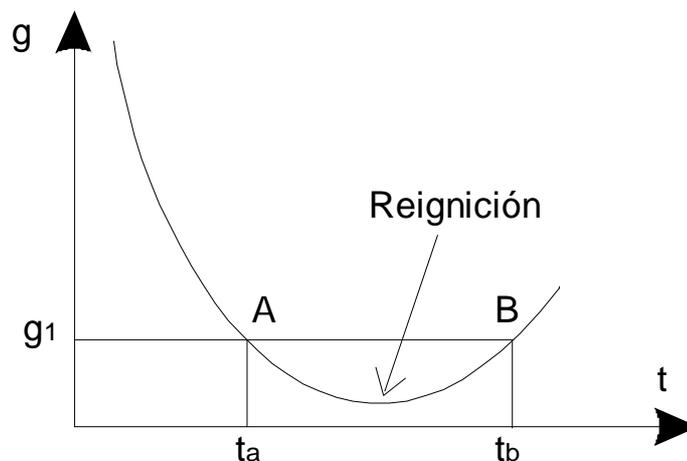


Figura N° 3-1: Representación esquemática del método de Amsinck.

En la figura anterior, si se aplica la ecuación de Mayr,

continuación se explican los métodos posibles de aplicar a partir de oscilogramas de ensayos, para determinarlos como variables, ya que de tener que escogerlos como constantes, el proceso en general se reduce a una simplificación del anterior.

La determinación de los parámetros como variables implica la selección de otro parámetro independiente el cual se utiliza para calcular el valor del parámetro dependiente a lo largo de toda la simulación, según una función previamente escogida. Existen varias dependencias funcionales que pueden ser utilizadas para relacionar P_0 , U_0 y Q con una variable independiente. Las funciones que pueden relacionar a la potencia, la tensión o a la constante de tiempo se las puede agrupar según el tipo de familia a la cual pertenecen y alguna de ellas se las puede observar en la tabla 3-3.

FAMILIAS DE FUNCIONES MATEMATICAS			
Nº	FAMILIA	NOMBRE	FORMA DE LA ECUACIÓN
1	Lineal	Lineal	$y = a + bx$
2	Cuadrática	Cuadrática	$y = a + bx + cx^2$
3	Polinomial	Polinomial	$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + \dots$
4	Exponencial	Exponencial	$y = ae^{bx}$
5		Exp. Modificada	$y = ae^{b/x}$
6		Logarítmica	$y = a + b \ln x$
7		Log. Recíproca	$y = \frac{1}{a + b \ln x}$
8	Potenciales	Potencia	$y = ax^b$
9		Pot. Modificada	$y = ab^x$
10		Geométrica	$y = ax^{bx}$
11		Geo. Modificada	$y = ax^{b/x}$

Tabla N°3-3: Algunas familias de funciones matemáticas.

Además de las presentadas anteriormente, existen otras familias como la hiperbólica y la trigonométrica que no se citan, y que no se tienen en cuenta, ya que su forma general no resulta sencilla de aplicar debido a que la ecuación que describe el comportamiento de las variables involucradas debe cumplir con las siguientes pautas:

- ▷ Debe ser lo suficientemente sencilla ya que, en lo posible, se debe poder explicar y/o comprender el comportamiento de los parámetros que posea. En otras palabras, debe contener el mínimo posible de parámetros.
- ▷ Debe ser una ecuación cuyo resultado siempre sea positivo ya que ni la potencia, ni la constante de tiempo y ni la tensión pueden tomar valores negativos durante la simulación.

Por su forma la familia exponencial resulta complicada de implementar, al igual que la cuadrática y la polinomial. Como las ecuaciones 10 y 11 tienen una dependencia doble respecto de la variable independiente, quedan entonces sólo las funciones 1, 8 y 9; de las cuales se elige la 8 ya que ella tiene más agilidad para representar curvas que la 1, es más sencilla que la 9 y nunca puede tomar valores negativos.

fundamentalmente por la cantidad de los mismos, que es casi directamente proporcional al grado de exactitud en la representación del fenómeno.

También existe la posibilidad de hacer suposiciones adicionales para determinar el valor de los parámetros pero en todos los casos se pierde fidelidad en la ecuación previamente elegida. Por este motivo la elección de la ecuación diferencial se debe realizar teniendo en cuenta la posibilidad con que se cuenta para la determinación de los parámetros.

