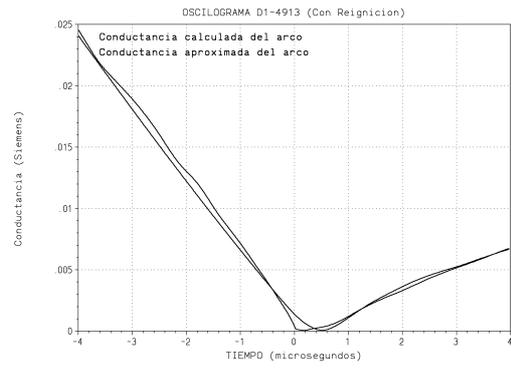


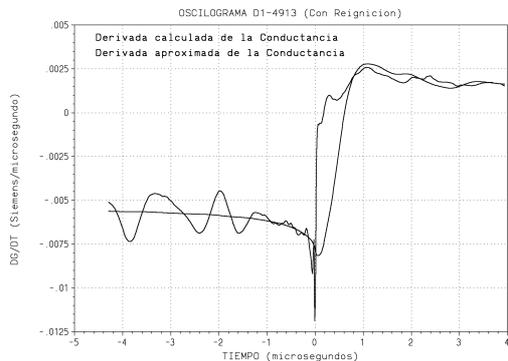
(c) Modelo de Cassie y método de Amsinck



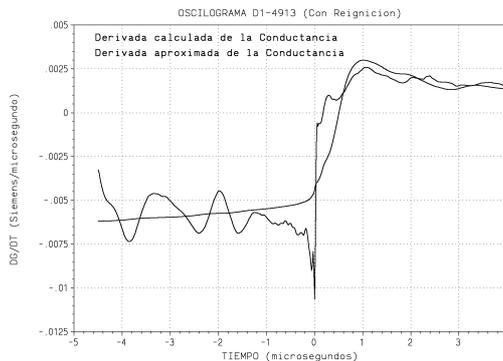
(d) Modelo de Cassie y Método Asturiano

Figura N°I-38: Aproximación para la conductancia.

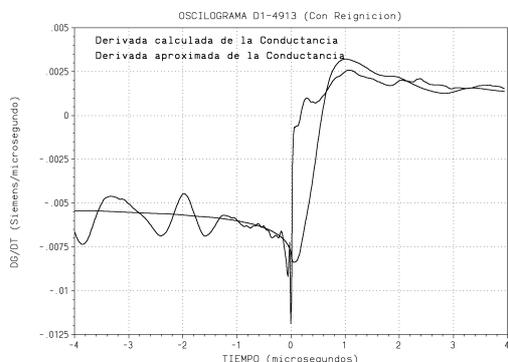
I-5.2.5.- Derivada de la conductancia calculada y aproximada como función de la conductancia.



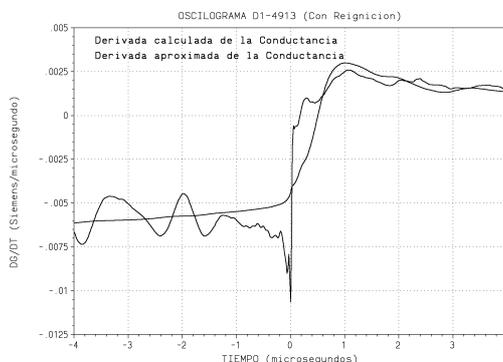
(a) Modelo de Mayr y método de Amsinck



(b) Modelo de Mayr y Método Asturiano



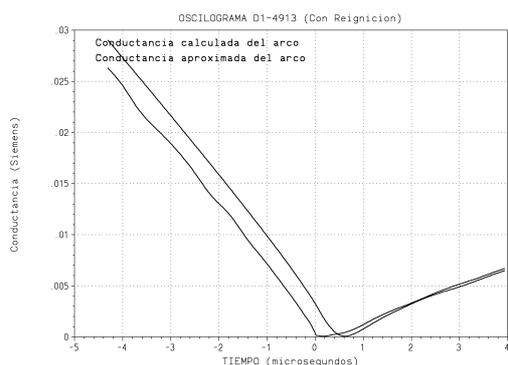
(c) Modelo de Cassie y método de Amsinck



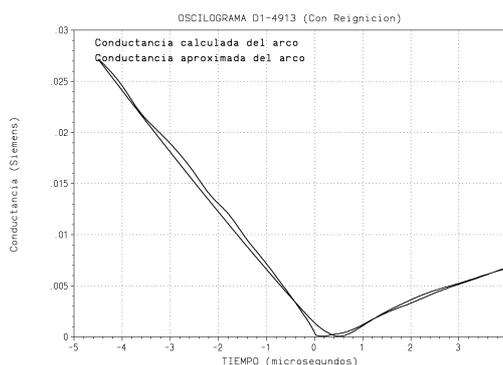
(d) Modelo de Cassie y Método Asturiano

Figura N°I-37: Aproximación para la derivada de la conductancia.

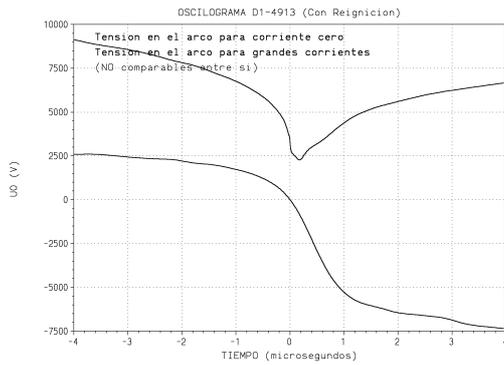
I-5.2.6.- Conductancias calculada y aproximada como función de la conductancia.



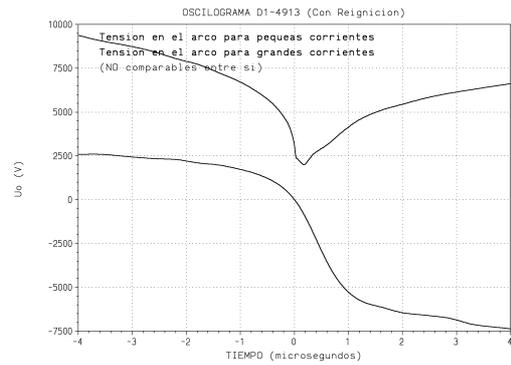
(a) Modelo de Mayr y método de Amsinck



(b) Modelo de Mayr y Método Asturiano



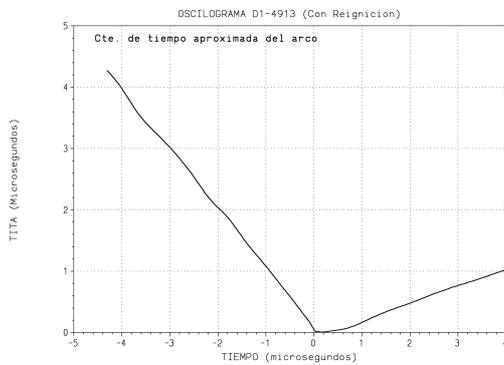
(c) Modelo de Cassie y método de Amsinck



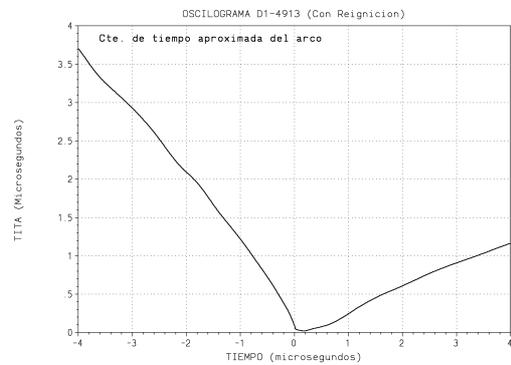
(d) Modelo de Cassie y Método Asturiano

Figura N°I-35: Aproximación para la potencia.

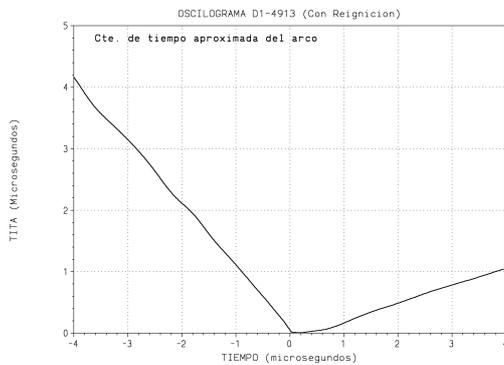
I-5.2.4.- Constante de tiempo como función del tiempo.



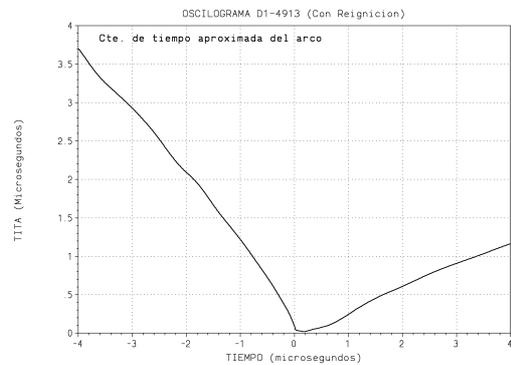
(a) Modelo de Mayr y método de Amsinck



(b) Modelo de Mayr y Método Asturiano



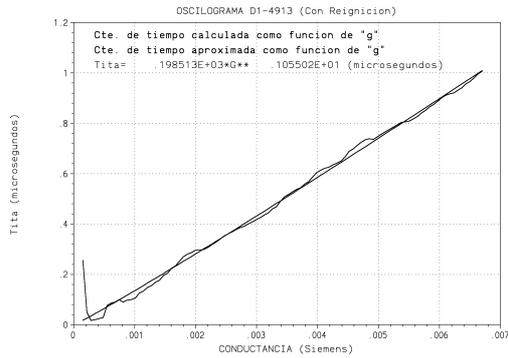
(c) Modelo de Cassie y método de Amsinck



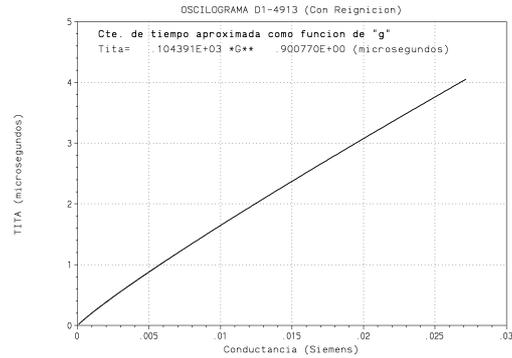
(d) Modelo de Cassie y Método Asturiano

Figura N°I-36: Aproximación para la constante de tiempo.

