

de los parámetros correctamente, el rango de aplicación es superior al sugerido y hasta se puede lograr una mejor aproximación que con el modelo de Mayr si la elección de parámetros es errónea.

Para finalizar, como en cualquier problema de ingeniería, es finalmente el criterio y la experiencia del usuario el que permite determinar la calidad en la representación de un modelo.

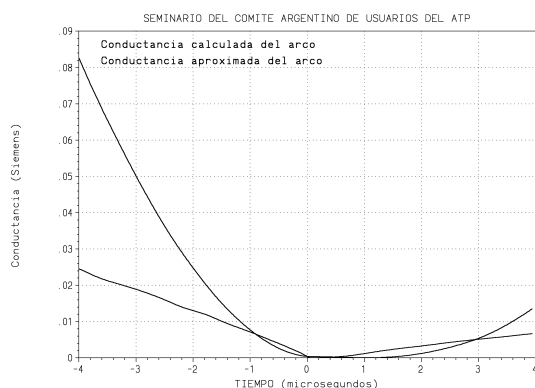
BIBLIOGRAFÍA:

[1] CIGRE, Working Group 13.01: “Practical application of arcs physics in circuit breakers. Survey of calculation methods and applications guide”. *Electra - Cigre*, Nro 118, may 1988, pp 64-79.

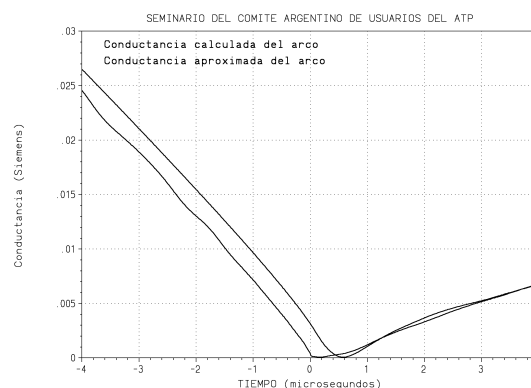
[2] CIGRE, Working Group 13.01: “Applications of black box modelling to circuit breakers”. *Electra - Cigre*, Nro 149, august 1993, pp 40-71.

[3] Carvalho, A; Portela, C; Teixeira, J; Colombo, R: “Disjuntores y chaves. Aplicação em sistemas de potencia”. Ed. EDUFF, 1995.

[4] Habedank, U: “On the mathematical description of arc behaviour in the vicinity of current zero”. *EtzArchiv Elektrotech.* Bd. 10, H 11, 1988, pp 339-343.



(c) Ecuación de Cassie y parámetros constantes.



(d) Ecuación de Cassie y parámetros variables.

Figura N°9: Variación de la conductancia para los casos estudiados.

Resumiendo los valores numéricos obtenidos en base al oscilograma de la Figura N°1, tenemos:

RESUMEN DE LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS			
	PARÁMETRO	CONSTANTE	VARIABLE
ECUACIÓN DE MAYR	Potencia	$P_0 = 121,414 \text{ [kW]}$	$P_0 = 398106 g^{1,44389} \text{ [kW]}$
	Cte. de tiempo	$\Theta = 0,50300 \text{ [μseg]}$	$\Theta = 219,067 g^{1,06929} \text{ [μseg]}$
ECUACIÓN DE CASSIE	Tensión	$U_0 = 5414,27 \text{ [V]}$	$U_0 = 22531,5 g^{0,24354} \text{ [V]}$
	Cte. de tiempo	$\Theta = 0,50300 \text{ [μseg]}$	$\Theta = 219,067 g^{1,06929} \text{ [μseg]}$

Tabla N°1: Resumen de los valores de los parámetros según el camino escogido.

6.- CONCLUSIONES.

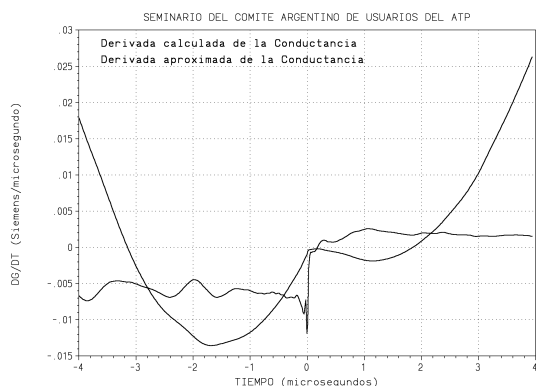
La variedad de modelos de arco eléctrico y la diversidad de métodos para obtener los parámetros para cada uno de ellos, plantea la necesidad de investigar cuál es el modelo más adecuado para el estudio a realizar y como obtener los parámetros de ese caso en particular.

Aquí se ha presentado un breve resumen de las distintas posibilidades que hay que estudiar para el caso de necesitar representar la conducta cambiante del arco eléctrico durante el proceso de corte de corriente. Entre ellas, una elección es la ecuación diferencial para representar al arco ya que ella lleva consigo la cantidad de parámetros a determinar aunque su variación sea independiente de la misma.