Independientemente de la cantidad de parámetros de la ecuación, la forma de determinarlos puede seguir varios caminos:

- ▷ Los parámetros son calculados directamente de las mediciones de tensión y corriente aplicando técnicas matemáticas específicas.
- ▷ También se pueden aplicar circuitos especiales para reproducir condiciones similares adecuados para la medición directa de los parámetros.
- ▷ Pueden ser definidos por funciones cuyos coeficientes son determinados por regresiones matemáticas.

La selección de uno u otro camino depende fundamentalmente de los datos con que se cuenta para la determinación de los parámetros y será en función de ellos, tanto la técnica a aplicar como el proceso de ajuste de parámetros.

3.4.3.- DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACION DEL MODELO

El proceso para la determinación de los parámetros del modelo está íntimamente relacionado tanto por la ecuación diferencial escogida como por los datos que se obtengan para su determinación. Así, y a partir de oscilogramas de ensayos, si nos independizamos de la ecuación diferencial, existen dos grandes grupos que caracterizan el comportamiento de los parámetros a lo largo de la simulación: parámetros constantes, que son aquellos en donde el valor calculado permanece invariable a lo largo de todo el tiempo que dure la simulación, y los parámetros variables en donde se debe elegir una dependencia funcional respecto de otra variable que se toma como independiente.

La determinación de los parámetros como constantes viene avalada por la simplicidad intrínseca del proceso en donde por la propia característica del mismo no existen muchos valores a determinar, es más, en la gran mayoría de los modelos tan sólo hay que determinar un valor que representa a cada parámetro para toda la simulación.

Dentro del último grupo, la dependencia funcional de las variables queda a elección del usuario, presentando gran disparidad entre las posibilidades siendo, tal vez, la más común una dependencia funcional de la forma potencial o exponencial [12,14,16].

3.4.3.1.- Métodos para la determinación de los parámetros

Como se mencionó anteriormente, la determinación de los valores de los parámetros puede ser realizada para dos formas de comportamiento durante la simulación: como constantes (o independientes) o como variables (o dependientes) de la conductancia, del tiempo, o de alguna otra variable tomada como independiente. Debido a estas opciones, a

- ▷ Elección de una ecuación: El arco es descrito por una ecuación diferencial que relaciona la variación de la conductancia con la corriente o la tensión del mismo. Este concepto está basado en que la variación de la temperatura del arco y por lo tanto, su conductancia, está gobernada por el resultado de un proceso de balance de energía entre calor aportado al arco por efecto Joule por la red eléctrica y un “efecto refrigerante” causado por el medio circundante. Esta ecuación diferencial puede presentar distintas formas y su interpretación física puede llegar a ser muy difícil.
- ▷ Ensayos de campo o laboratorio: A partir de ensayos sintéticos (de laboratorio) o reales (de campo) sobre interruptores reales se obtienen oscilogramas de tensión y de corriente, que describen su comportamiento durante todo el proceso de apertura del interruptor. Tal vez la parte más crítica del proceso de modelización se encuentra en la obtención de estas curvas, ya que si bien han sido notables los avances realizados en los equipos de detección y procesamiento de datos, la rapidez del fenómeno (décimas de microsegundos) y la amplitud de variación de las variables, obliga a tomar recaudos especiales para su determinación y son muy pocos los equipos disponibles a tal efecto.
- ▷ Evaluación de los parámetros del arco: La necesaria complejidad de la ecuación diferencial escogida choca a menudo con las intenciones de simplificar el proceso. Para mejorar la calidad en la representación del arco mediante una ecuación es práctica común introducir un mayor número de parámetros auxiliares, lo que obliga a utilizar una solución de compromiso entre simplicidad y calidad de la representación, ya que un aumento en la cantidad implica poner más dificultades a la hora de determinar sus valores mediante diversas técnicas.
- ▷ Simulaciones numéricas: Una vez que se ha determinado con precisión los valores de los parámetros del arco y si se tienen los valores del circuito eléctrico asociado al ensayo o a la prueba de campo, se puede reproducir mediante la utilización de programas específicos de simulación de eventos transitorios (como pueden ser el EMTP/ATP -Electromagnetic Transients Program o su versión más moderna el Alternative Transients Program-, NETOMAC, ACSL –Advanced Continuous Simulation Language- entre otros de circulación comercial o gratuita) toda la duración del proceso donde se produjo la presencia del arco eléctrico. Con ello se puede llegar a estudiar el comportamiento de éste arco eléctrico bajo otras condiciones de operación de la red.