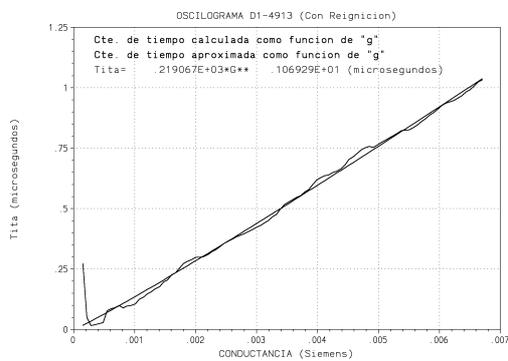
I-5.2.2.- Constante de tiempo calculada y aproximada como función de la conductancia.



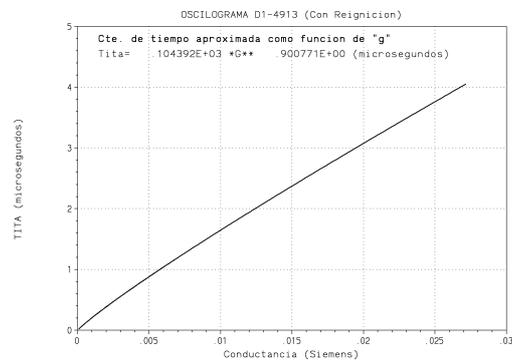
(a) Modelo de Mayr y método de Amsinck



(b) Modelo de Mayr y Método Asturiano



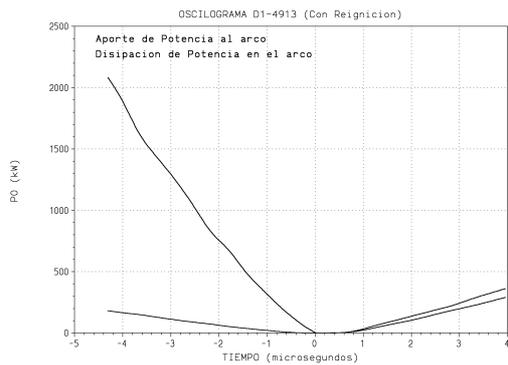
(c) Modelo de Cassie y método de Amsinck



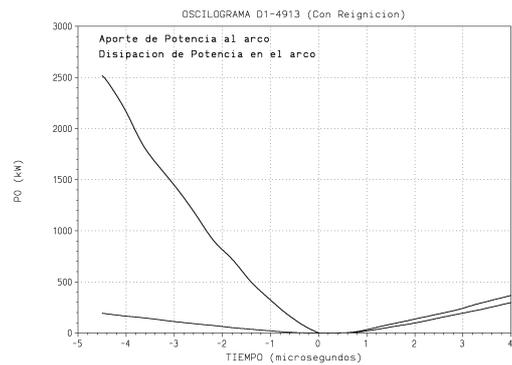
(d) Modelo de Cassie y Método Asturiano

Figura N°I-34: Aproximación para la constante de tiempo.

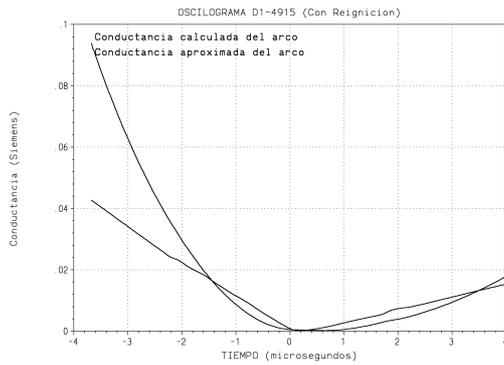
I-5.2.3.- Potencia calculada y aproximada como función del tiempo.



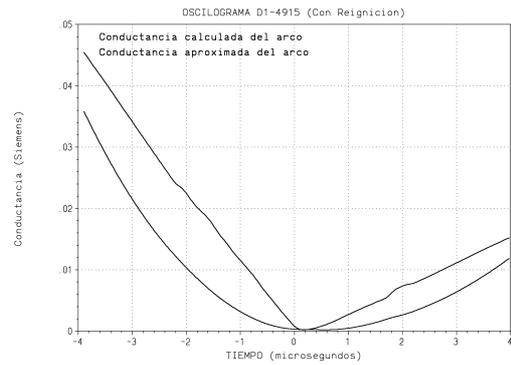
(a) Modelo de Mayr y método de Amsinck



(b) Modelo de Mayr y Método Asturiano



(c) Modelo de Cassie y método de Amsinck

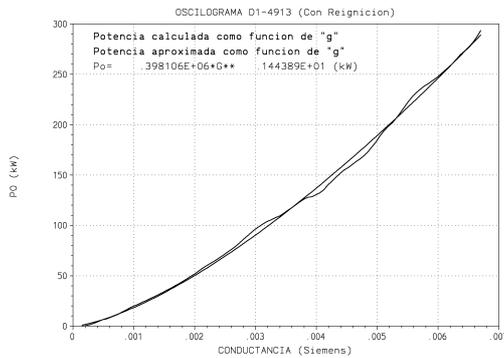


(d) Modelo de Cassie y Método Asturiano

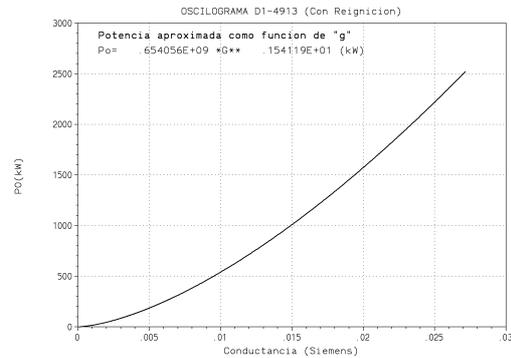
Figura N°I-32: Aproximación para la conductancia.

## I-5.2.- PARÁMETROS VARIABLES

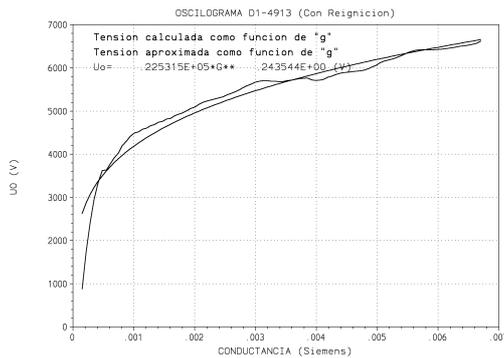
### I-5.2.1.- Potencia calculada y aproximada como función de la conductancia



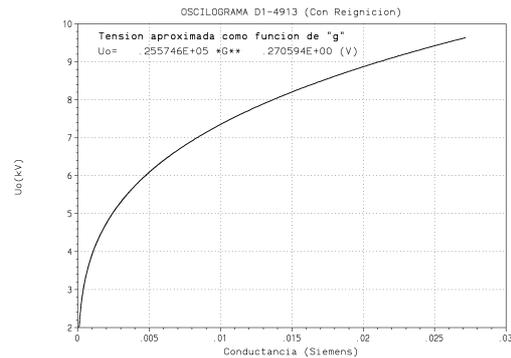
(a) Modelo de Mayr y método de Amsinck



(b) Modelo de Mayr y Método Asturiano



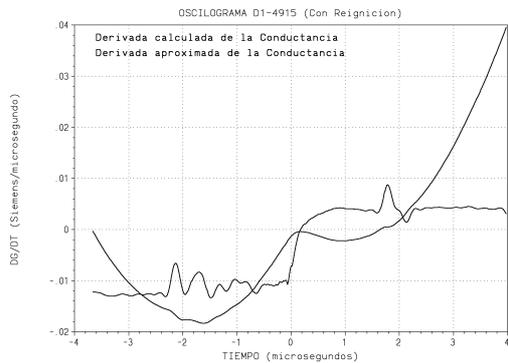
(c) Modelo de Cassie y método de Amsinck



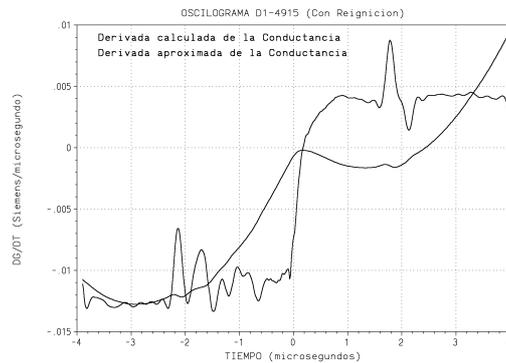
(d) Modelo de Cassie y Método Asturiano

Figura N°I-33: Aproximación para la potencia.

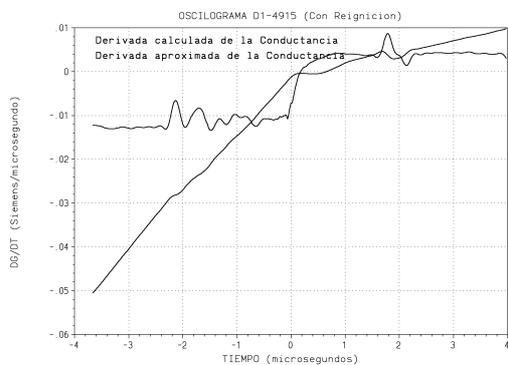
I-5.1.5.- Derivada de la conductancia calculada y aproximada como función de la conductancia.