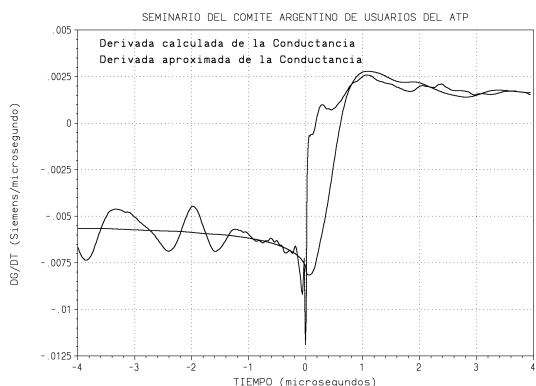
En cuanto al modelo de arco a emplear, la mejor concordancia entre los valores medidos y calculados resulta, en los casos estudiados, para el modelo de Mayr con parámetros variables con la conductancia, si bien no se tienen grandes diferencias en caso de haber escogido el modelo de Cassie pero también con parámetros variables.

Tal vez la gran diferencia resulta de comparar al comportamiento del modelo de Cassie con parámetros variables versus el modelo de Mayr con parámetros constantes, el cual es recomendado para representar la región de pequeñas corrientes según la literatura. De la comparación se puede deducir que la aproximación obtenida con el modelo de Cassie es mejor que con el modelo de Mayr lo que conduce a que, si bien el modelo de Cassie se utiliza para la región de altas corrientes, si se escoge a la variación

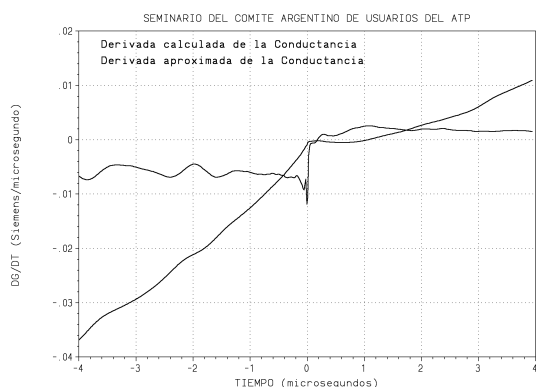
Con lo cual, se llega a cuatro aproximaciones distintas al arco eléctrico según sea la ecuación y el comportamiento de los parámetros. A continuación se muestra el resultado de aplicar las distintas posibilidades al mismo archivo de entrada que escogimos como ejemplo.



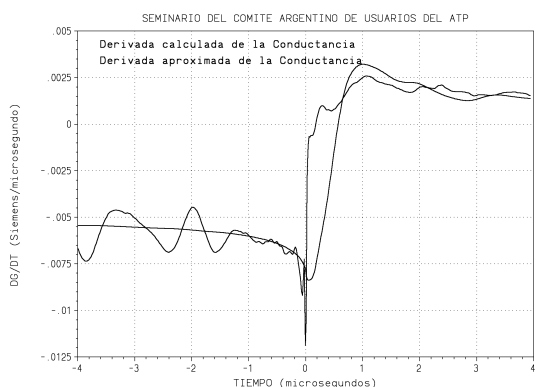
(a) Ecuación de Mayr y parámetros constantes.



(b) Ecuación de Mayr y parámetros variables.

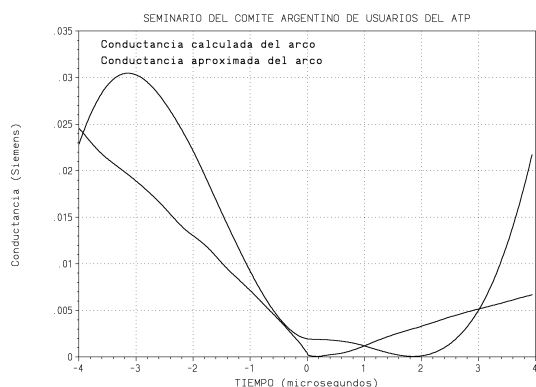


(c) Ecuación de Cassie y parámetros constantes.

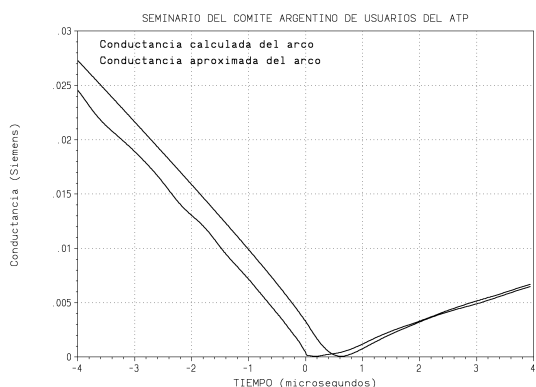


(d) Ecuación de Cassie y parámetros variables.

Figura N°8: Variación de la derivada de la conductancia para los casos estudiados.



(a) Ecuación de Mayr y parámetros constantes.