3.4.2.- PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DEL MODELO

El proceso para crear un modelo de arco tipo “Caja Negra” presenta dos grandes problemas a resolver: el primero se refiere al equipamiento necesario para la obtención de registros de tensión y corriente (aunque en realidad lo que se mide durante el ensayo es la derivada de la corriente con un voltímetro magnético o bobina de Rogowski [15-17]) y el segundo es determinar el valor de todos los parámetros escogidos para el modelo

Los modelos 1 y 2 pertenecen a Cassie y a Mayr, respectivamente y se pueden considerar como los padres de los demás, ya que muchos de los restantes se pueden reducir a los primeros con algunas consideraciones especiales o bien por modificaciones de sus expresiones matemáticas. Además en [12], se llega a demostrar como se puede hasta juntar estos dos modelos en uno mucho más general.

De acuerdo a los grupos mencionados con anterioridad clasificaremos los modelos de arcos presentados en la tabla 3-2, en:

- ▷ Modelos de dos parámetros constantes, modelos N°1 y 2.
- ▷ Modelos de más de dos parámetros constantes, N°3, 4, 5 y 6.
- ▷ Modelos con parámetros variables, N°7, 8, 9 y 10
- ▷ Modelos aleatorios, N°11 y 12.

de los cuales los modelos más usados son actualmente los del tercer grupo.

También existen otros modelos de arco llamados “en serie”, que son el producto de combinar en serie a algunos de los modelos precedentes [10,13] y que también serán estudiados en capítulos posteriores.

3.4.- EL PROCESO DE SIMULACIÓN

La simulación digital es un proceso numérico diseñado para estudiar el comportamiento de cualquier sistema (eléctrico o no) en una computadora a lo largo de un tiempo determinado aunque existen otros métodos de simulación no digitales. Para el caso que se va a analizar, esta definición se interpreta como el estudio de la interacción del conjunto de modelos matemáticos y lógicos, capaces de reproducir satisfactoriamente los componentes de una red eléctrica que se ve sometida a una modificación en su estado estacionario.

En lo que respecta al arco eléctrico, este proceso de simulación hace posible el estudio, la comprensión y la experimentación de las complejas interacciones que ocurren durante el proceso de corte de la corriente; lo que se traduce en un ahorro notable de recursos de tiempo y dinero.

3.4.1.- MODELOS TIPO “CAJA NEGRA”

El objetivo de los modelos llamados “CN” es describir la interacción del arco eléctrico con la red asociada durante el proceso de interrupción de la corriente, buscándose principalmente una excelente representación desde el punto de vista eléctrico más que una explicación física de los procesos internos involucrados en el fenómeno [7,11,14].

La técnica de simulación del arco eléctrico mediante modelos “CN” se basa en el empleo de oscilogramas de corriente y de tensión de la apertura de interruptores, para luego relacionarlos con una ecuación diferencial previamente escogida; para deducir un modelo matemático capaz de reproducir el arco en este experimento en particular e implica generalmente los siguientes pasos:

MODELOS AVANZADOS DEL ARCO ELÉCTRICO		
Nº	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} =$	PARÁMETROS
1	$\frac{1}{\Theta_0} \left\{ \left(\frac{v}{U_0} \right)^2 - 1 \right\}$	Θ_0, U_0
2	$\frac{1}{\Theta_0} \left\{ \frac{v.i}{P_0} - 1 \right\}$	Θ_0, P_0
3	$\frac{1}{\Theta_0} \left\{ \frac{v.i}{P_0} - 1 \right\} + \mathbf{b} \frac{dv}{dt}$	Θ_0, P_0, β
4	$\frac{1}{\Theta_0} \left\{ \frac{v.i - P_0}{e^2 \cdot g} - 1 \right\} \left[1 - \left(\frac{v}{U_d} \right)^2 - \frac{\Theta_0}{U_d^2} \left(\frac{dv^2}{dt} \right) \right]$	Θ_0, P_0, e, U_d
5	$\frac{1}{\Theta} \left\{ \frac{v.i}{P_0 + U_0 i } - 1 \right\}; \Theta = \Theta_0 + \frac{\Theta_1}{1 + \left(\frac{g}{G_0} \right)^2}$	$\Theta_0, P_0, U_0, G_0, \Theta_1,$ Donde Θ_1 puede ser cero.
6	$\frac{1}{\Theta_0} \left\{ \frac{v.i}{a + b \cdot i + c \cdot \sqrt{ i }} - 1 \right\}$	Θ_0, a, b, c
7	$\frac{1}{\Theta(i)} \left\{ \frac{G_s(i)}{g} - 1 \right\}$	$\Theta(i), G_s(i)$
8	$\frac{1}{\Theta(g)} \left\{ \frac{v.i}{P(g)} - 1 \right\}$	$\Theta(g), P(g)$
9	$\frac{1}{\Theta(g)} \left\{ \frac{G_s(i)}{g} - 1 \right\}$	$\Theta(g), G_s(i)$
10	$\frac{1}{\Theta(g)} \left\{ \frac{v.i}{P(g)} - \mathbf{g}(t, g) \right\}$	$\Theta(g), P(g), \gamma(t, g)$
11	$\frac{1}{\Theta(g, t)} \left\{ \frac{v.i}{P(g, t)} - 1 \right\}$	$\Theta(g, t) = \Theta(1 + \xi_T(g, t))$ $\Theta(g, t) = P(1 + \xi_P(g, t))$
12	$\frac{1}{\Theta_0} \left\{ \left \frac{v \cdot i ^a}{k} \right ^{\frac{1}{1+a}} - \mathbf{c}(t) \right\}$	$\alpha, k, \Theta_0,$ $\chi(t) = 1 + \xi_x(t)$

Tabla N°3-2: Resumen de los modelos avanzados de arco eléctrico.

En la tabla anterior se puede observar que ambos modelos están descriptos por sólo dos parámetros:

- ▷ Q y P_o para el modelo de Mayr
- ▷ Q y U_o para el modelo de Cassie

3.3.- MODELOS AVANZADOS DEL ARCO ELÉCTRICO

En realidad, se tienen varios modelos para distintas aplicaciones teniendo cada uno de ellos un grado mayor o menor de simplificaciones que implican imprecisiones con respecto al comportamiento real, cada uno de ellos es válido dentro del rango específico donde fue desarrollado.

A medida que se fueron elaborando procedimientos de medida más representativos y lográndose un mejor conocimiento de los fenómenos físicos involucrados, se han ido proponiendo nuevos modelos. Cada uno de ellos intenta reflejar alguna consideración o uso en particular y en general todos ellos tratan de establecer una relación entre la conductancia del arco relacionándola con alguna otra variable del arco, como puede ser la tensión, la corriente, etc. de diferentes maneras.

En la actualidad, los modelos de arco eléctrico que cuentan con mayor difusión en la literatura a nivel internacional [7,9], se pueden agrupar en cuatro grupos. A saber:

- ▷ Ecuaciones que combinan las relaciones halladas por Cassie y Mayr.
- ▷ Ecuaciones del arco con más de dos parámetros.
- ▷ Los parámetros del arco son considerados como funciones.
- ▷ Modelos del arco que son de naturaleza aleatoria.

Un resumen de tales modelos está brindado en la tabla siguiente [11].

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

3.2.- MODELOS BÁSICOS DEL ARCO ELÉCTRICO

Los primeros intentos para modelar la conducta del arco eléctrico durante el proceso de corte de la corriente, fueron realizados por A.M. Cassie a partir de 1930 y por O. Mayr en la década del 40 [7-10].

El primero de ellos consideró al arco eléctrico como un canal de densidad de corriente y temperatura constante, con un fuerte campo eléctrico y con un área transversal que varía directamente con la corriente. En donde la pérdida de energía por convección es proporcional a la energía almacenada por unidad de volumen y la conductancia proporcional a la sección.