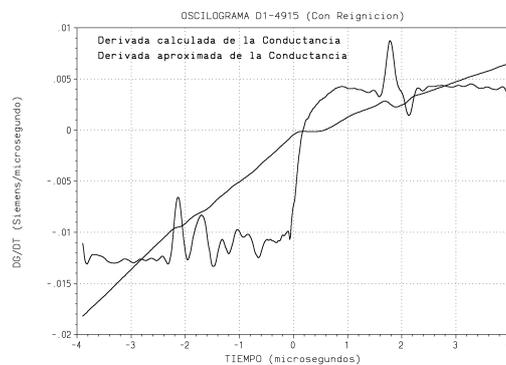
(a) Modelo de Mayr y método de Amsinck



(b) Modelo de Mayr y Método Asturiano



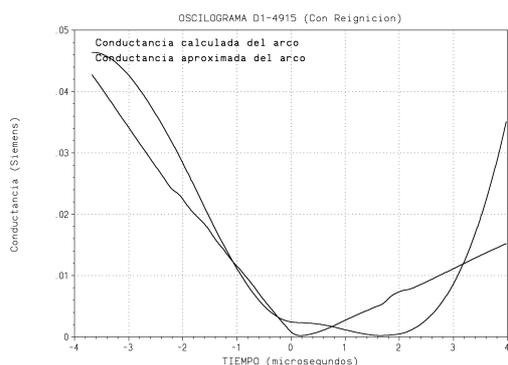
(c) Modelo de Cassie y método de Amsinck



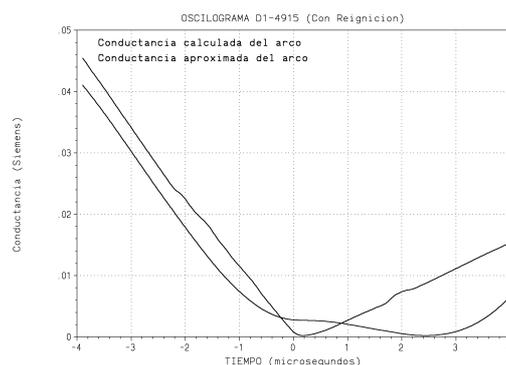
(d) Modelo de Cassie y Método Asturiano

Figura N°I-31: Aproximación para la derivada de la conductancia.

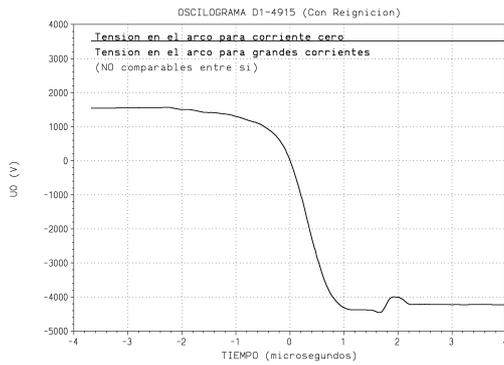
I-5.1.6.- Conductancia calculada y aproximada como función de la conductancia.



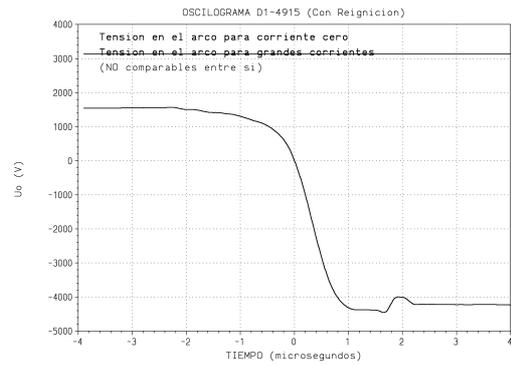
(a) Modelo de Mayr y método de Amsinck



(b) Modelo de Mayr y Método Asturiano



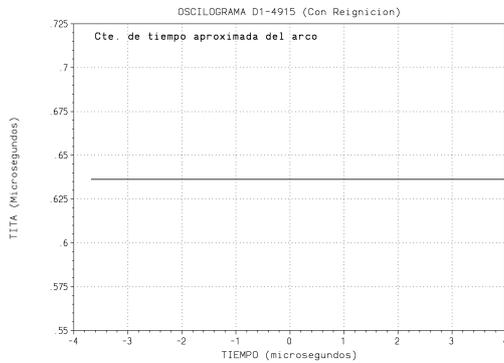
(c) Modelo de Cassie y método de Amsinck



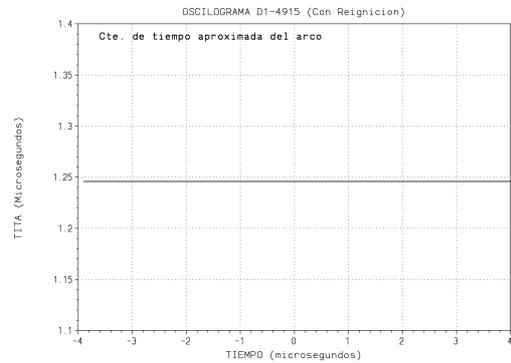
(d) Modelo de Cassie y Método Asturiano

Figura N°I-29: Aproximación para la potencia.

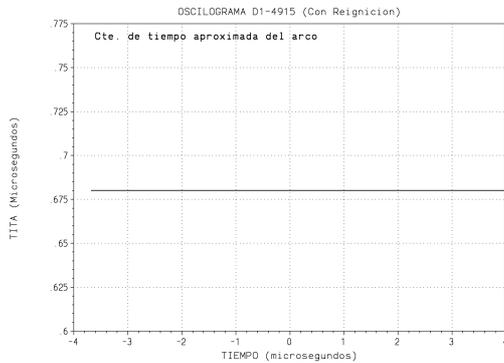
I-5.1.4.- Constante de tiempo como función del tiempo.



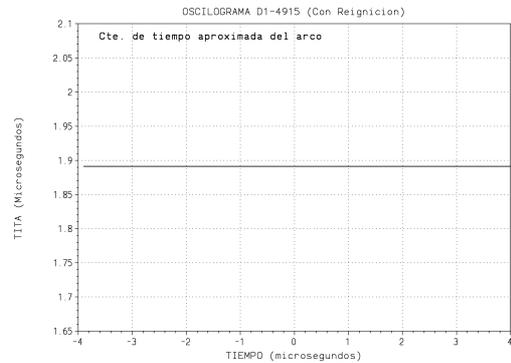
(a) Modelo de Mayr y método de Amsinck



(b) Modelo de Mayr y Método Asturiano



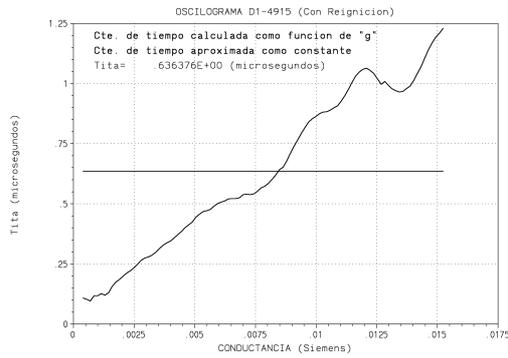
(c) Modelo de Cassie y método de Amsinck



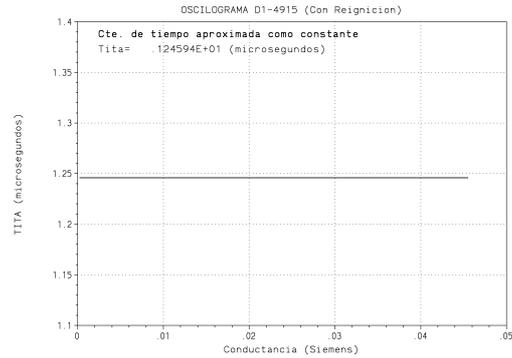
(d) Modelo de Cassie y Método Asturiano

Figura N°I-30: Aproximación para la constante de tiempo.

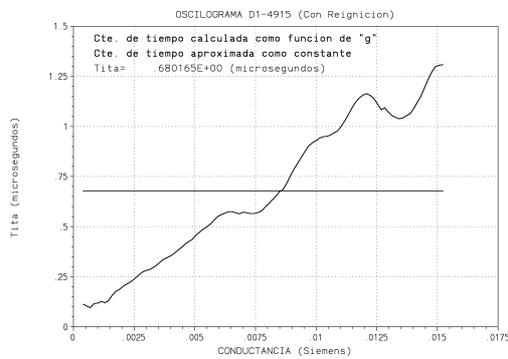
I-5.1.2.- Constante de tiempo calculada y aproximada como función de la conductancia.



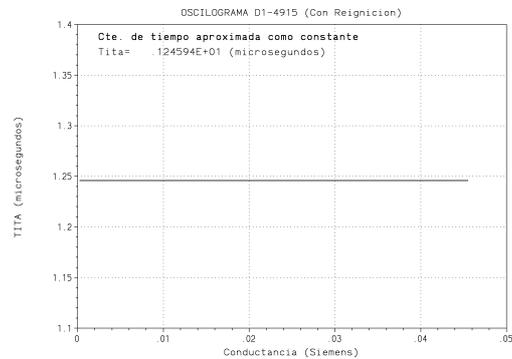
(a) Modelo de Mayr y método de Amsinck



(b) Modelo de Mayr y Método Asturiano



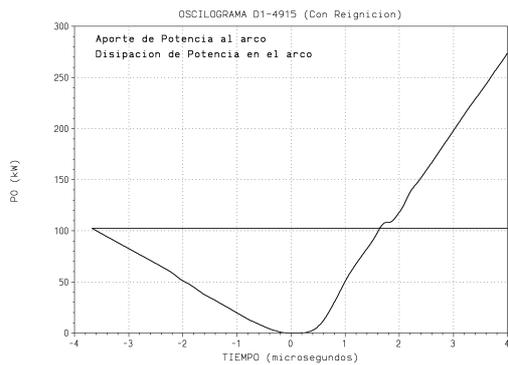
(c) Modelo de Cassie y método de Amsinck



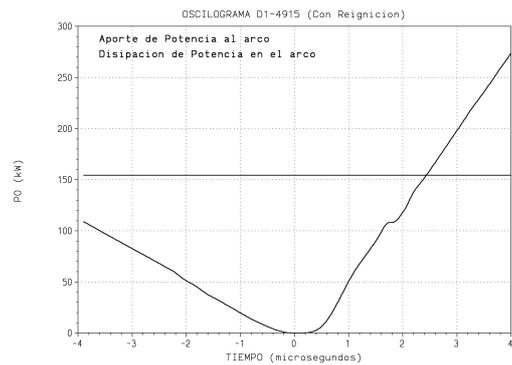
(d) Modelo de Cassie y Método Asturiano

Figura N°I-28: Aproximación para la constante de tiempo.