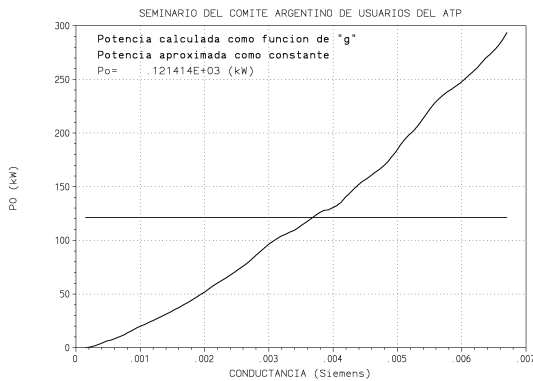


(b) Ecuación de Mayr y parámetros variables.

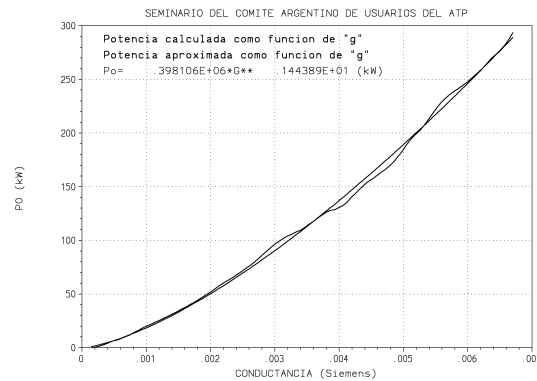
Independientemente de la ecuación diferencial escogida para representar al arco eléctrico, se debe escoger de antemano qué tipo de variación se desea para el comportamiento de los parámetros de esa ecuación durante la simulación: si constantes o variables con la conductancia; y ésta última, a su vez como varía: si lineal, cuadrática, exponencial, potencial, polinómica, etc. A modo de ejemplo, para nuestro caso se ha elegido la forma potencial siguiente:

$$P_o \text{ ó } U_o = C \cdot g^D \quad \text{y} \quad Q = A \cdot g^B$$

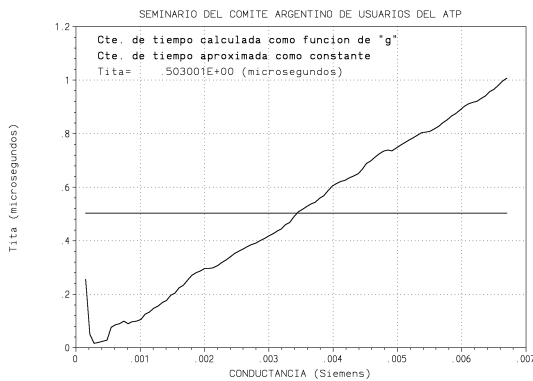
Según se haya escogido la ecuación de Mayr o de Cassie respectivamente y para lo cual debemos determinar los valores de A, B, C y D. En caso de elegir a los parámetros constantes sólo hay que determinar A y C. Las posibilidades se muestran en la Figura N°8.



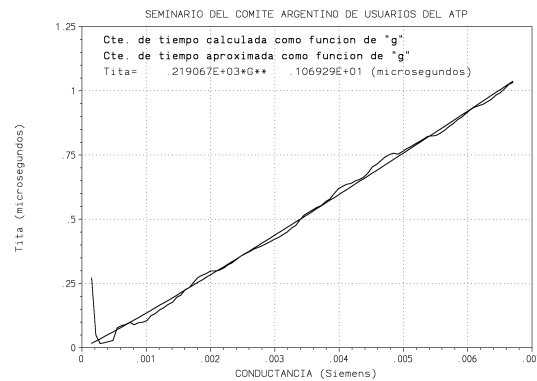
(a) Aproximación de P_0 con parámetros constantes.



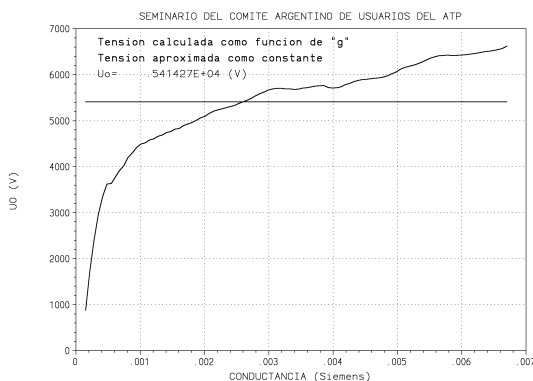
(b) Aproximación de P_0 con parámetros variables.



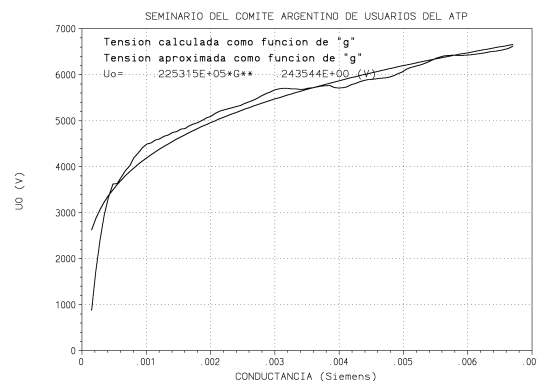
(c) Aproximación de Θ con parámetros constantes.