El segundo, en cambio, propuso que la transferencia de calor al medio se realiza en toda la periferia por conducción y que la conductancia varía exponencialmente con la energía almacenada, permaneciendo la sección y el tamaño del arco constante.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS BÁSICOS		
	MODELO DE MAYR	MODELO DE CASSIE
Densidad de corriente	Variable con la distancia al centro del arco	Constante
Temperatura	Variable y proporcional a la densidad de corriente	Constante
Sección transversal	Constante	Función de la corriente
Conductancia	Función de la energía almacenada	Proporcional a la sección transversal
Transferencia de calor	Conducción	Convección
Expresión dinámica	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{v \cdot i}{P_0} - 1 \right)$	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{v^2}{U_0^2} - 1 \right)$
Apto para representar	Pequeñas corrientes	Grandes corrientes

Tabla N°3-1: Comparación entre los modelos básicos del arco eléctrico.

CAPÍTULO 3:

Metodología para la Modelización de Interruptores

3.1.- INTRODUCCIÓN

Los objetivos que se persiguen con la modelización de interruptores mediante la correcta comprensión y descripción del fenómeno del arco eléctrico son, desde el punto de vista de la red, los de calcular todas las tensiones y corrientes que se producen como consecuencia de la acción de apertura, y desde la posición del interruptor en sí es determinar si es capaz de abrir exitosamente bajo condiciones extremas de operación, como son las faltas kilométricas o el corte de pequeñas corrientes inductivas, por ejemplo. El ATP tiene varias formas de complejidad creciente para poder representar de mejor manera el funcionamiento del interruptor [1-5]. Dichos modelos son tres [1-6]:

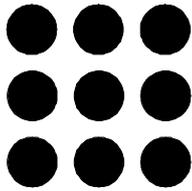
- ▷ El más sencillo considera una acción de apertura ideal es completamente independiente de la red y en el cual no se considera la existencia del arco eléctrico. Aquí el interruptor es modelado como un switch ideal donde la acción de apertura se realiza con el primer paso por cero de la corriente, luego de haberse recibido la orden de apertura, y la acción de cierre se realiza con la primera anulación de tensión luego de recibirse la orden de cierre. Este modelo sólo sirve para determinar la tensión en bornes del interruptor y no sirve si queremos considerar su influencia sobre la red, ni de ésta sobre el arco.
- ▷ Un mejor modelo se logra al considerar a la conductancia del arco como una resistencia o conductancia variable en función del tiempo. Esta variación está determinada de antemano por el conocimiento del tipo de interrupción y de las condiciones iniciales de apertura. Este tipo de modelo es capaz de representar la influencia del arco sobre el sistema pero no sirve en sentido inverso, es decir: no tiene validez para considerar la influencia de la red sobre el arco.
- ▷ Tal vez el mejor y más interesante modelo en la actualidad es aquel que es capaz de representar al interruptor como una resistencia, o una conductancia, dinámicamente variable en función de los valores inmediatamente anteriores de tensión y de corriente del arco. La solución de la ecuación escogida para representar al arco eléctrico, es calculada a cada paso de integración suponiendo que la constante de tiempo y la conductancia del arco, permanecen constantes durante el paso de integración elegido. Por lo dicho, esta modelización del interruptor es “válida” para todos aquellos estudios donde la constante de tiempo del arco es mayor que el paso de integración empleado durante la simulación.

RESUMEN

Este tercer Capítulo presenta una descripción de los modelos más comunes del arco eléctrico junto con un detalle de los modelos aceptados como avanzados continuando con una explicación del proceso de simulación del arco.

También incluye una descripción de los métodos para la determinación de los parámetros de la ecuación del modelo escogido y explica la metodología desarrollada para su obtención a través del desarrollo de un conjunto de programas para la automatización de los cálculos.

Se estudian dos modelos de arco que fueran propuestos por Mayr y por Cassie y como se muestra, existen varias posibilidades para la determinación de los parámetros de cada ecuación, si se tiene en cuenta que aquí se propone una forma de comportamiento distinta a la tradicional; al final se tendrá un conjunto de posibilidades de representación del arco eléctrico que se analizan en el cuerpo de este capítulo.



Universitat Politècnica de Catalunya
Departament d'Enginyeria Elèctrica

CAPITULO 3:

METODOLOGÍA PARA LA MODELIZACIÓN DE INTERRUPTORES