I-5.1.3.- Potencia calculada y aproximada como función del tiempo.



(a) Modelo de Mayr y método de Amsinck



(b) Modelo de Mayr y Método Asturiano

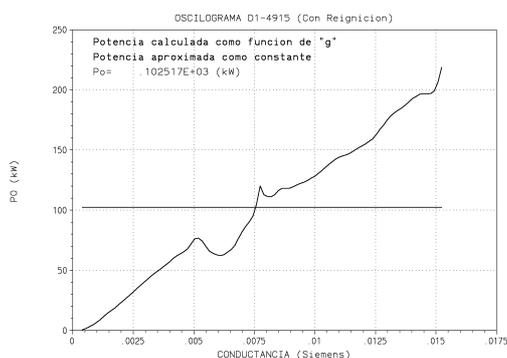
puntos el resultado no varía considerablemente. Por su parte, la variación del coeficiente “ $B_p$ ” es marcada para poca cantidad de puntos, observándose que a partir de los 100 puntos su tendencia se mantiene asintótica sin mayores variaciones. Los coeficientes de la función de la constante de tiempo arrojan resultados parecidos, ya que se comportan de manera similar entre sí permaneciendo prácticamente constantes para una cantidad de puntos superior a 100.

## I-5.- COMPARACIÓN GRÁFICA Y NUMÉRICA ENTRE LOS RESULTADOS DE LOS PROGRAMAS PARA EL MISMO OSCILOGRAMA

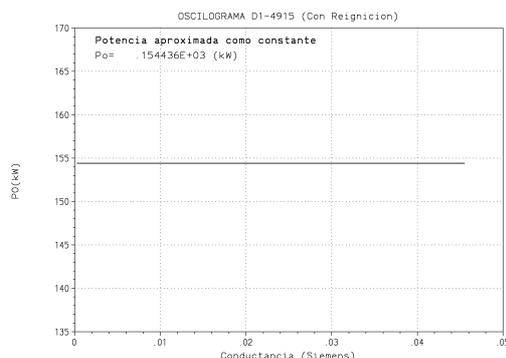
A continuación se presenta los resultados gráficos y en ellos los numéricos, de la ejecución de los programas “MAYRAMS”, “CASSAMS”, “MAYRAST” y “CASSAST” para el mismo archivo de entrada de datos que corresponde al oscilograma D1-4915. En ellos se podrán observar las distintas aproximaciones que se logran utilizando el modelo de Mayr o el de Cassie, o usando parámetros constantes o variables con la conductancia.

### I-5.1.- PARÁMETROS CONSTANTES

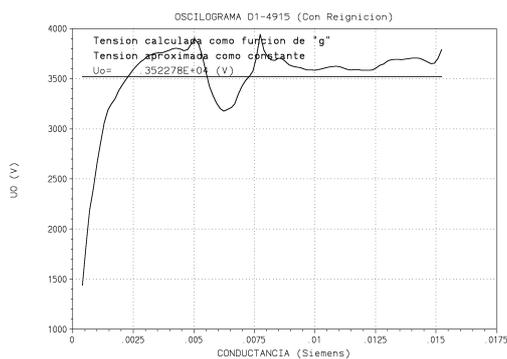
#### I-5.1.1.- Potencia y tensión calculada y aproximada como funciones de la conductancia



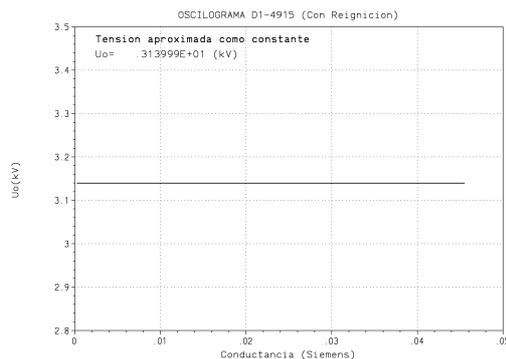
(a) Modelo de Mayr y método de Amsinck



(b) Modelo de Mayr y Método Asturiano



(c) Modelo de Cassie y método de Amsinck



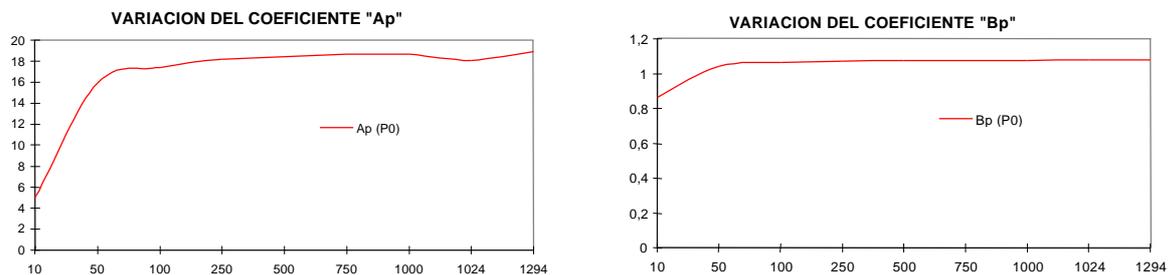
(d) Modelo de Cassie y Método Asturiano

Figura N°I-27: Aproximación para la potencia y la tensión.

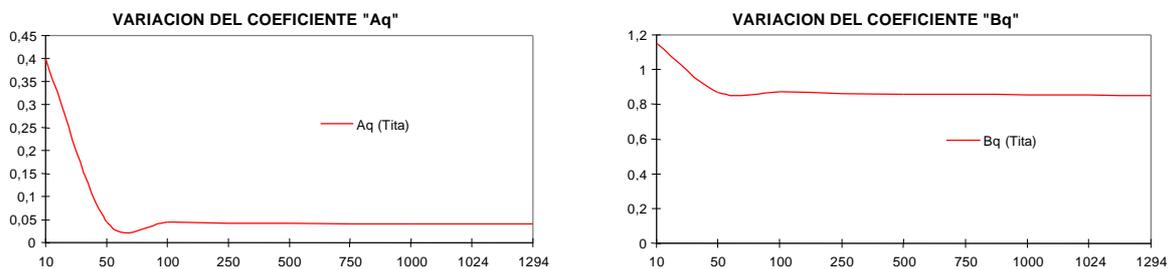
VARIACIÓN DE LOS VALORES DE LOS COEFICIENTES				
	POTENCIA		CTE. DE TIEMPO	
Cant. de puntos	Coef. $A_p$	Coef. $B_p$	Coef. $A_q$	Coef. $B_q$
10	4,96737	0,86107	0,400395	1,1515
50	15,9168	1,04322	0,0449861	0,868789
100	17,3918	1,06181	0,0445633	0,871343
250	18,1765	1,07094	0,0425583	0,862084
500	18,4274	1,07346	0,0417862	0,858987
750	18,6462	1,0763	0,0415924	0,857319
1000	18,662	1,07619	0,0406444	0,853411
1024	18,0826	1,07818	0,04063315	0,85330062
1294	18,8963	1,079	0,0402145	0,850641

Tabla N°I-6: Variación de los valores de los coeficientes de la función potencial en función de la cantidad de valores de las tablas internas de los programas.

En forma de gráficos la tabla anterior se presenta a continuación.



(a) Variación de los coeficientes de la función de la Potencia.



(b) Variación de los coeficientes de la función de la constante de tiempo.

Figura N°I-26: Determinación de la cantidad mínima de puntos de las tablas internas.

Del análisis de la figura anterior se puede determinar que el coeficiente " $A_p$ " de la potencia tiende rápidamente a un valor próximo a 18 teniendo una leve oscilación para una cantidad de puntos igual de 1024. Dicha oscilación no supera el 3% aproximadamente del valor al que tiende asintóticamente la variable, por lo cual se puede decir que a partir de 250

PARÁMETROS CONSTANTES		
SUAVIZADO	POTENCIA	CTE. DE TIEMPO
Igual a 10	$P_0 = 120,197$ [kW]	$\Theta = 0,509586$ [ $\mu$ s]
Igual a 30	$P_0 = 121,468$ [kW]	$\Theta = 0,502859$ [ $\mu$ s]
Igual a 50	$P_0 = 120,382$ [kW]	$\Theta = 0,507511$ [ $\mu$ s]
Igual a 90	$P_0 = 117,314$ [kW]	$\Theta = 0,510841$ [ $\mu$ s]

Tabla N°I-5: Influencia del coeficiente de suavizado en los valores de los parámetros considerados como constantes.

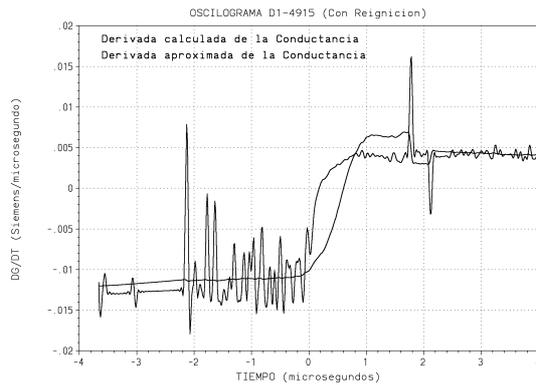
La influencia del coeficiente de suavizado sobre el valor final que toma cada parámetro, analizadas todas las posibilidades desde el valor 01 hasta el 99 con incremento de cinco en cinco, no se puede determinar certeramente ya que el comportamiento de cada uno de ellos difiere del resto y no se puede hablar de una tendencia que los unifique hacia un grupo de valores. Este comportamiento aleatorio se acentúa cuando analizamos la variación de los parámetros de la función potencial que representa a la potencia o a la constante de tiempo en la ecuación de Mayr aunque todo lo anterior también se puede demostrar para el modelo de Cassie.