(d) Aproximación de Θ con parámetros variables.

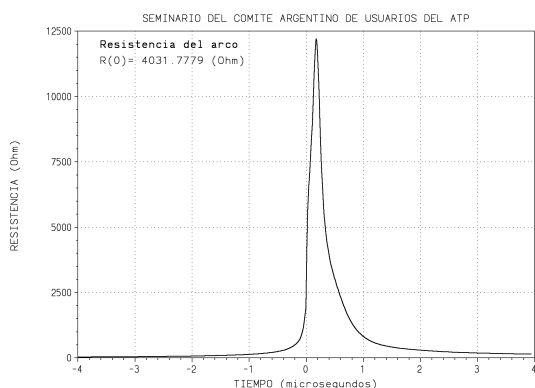


(e) Aproximación de U_0 con parámetros constantes.

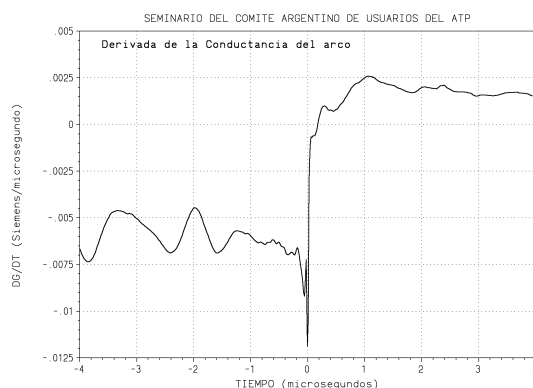


(f) Aproximación de U_0 con parámetros variables.

Figura N°7: Aproximación de parámetros como constantes o variables.



(g) Resistencia del arco.



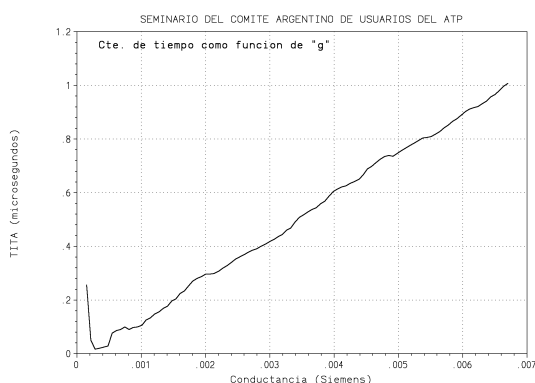
(h) Variación de la derivada de la conductancia.

Figura N°5: Posibilidades de graficación de todos los programas.

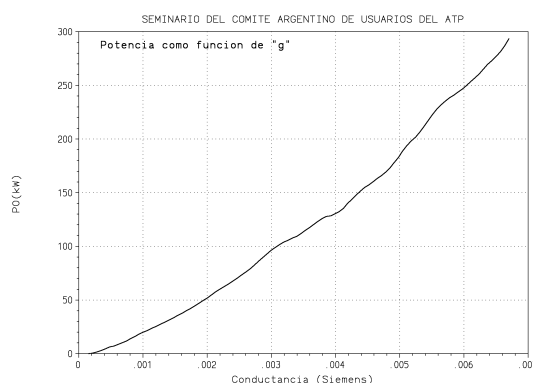
Si se escoge representar al arco con la ecuación de Mayr:

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

hay que determinar Q y P_0 a partir de los valores calculados que se muestran a continuación.



(a) Tita en función de la conductancia.



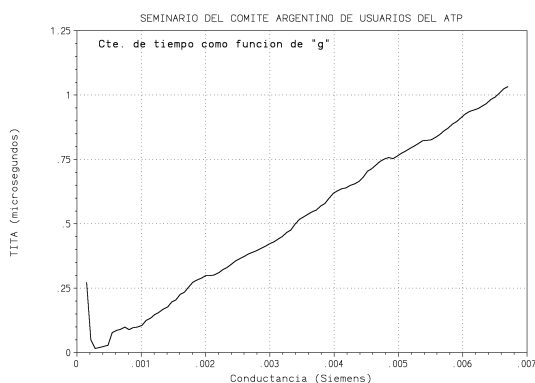
(b) P_0 en función de la conductancia.

Figura N°6: Variación de los parámetros según la ecuación de Mayr.

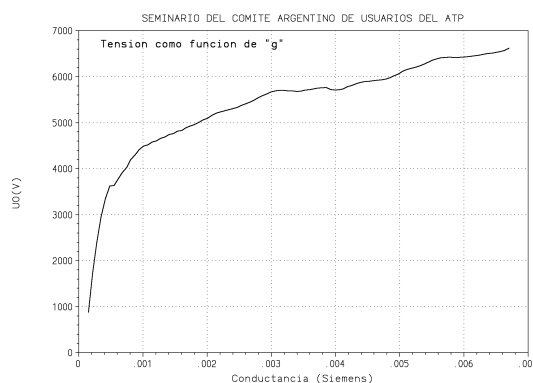
Pero si se escoge representar al arco con la ecuación de Cassie:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{u^2}{V_0^2} - 1 \right)$$

hay que hay de determinar U_0 y Q de la siguiente figura:



(a) Tita en función de la conductancia.



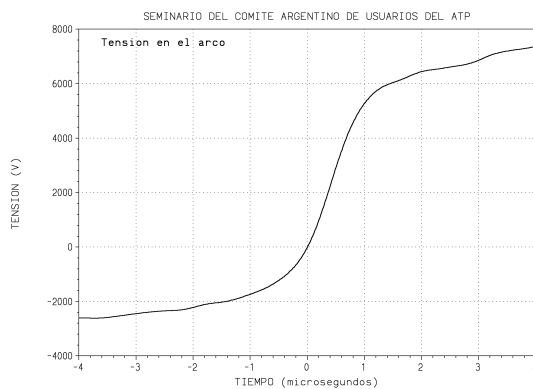
(b) U_0 en función de la conductancia.

Figura N°7: Variación de los parámetros según la ecuación de Cassie.

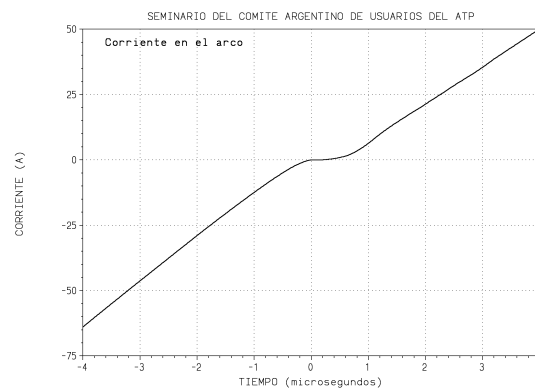
Aunque existe otra manera de mejorar la calidad del resultado del proceso que es utilizando algún software de aproximación de curvas luego de la digitalización del oscilograma y antes de la aplicación del programa de cálculo, para reemplazar dicho oscilograma por alguna función matemática que relaciona las variables entre sí. La principal ventaja de esta variación es la limpieza total de las curvas digitalizadas.

5.- EJEMPLO.

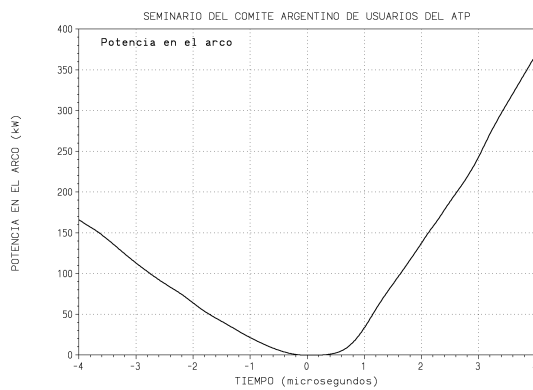
La digitalización y limpieza del oscilograma mostrado en la Figura N° 1 y la posterior utilización del software desarrollado da como resultado las gráficas que ahora se presentan, desde donde se pueden extraer el valor de los coeficientes de la ecuación elegida.



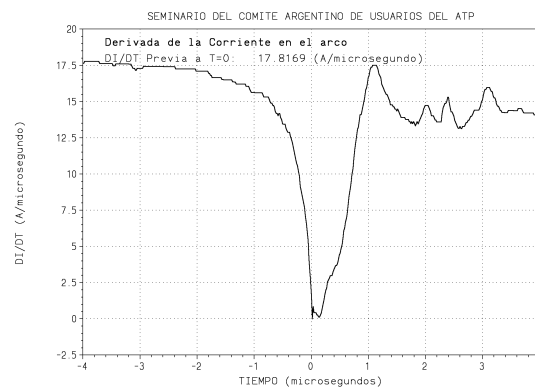
(a) Paso por cero de la tensión.



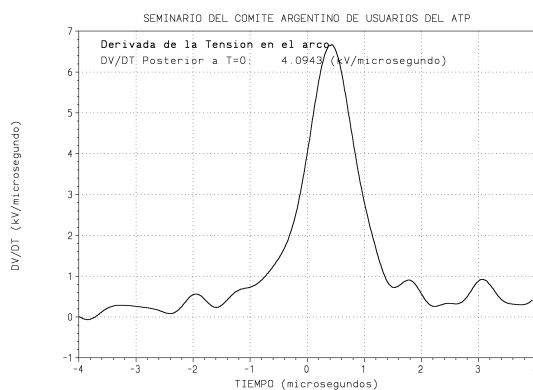
(b) Paso por cero de la corriente.



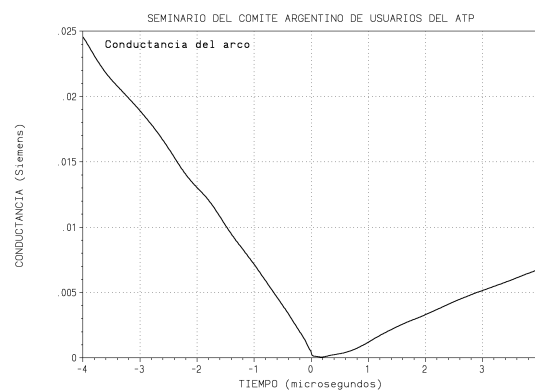
(c) Potencia en el arco.