En el caso ideal de tener un coeficiente de suavizado igual a infinito se está en presencia de una condición límite ya que sólo se tendría dos puntos en los extremos de la recta que se quiere aproximar con una función potencial, con lo cual ésta última se transformaría en una recta. Evidentemente esta condición es totalmente desfavorable para el cálculo ya que no representaría las variaciones de las curvas que se han registrado durante las mediciones; por el contrario con un coeficiente igual a cero se anularía el filtrado y se tendrían todas las “suciedades” e “imperfecciones” de la medición y esta situación tampoco es correcta.

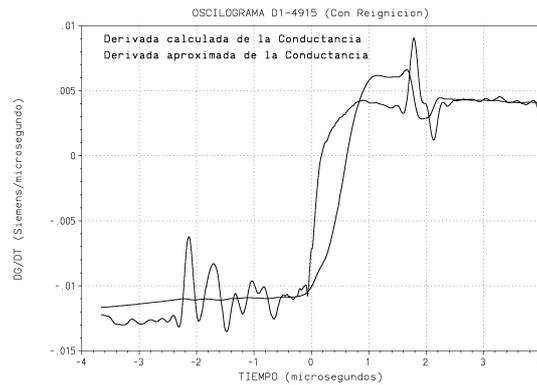
El valor óptimo que se debe escoger depende de muchos factores como son la calidad del equipo de medida, la calidad de los oscilogramas obtenidos, el programa de digitalización utilizado, etc., y como en muchas situaciones de la ingeniería, sólo la experiencia, confianza y astucia del operador disminuirá los errores que se cometan debido a la utilización de un valor no apropiado.

#### I-4.2.- OPTIMIZACIÓN DE LA CANTIDAD DE PUNTOS DE LA TABLA DE ENTRADA

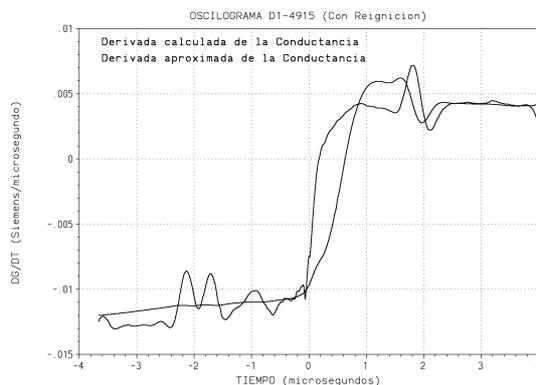
Para disminuir los tiempos de cálculo es fundamental realizar la mínima cantidad de operaciones dentro de la ejecución de un programa de modo que estas aseguren un resultado correcto. Para optimizar la cantidad de puntos que se crean en las tablas internas que están en relación directa con la cantidad de cálculos que se realizan, se seleccionó uno de los programas al azar y se lo fue ejecutando con un número distinto de puntos a fin de encontrar aquella cantidad que asegure una buena convergencia de valores. A continuación se puede observar más claramente la variación estudiada que se presenta a modo de tabla y de gráficos.



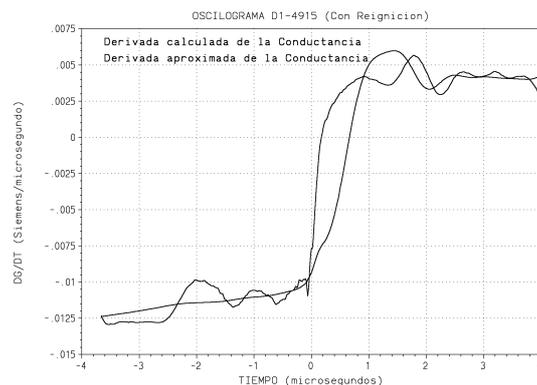
DG/DT=f(t) con suavizado 10



DG/DT=f(t) con suavizado 30



DG/DT=f(t) con suavizado 50



DG/DT=f(t) con suavizado 90

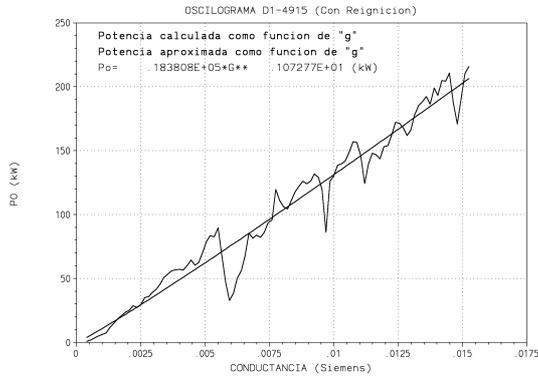
Figura N°I-26: Influencia del coeficiente de suavizado sobre la aproximación según el modelo. Ejemplo.

No solo en las salidas gráficas se puede observar la influencia del coeficiente de suavizado, por esto se presentan las tablas siguientes donde se puede ver dicha influencia en los valores calculados para los parámetros de la ecuación del modelo según Mayr como variables con la conductancia y como constantes en el tiempo.

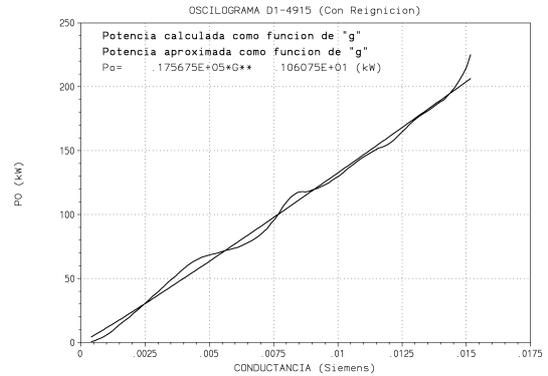
PARÁMETROS VARIABLES		
SUAVIZADO	POTENCIA	CTE. DE TIEMPO
Igual a 10	$P_0 = 294582 \cdot g^{1,39060}$ [kW]	$\Theta = 322,662 \cdot g^{1,14166}$ [μs]
Igual a 30	$P_0 = 396748 \cdot g^{1,44318}$ [kW]	$\Theta = 198,284 \cdot g^{1,05482}$ [μs]
Igual a 50	$P_0 = 409571 \cdot g^{1,45039}$ [kW]	$\Theta = 233,243 \cdot g^{1,08321}$ [μs]
Igual a 90	$P_0 = 705887 \cdot g^{1,55600}$ [kW]	$\Theta = 100,005 \cdot g^{0,927084}$ [μs]

Tabla N°I-4: Influencia del coeficiente de suavizado en los valores de los parámetros considerados como variables.

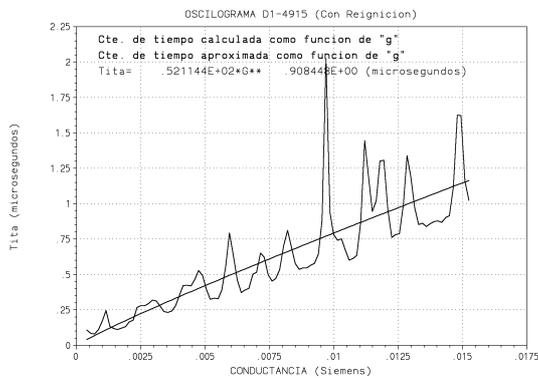
observa la influencia de este coeficiente sobre la aproximación realizada según el modelo elegido, mientras que las tablas I-4 y I-5, muestran como varían los parámetros calculados para distintos valores del coeficiente de suavizado tomados como ejemplo.



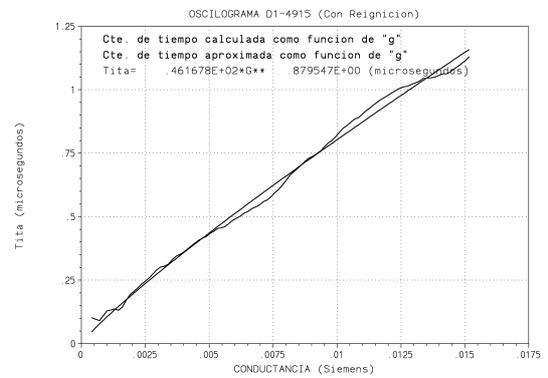
Aproximación de  $P_0$  con suavizado 10



Aproximación de  $P_0$  con suavizado 90



Aproximación de  $T$  con suavizado 10



Aproximación de  $T$  con suavizado 90

Figura N°I-25: Influencia del coeficiente de suavizado sobre el valor de los parámetros. Ejemplo.

calculados mediante el uso de los programas desarrollados. La curva calculada directamente a partir de los valores leídos es la que posee mayor variación mientras que la curva más suave es la aproximación que se logra usando el modelo de Mayr con un comportamiento de los parámetros variables con la conductancia.

El análisis de esta figura es de suma importancia ya que al representar un término de la ecuación del modelo es la que se utilizará para comparar entre sí a los distintos métodos de cálculo de parámetros, modelos de arco eléctrico, comportamiento de parámetros, etc.

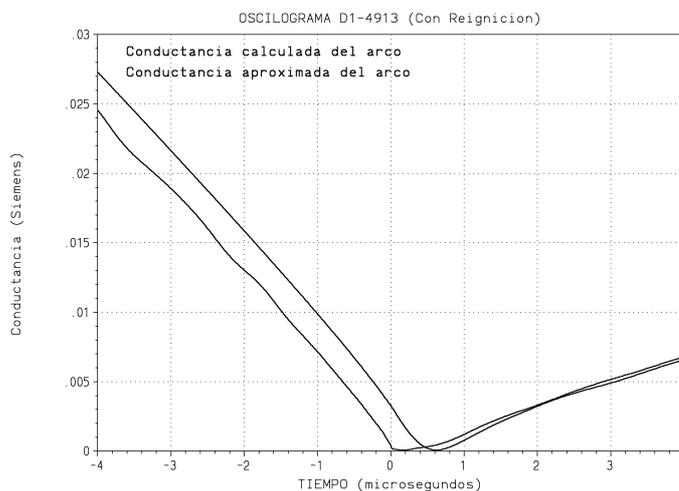


Figura N°I-24: Variación de la constante de tiempo como función de la conductancia.