(d) Variación de la derivada de la corriente.



(e) Variación de la derivada de la tensión.



(f) Conductancia del arco.

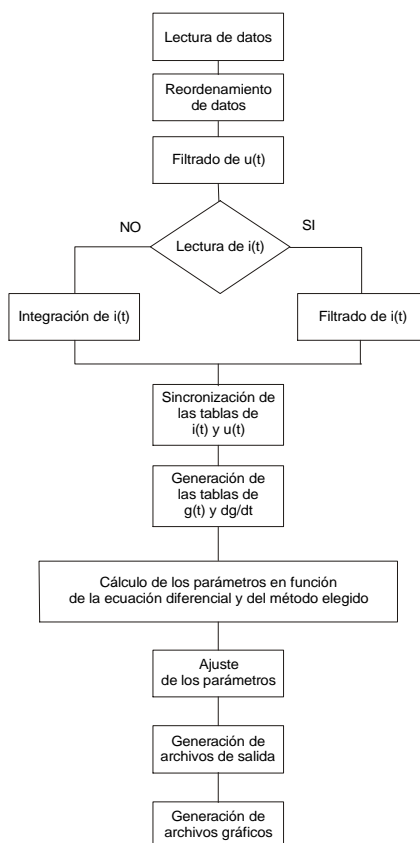


Figura N°3: Diagrama de flujo general de los programa de cálculo.

Para utilizar el programa anterior es necesario confeccionar un archivo de entrada a partir de las tablas de tiempo-tensiones y tiempo-corrientes como el que se presenta a continuación, donde se expresa la cantidad de puntos que tienen las tablas interiores, coeficientes de multiplicación de las variables leídas, grado de filtrado, tipo de parámetros y todas las opciones de graficación.

```

TITULO
SEMINARIO COMITE ARGENTINO DE USUARIOS DEL EMT/ATP
PUNTOS    AMV      AMI1     AMI2     ANF      ITIPO    AKF
1024      1.0        1.0      1.0      32.0     1.0      1.0
PLOTV     PLOTI     PLOTP    PLOTDI/DT PLOTDV/DT PLOTG    PLOTR    PLOTDG/DT
          1          1        1          1          1          1          1          1
PLOTPO    PLOTÉ     PLOTPOF  PLOTÉF   PLOTPO(T) PLOTÉ(T) PLDG/DT(T) PLOTG(T)
          1          1        1          1          1          1          1          1
TENSION
-3.989514 -1539.333
-3.983322 -1539.442
-3.977159 -1562.988
-3.970968 -1563.097
.....
 3.9866    4226.712
 3.992792 4226.603
 3.998984 4226.493
 4.005176 4226.385
FIN
CORRIENTES
-3.991176 -71.84159
-3.984941 -71.48752
-3.978754 -71.4882
-3.972543 -71.31151
.....
 4.002593 65.45399
 4.00878  65.45331
 4.014968 65.45263
 4.021131 65.27457
FIN
  
```

Figura N°4: Ejemplo de un archivo de entrada.

corresponde al papel de fondo utilizado) al negro/color (si es que el oscilograma está en blanco y negro, sino al interpretar el color como escala de grises también respeta el cambio de color).

- ▷ También puede seguir el segundo cambio de color, es decir el paso del negro/color al blanco que se interpreta como siguiendo el borde de abajo de la curva.
- ▷ Otra de las posibilidades es seguir a la curva por dentro de la misma. En este caso, el valor otorgado a la ordenada es un promedio de los valores asignados a los límites inferior y superior de la curva para ese valor sobre el eje de abscisas.

Evidentemente, hay que escoger muy bien el sentido de lectura ya que puede inducir errores notables en la digitalización de una curva. A modo de ejemplo y para poder determinar cual era la mejor opción se procedió a la digitalización del oscilograma de la figura N°1 según todas las opciones posibles y se compararon entre sí los resultados obtenidos de manera de poder analizar su desviación respecto al valor real calculado como promedio de los valores antes hallados; cuyo resultado se muestra en la Figura N°2.

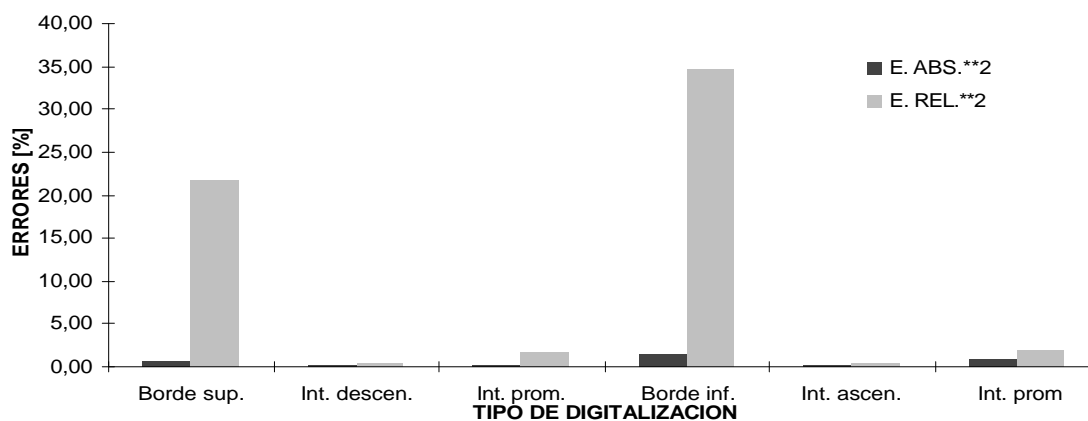


Figura N°2: Errores porcentuales según el sentido de digitalización.

Por lo tanto, según la figura anterior el mejor sentido de digitalización es el interior ya sea descendente o ascendente y el peor es siguiendo los bordes externos de la curva.

4.- PROGRAMAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL ARCO.

Para agilizar el cálculo de los parámetros se han elaborado en lenguaje Fortran seis programas que combinan las distintas posibilidades que figuran en la literatura consultada. Un diagrama de flujo general se presenta en la página siguiente que permite seleccionar el tipo de dato que se le ingresa, tensión y corriente o su derivada y a partir de ellos genera tablas internas de conductancia a las cuales se le aplican los métodos de cálculo en función de la naturaleza de los parámetros de la ecuación diferencial escogida para representar el arco.

Todos los programas poseen opciones de graficación donde se encuentran: $u(t)$, $i(t)$, $P_0(t)$, $di(t)$, $du(t)$, $g(t)$, $R(t)$, $dg/dt(t)$ leída, $P_0(g)$, $Q(g)$, $P_0(t)$, $Q(t)$, $dg/dt(t)$ y $g(t)$ ambas calculadas y también los valores de las aproximaciones realizadas junto con algunos puntos característicos como son la di/dt , dv/dt y R en tiempo cero. Además poseen la opción de suavizar las imperfecciones que pudieran estar presentes en la lectura de las curvas mediante un “coeficiente de suavizado” variable entre 0 y 100 que se puede interpretar gráficamente como un estiramiento de la curva de los datos y factores de multiplicación para ser utilizados cuando los datos se encuentren dados en diferentes escalas.

- ▷ Simulaciones numéricas: Una vez que se han determinado con precisión los parámetros del arco y si se tienen los valores del circuito eléctrico asociado al ensayo o a la prueba de campo que se ha registrado, se puede reproducir mediante la utilización de programas específicos de simulación de eventos transitorios toda la duración del proceso donde se produjo la presencia del arco eléctrico y con ello se puede llegar a estudiar el comportamiento de este arco eléctrico bajo otras condiciones de operación de la red.

La aplicación de la fórmula de Mayr [4] lleva consigo la necesidad de la determinación de Q y P_0 a partir de la tensión del arco eléctrico que se obtiene durante el ensayo del interruptor por medición directa, mientras que la corriente se calcula a partir de su derivada que es la que en realidad se registra en un oscilograma como el que se muestra, para el ensayo de un interruptor de hexafluoruro de azufre de 145 [kV] de tensión nominal y del tipo doble pistón o doble presión.

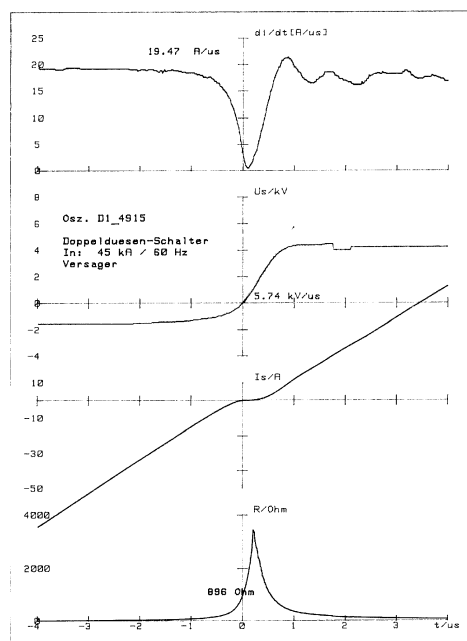


Figura N°1: Detalle de un oscilograma del ensayo de un interruptor de SF6.

3.- “LIMPIEZA” Y DIGITALIZACIÓN DEL OSCILOGRAMA.