Sólo con el fin de poder evaluar el comportamiento de la conductancia durante la reignición o no del arco eléctrico, se presenta la figura anterior que surge como resultado de integrar su derivada con respecto del tiempo. Además, también servirá para valorar el procedimiento de cálculo escogido.

#### **I-4.- OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS PROGRAMAS**

Evidentemente la ejecución de todo programa en un ordenador consume un tiempo que estará determinado tanto por la capacidad del ordenador mismo como por la longitud del programa en sí y de los cálculos involucrados, debido a esto se ha efectuado un análisis sobre la influencia del coeficiente de suavizado sobre los valores calculados y otro sobre la cantidad óptima de valores que garanticen una buena representación de los parámetros en el menor tiempo posible.

##### **I-4.1.- OPTIMIZACIÓN DEL COEFICIENTE DE SUAVIZADO**

El coeficiente de suavizado que admiten los programas se lo utiliza, con el fin de anular posibles ruidos o perturbaciones en los cálculos y, como su nombre lo indica, para suavizar las variaciones bruscas que pueden tener las curvas, principalmente aquellas en las que la derivada de un variable está presente ya que una pequeña variación de la variable original se ve aumentada cuando se calcula su derivada respecto del tiempo, por ejemplo.

Para comprender la influencia de este coeficiente sobre la aproximación de parámetros que se realiza con la función potencial se puede observar la figura I-25. En la figura I-26, se

hasta justo antes del momento de la reignición; luego del cual, la potencia aportada por el circuito es superior a la disipada al medio refrigerante y en consecuencia el arco se transforma en autosostenido creándose nuevamente las condiciones necesarias para la circulación de corriente.

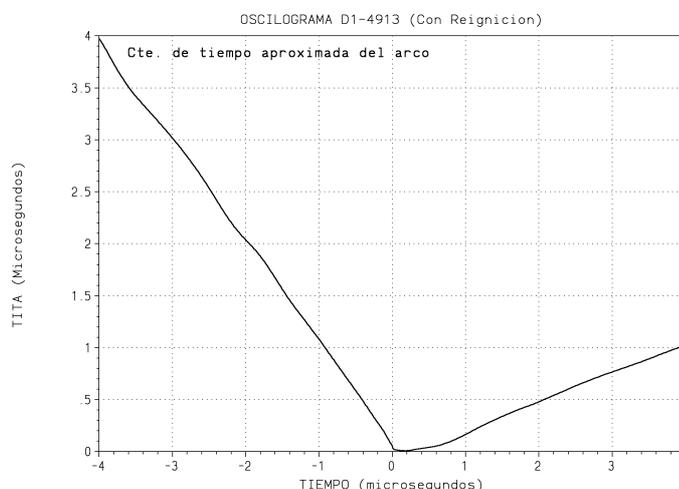


Figura N°I-22: Variación de la constante de tiempo como función del tiempo.

La figura I-22, muestra el comportamiento de la constante de tiempo del arco para instantes antes y después del paso por el cero de tiempo. Su análisis permite observar que luego de la reignición su rapidez de variación disminuye respecto a la que poseía antes del cero, mientras que en la región próxima al cero su valor prácticamente se anula lo que equivale a decir que existe una región de inestabilidad del arco donde la rapidez de los procesos físicos asociados al corte de la corriente se manifiestan con suma rapidez.

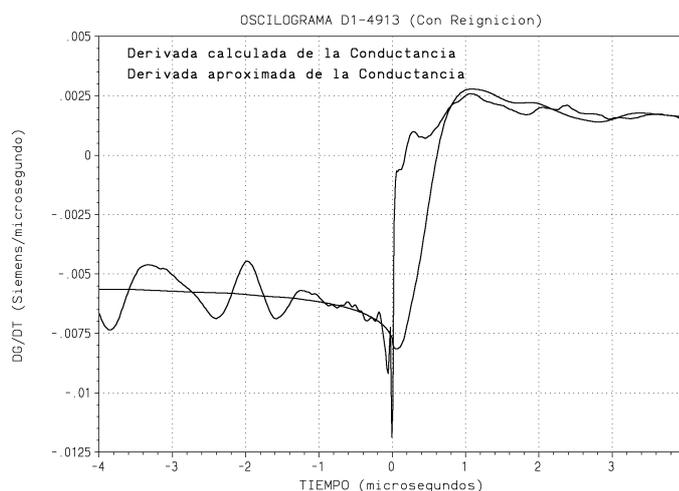


Figura N°I-23: Variación de la derivada de la conductancia como función del tiempo.

La mayoría de los modelos de arco eléctrico tratan de relacionar la variación de la derivada de la conductancia con algunas variables eléctricas que puedan ser medidas más algunos parámetros que hay que determinar. La figura anterior muestra como varía la derivada de la conductancia tanto del modelo de Mayr como el de Cassie junto con la aproximación que se logra utilizando para su cálculo los valores de los parámetros que fueron

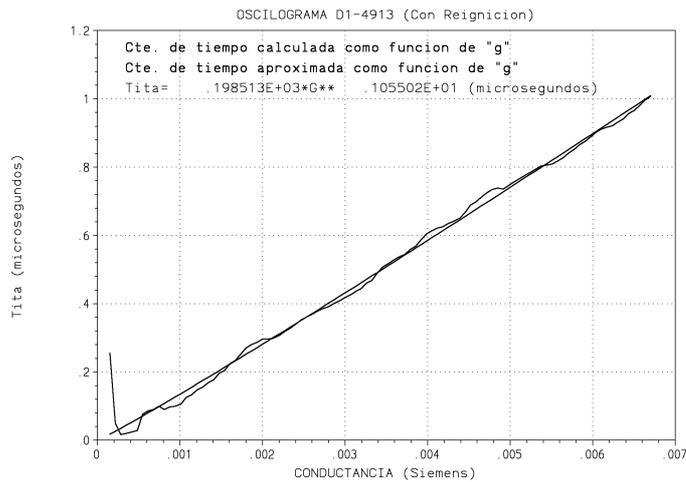


Figura N°I-20: Constantes de tiempo calculada y aproximada como funciones de la conductancia.

Aquí se muestra la aproximación que los programas son capaces de hacer para ajustar la variación de la constante de tiempo como función de la conductancia a una función del tipo potencial con parámetros cuyos valores se muestran en los títulos del gráfico. Como se dijo anteriormente, la primera porción de la curva de la constante de tiempo calculada pierde peso a la hora de efectuar la aproximación ya que se aleja de los valores promedios.

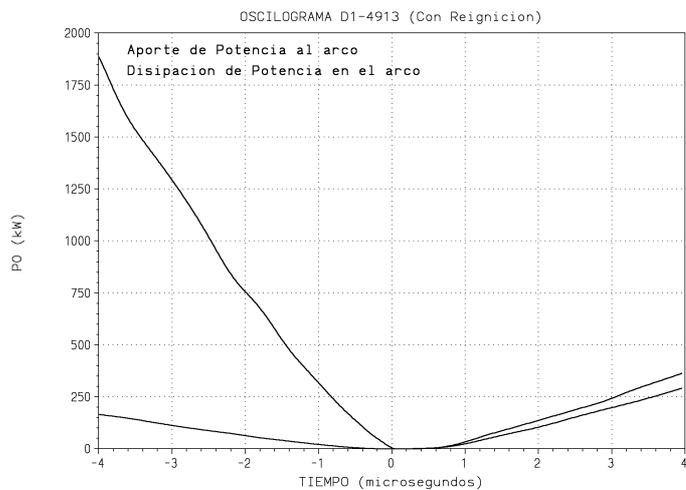


Figura N°I-21: Potencias calculada y aproximada en función del tiempo.

La figura anterior está compuesta por dos curvas: la primera de ellas, que antes del cero de tiempo es la que se encuentra en la parte superior y luego del cero es la inferior, representa a la potencia que el arco eléctrico es capaz de transmitir al medio refrigerante en forma de calor y se calcula con los valores de los parámetros encontrados. Independiente de esta cesión de calor, existe un aporte de potencia desde el circuito al arco que se transforma en calor y es el producto del cuadrado de la corriente por su resistencia, es decir, por efecto Joule.

Para el caso en estudio y, como existe reignición del arco, las curvas de ambas potencias intercambian su posición luego del tiempo cero lo que equivale a decir que, en la práctica, la capacidad del arco eléctrico para ceder calor combinada con la capacidad del medio refrigerante de absorberlo es superior al aporte de energía desde el circuito al arco

los parámetros. Hablando en detalle, la primera porción de la curva de la constante de tiempo, si bien da la impresión de estar incorrecta, su forma es la consecuencia del tratamiento matemático; además esta porción, como todo tramo de curva que se aleje de los valores promedios, pierde peso a la hora de realizar aproximaciones hacia funciones predeterminadas, como se verá luego.

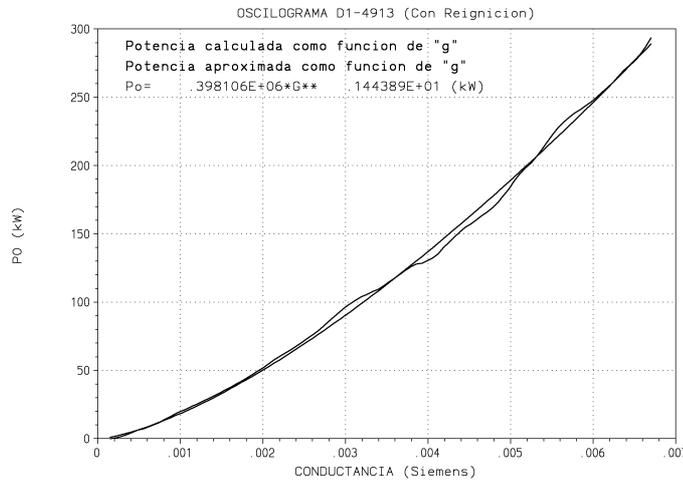


Figura N°I-19: Potencias calculada y aproximada como funciones de la conductancia.