El primer paso en la obtención de los parámetros del arco es la lectura de los oscilogramas con un scanner de buena calidad, luego para mejorar la definición de la curva dentro de la imagen leída, se limpia y despeja de todos aquellos posibles puntos de “suciedad” (manchas en el papel) o de presencia necesaria (ejes coordenados, escalas, por ejemplo) de manera que al final del proceso sólo se tenga la curva a digitalizar junto con aquellas marcas que definan los valores numéricos [3] como son la intersección de los ejes coordenados y marcas de escala de valores sobre los ejes o puntos extremos. Para finalizar, se transforma el archivo original al formato necesario para el programa digitalizador; procediéndose a digitalizar el oscilograma

Dependiendo del programa de digitalización utilizado, éste puede tener diversas alternativas para escoger en lo que respecta a la forma de lectura de la imagen, que se realiza de izquierda a derecha:

- ▷ Siguiendo el primer cambio de color en los pixels de la imagen en sentido descendente, lo que en la práctica se puede interpretar como que sigue el borde superior de la curva ya que en dicho punto el color cambia del blanco (que

Uno de los primeros intentos para modelar la conducta del arco eléctrico durante el proceso de corte de la corriente fue realizado O. Mayr a partir de 1930, que propuso que la transferencia de calor al medio se realiza en toda la periferia del canal de plasma por conducción y que la conductancia del arco varía exponencialmente con la energía almacenada, permaneciendo la sección y el tamaño del arco constante [1] relacionando los principales componentes eléctricos con la ecuación diferencial que lleva su nombre:

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

siendo: g la conductancia, Θ la constante de tiempo, P_0 la potencia refrigerante y v e i la tensión y la corriente del arco eléctrico respectivamente.

En el mismo año, A.M. Cassie propuso 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, donde la pérdida de energía por convección es proporcional a la energía almacenada por unidad de volumen y la conductancia proporcional a la sección, relacionando todas estas variables según la ecuación diferencial:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{v^2}{V_0^2} - 1 \right)$$

siendo: g la conductancia, Θ la constante de tiempo, v la tensión “dinámica” y V_0 la tensión estática.

En las ecuaciones anteriores se puede observar que ambos modelos matemáticos están descritos por dos parámetros:

- ▷ Θ y P_0 para el modelo de Mayr
- ▷ Θ y V_0 para el modelo de Cassie

2.- METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS DEL ARCO.

La técnica de modelización del arco eléctrico se basa en el empleo de oscilogramas de corriente y de tensión registrados durante el ensayo de apertura de interruptores, para relacionarlas con una ecuación diferencial previamente escogida [1,2,3], para deducir un modelo matemático capaz de reproducir el arco en este experimento en particular e implica los siguientes pasos:

- ▷ 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 y 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.
- ▷ 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 de la representación del arco mediante una fórmula es práctica común introducir un número variable 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 en el camino a la hora de determinar su valor mediante técnicas diversas de aproximación de curvas.

METODOLOGÍA PARA LA MODELIZACIÓN DEL ARCO ELÉCTRICO A PARTIR DE OSCILOGRAMAS DE ENSAYOS.

Ing. Walter Giménez

Ing. Orlando Hevia.

Grupo de Investigación de Sistemas Eléctricos de Potencia - GISEP,
Universidad Tecnológica Nacional, Fac. Reg. Santa Fe.
Lavaisse 610. (3000) Santa Fe, Argentina.
Tf: (54) 42 - 601579. Fax: (54) 42 - 690348
E-mail: wgimenez@frsf.utn.edu.ar ó ohevia@ieee.org

RESUMEN:

El trabajo presenta la descripción de la metodología empleada por el GISEP para la obtención de los parámetros del arco eléctrico a partir de oscilogramas de tensión y de di/dt obtenidos de un ensayo real. Se tiene especial cuidado en detallar todos los pasos seguidos desde la digitalización de los oscilogramas hasta el ajuste final de parámetros ejemplificado con un caso práctico.

Se muestra un software de desarrollo propio que permite la obtención de los parámetros del arco eléctrico siguiendo distintos procedimientos de variación de los mismos: constantes o variables con la conductancia, los cuales están comparados a fin de señalar diferencias y coincidencias entre sí.

Palabras clave: Arco eléctrico, Simulación, EMTP, ATP, Transitorios Electromagnéticos, Mayr, Cassie, SF6.

1.- INTRODUCCIÓN.

La creciente demanda de energía junto con la necesidad de abarcar nuevas áreas de potenciales usuarios justifica técnica y económicamente la constante ampliación de la capacidad del servicio eléctrico en sus tres componentes básicos: generación, transmisión y distribución. Independientemente del nivel de tensión que se hable o de la característica de la línea o aparato que se trate de vincular al sistema, existe un común denominador en todas estas interconexiones que se llama "Interruptor" capaz de transmitir o de cortar el suministro de energía. Dentro del interruptor, el principal elemento de corte de la corriente es el arco eléctrico que, independientemente de la acción de apertura o cierre, siempre aparece dentro de la cámara de interrupción entre los contactos que se están alejando o juntando según sea la acción.

Por otra parte, las relativamente nuevas tecnologías de análisis se basan principalmente en la simulación de componentes reales en computadoras personales por medio de programas específicos según la aplicación que se trate, como lo es el Alternative Transients Program para analizar sistemas de energía eléctrica, utilizando "modelos matemáticos" capaces de reproducir de la mejor manera posible el componente natural que se halla bajo análisis. Evidentemente existe un largo recorrido entre el comportamiento real y el simulado, que se acerca mejor al anterior con modelos matemáticos más complejos y elaborados que en su mayoría son diseñados para representar una característica o un efecto particular de todo el conjunto.