La aproximación que se logra utilizando una función del tipo potencial para la potencia calculada se muestra en la figura anterior en la cual se puede ver que la aproximación es lo suficientemente buena como para considerarla correcta. También se brinda, en pantalla, los valores de los coeficientes de la aproximación hecha.

Si bien en esta figura y en las que siguen, tal vez no se alcancen a distinguir correctamente las curvas reales calculadas con las aproximadas, se debe a la transformación de los archivos gráficos en imágenes incluidas en el texto, mientras que en la presentación en la pantalla del ordenador cada curva tiene su propio color y trazo que la diferencian entre sí. En caso de que el operador decida imprimir desde la pantalla una gráfica, cada curva saldrá diferenciada o bien por el color y el trazo si es que se posee impresora color o bien por el trazo para la impresión en blanco y negro.

La variación de la derivada de la tensión tiene su sentido calcularla ya que ésta da una idea de la rapidez con la cual el circuito asociado al interruptor impone la tensión transitoria de restablecimiento, que es la que causa el colapso de la estabilidad en el apagado del arco, y es por esta razón que se calcula su valor para el instante posterior al cero de tiempo ya que también sirve para compararlo con el registrado en el oscilograma durante el ensayo. Por otra parte, el valor máximo registrado coincide con el instante en el cual se presenta la reignición del arco que coincide, como se dijo, con el colapso del medio aislante.

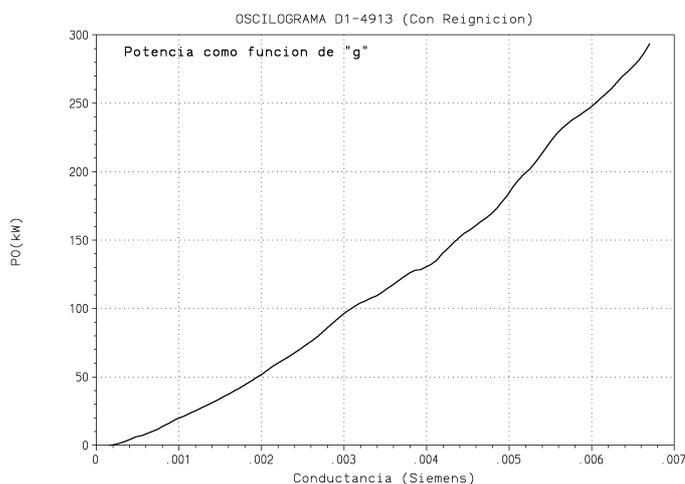


Figura N°I-17: Variación de la potencia como función de la conductancia.

En la figura anterior se muestra la forma de la potencia como función de la conductancia calculada en base al tratamiento matemático formulado para cada programa de cálculo. Como es de esperar el valor de la potencia nunca puede ser negativo, lo que equivaldría con una resistencia negativa y la forma de su variación es bastante suave para este caso. Por otra parte, el rango de variación de la conductancia está también determinado por el método de cálculo que se utilice.

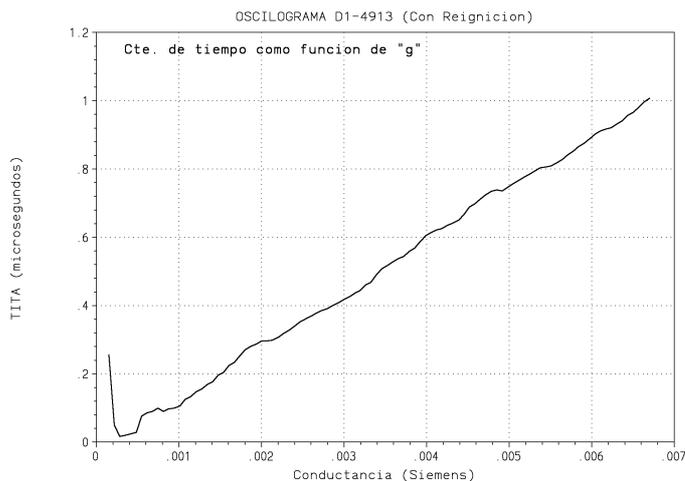


Figura N°I-18: Variación de la constante de tiempo como función de la conductancia.

La constante de tiempo como función de la conductancia tiene la forma presentada, en la cual, al igual que el caso anterior, el rango de variación de la conductancia coincide en sus valores extremos y es correcto ya que en ambos se utiliza el mismo método de cálculo para

además antes de este instante la rapidez es mayor que después, tal cual se puede comprobar con el gráfico de la conductancia en función del tiempo.

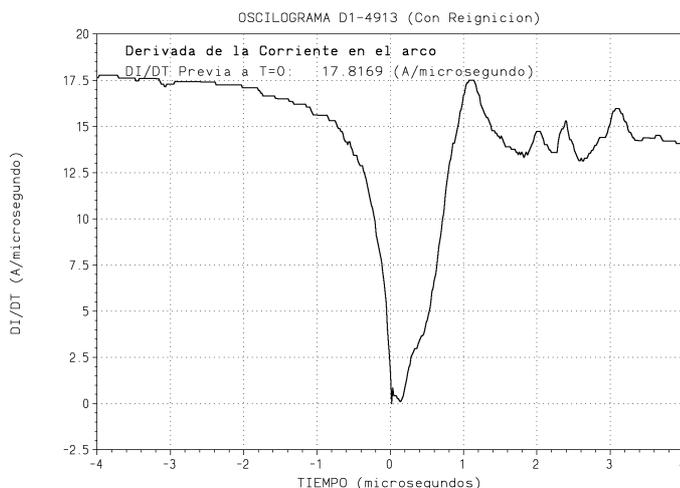


Figura N°I-15: Variación de la derivada de la corriente durante la reignición del arco.

Aparte de registrar la tensión en bornes durante el ensayo, se registra la derivada de la corriente con un voltímetro magnético o bobina de Rowski a partir de la cual luego se calcula la corriente por integración numérica. No obstante, del análisis de la figura anterior se puede decir que la derivada prácticamente se hace cero para el cero de tiempo lo que se corresponde con una corriente constante hasta que la tensión impuesta al arco impone la reignición, para la cual la variación de la corriente es en promedio un poco menor que para antes del cero, aunque se alcance un valor máximo muy parecido en ambos casos. El valor incluido en el gráfico corresponde al valor máximo registrado antes del tiempo cero.

En caso de analizar un oscilograma de una apertura exitosa del interruptor, la porción de la figura antes del cero de tiempo es prácticamente igual mientras que luego del cero de tiempo, su valor se hace cero y permanece en éste, hasta el fin de registro.

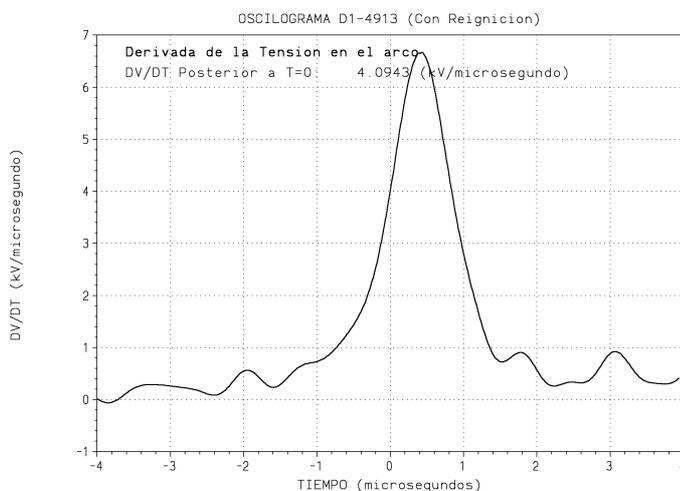


Figura N°I-16: Variación de la derivada de la tensión durante la reignición del arco.

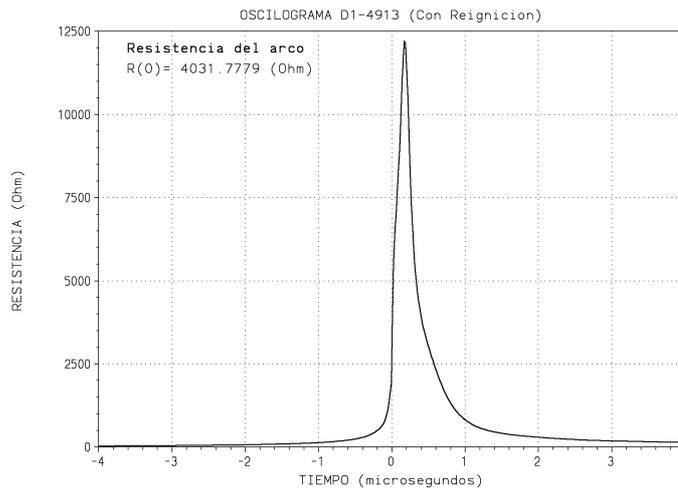


Figura N°I-13: Variación de la resistencia durante la reignición del arco.

La variación de la resistencia del arco eléctrico para el caso de un ensayo con reignición se presenta en la figura anterior donde se puede observar como su valor máximo no corresponde exactamente con el cero de tiempo ya que su variación es progresiva desde un valor muy pequeño, o sea para un tiempo muy alejado “hacia la izquierda” del dibujado, hasta un valor infinito, para el caso de una apertura exitosa o hacia nuevamente el cero para un tiempo no graficado “hacia la derecha”.

El valor máximo, como se observa coincide en tiempo con el instante en el cual la corriente comienza a crecer nuevamente que es cuando la reignición comienza a hacerse presente durante el ensayo. El valor de la resistencia que aparece en el gráfico corresponde al valor para tiempo cero que luego es usado para comparar con los resultados de los oscilogramas.

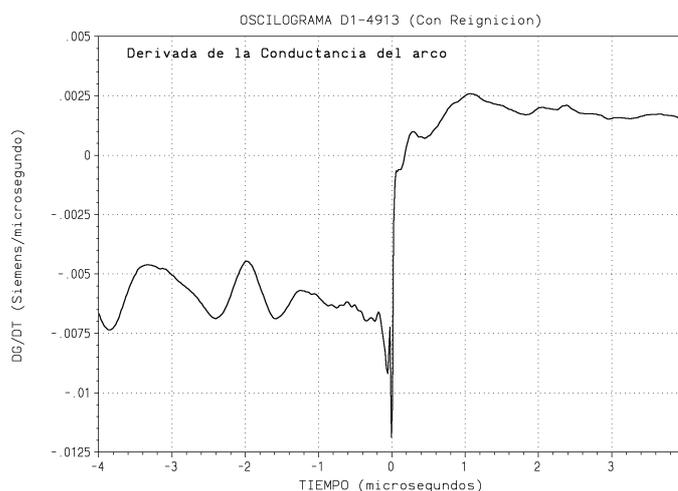


Figura N°I-14: Variación de la derivada de la conductancia durante la reignición del arco.

La mayoría de los modelos matemáticos que representan al arco eléctrico relacionan el producto de la inversa de la conductancia por su derivada con respecto al tiempo, con algunas variables eléctricas más algún parámetro tal cual se pudo ver en el Capítulo 3; por esta razón aquí se muestra la variación del término de la izquierda de dichos modelos. Como era lógico esperar, la rapidez de variación se acentúa cuando más cerca se esté del cero de tiempo;

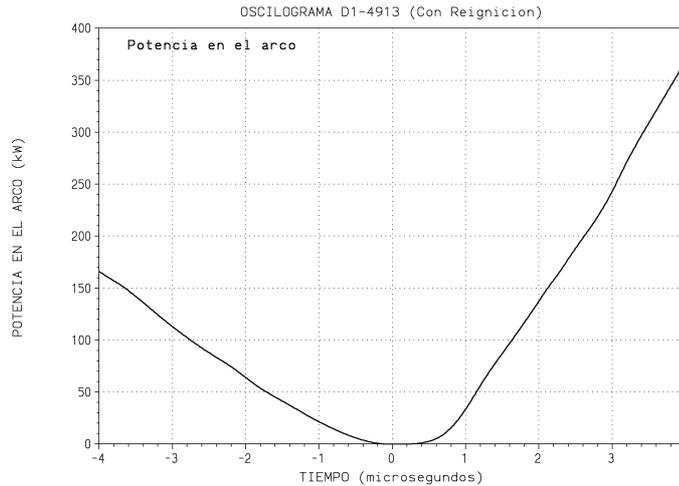


Figura N°I-11: Variación de la potencia del arco durante la reignición del arco.

El producto de la tensión aplicada al arco por la corriente que circula por él, da la potencia que, en forma de calor por efecto Joule, transmite al medio refrigerante como aporte de calor; y como la corriente nunca se anula, excepto para tiempo cero, siempre existe aporte de calor al medio refrigerante. En otras palabras, el área comprendida entre la curva y el eje de potencia cero representa, por unidad de tiempo, la energía que en forma de calor que el arco eléctrico aporta al medio refrigerante.

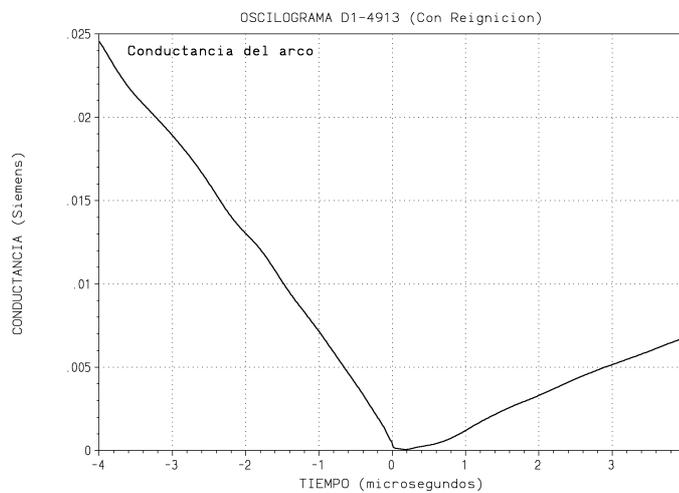


Figura N°I-12: Variación de la conductancia durante la reignición del arco.

Por su definición la conductancia es la inversa de la resistencia y como en los programas se calcula antes que la resistencia también se grafica antes. De la figura, se puede ver como disminuye de forma pareja desde un valor de 0,025[S] y, si bien parece que se anula cerca del cero de tiempo, mantiene un valor mayor que cero para luego crecer igualmente de forma pareja pero con menor rapidez que la anterior.

involucrados durante la presencia del arco eléctrico. En las figuras, el tiempo en negativo significa los microsegundos que faltan para el cruce simultáneo de la corriente y la tensión por el cero, luego del cual se anulan en una apertura o crecen nuevamente si se trata de una reignición del arco eléctrico.

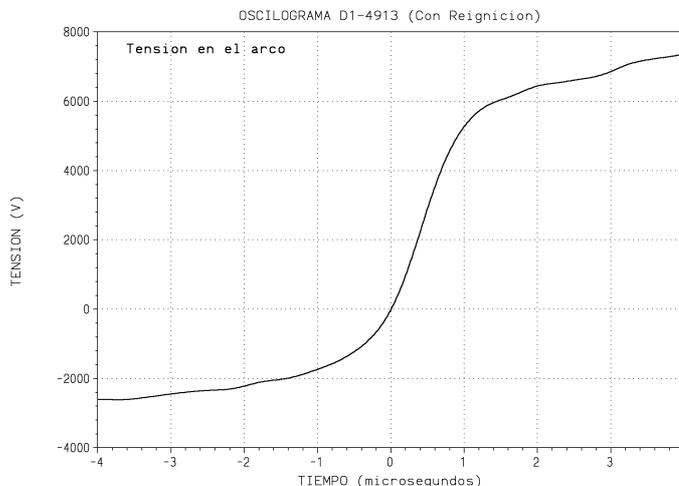


Figura N°I-9: Variación de la tensión durante la reignición del arco.

En la figura anterior se presenta la forma de variación de la tensión del arco eléctrico durante un ensayo en el cual hubo reignición del arco eléctrico, se puede ver cómo pasa de un valor de  $-2500$  [V] para  $4$  [ $\mu$ s] antes del cero de tiempo, a un valor de aproximadamente  $7500$  [V] para  $4$  [ $\mu$ s] después de la reignición. El valor cero de tiempo se toma para el primer instante en el cual tanto la tensión como la corriente son ceros simultáneamente. Luego del paso por cero, el valor de la tensión es la equivalente de aplicar la tensión transitoria de restablecimiento (TTR) al arco eléctrico por el circuito asociado al interruptor.

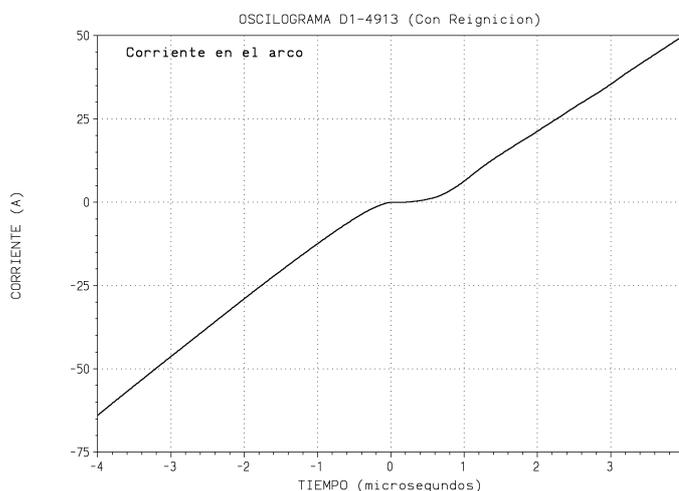


Figura N°I-10: Variación de la corriente durante la reignición del arco.

Si bien aquí se presenta como el segundo gráfico que componen los programas desarrollados, la corriente en el arco se calcula como la integración de la derivada de la corriente y se coloca luego de la tensión sólo a fines de graficación. Aquí se observa como existe un intento del interruptor de suprimir la corriente en el arco que presenta un valor de unos  $65$  [A] al comienzo del registro, pasa por su cero para el cero de tiempo, pero no alcanza a suprimirse por completo excepto para una fracción de microsegundo, luego de la cual prácticamente crece con la misma rapidez que la anterior.

los parámetros de la ecuación elegida, la cantidad de iteraciones y el valor del parámetro propiamente dicho junto con una tabla de errores para cada iteración.

```

NUMERO DE PUNTOS PARA TABLA                1024
FACTOR DE MULTIPLICACION DE TENSIONES      1.0000
FACTOR DE MULTIPLICACION DE CORRIENTES PRE 0 1.0000
FACTOR DE MULTIPLICACION DE CORRIENTES POST 0 1.0000
COEFICIENTE DE SUAVIZADO                   20.0000

      CALCULO DE COEFICIENTES DE LA FUNCION
      Y = A * X ** B

SOLUCION OBTENIDA EN 60 ITERACIONES

A=          1.84857157
B=          .54669722

      I  -----X-----Y-----YC----- ERROR ----- ERRORȳ -----
      TABLA  CALCULO  ABSOLUTO  RELATIVO  ABSOLUTO  RELATIVO

      1 .9765E-03 .7435E-02 .4179E-01-.3436E-01-.4621E+01 .1180E-02 .2135E+02
      2 .1165E-02 .1174E-01 .4603E-01-.3429E-01-.2920E+01 .1176E-02 .8527E+01
      .....
      99 .1945E-01 .2018E+00 .2145E+00-.1273E-01-.6310E-01 .1621E-03 .3982E-02
      100 .1964E-01 .2042E+00 .2156E+00-.1141E-01-.5589E-01 .1303E-03 .3123E-02

VALORES MEDIOS                -.6312E-03-.1645E+00 .8288E-03 .4359E+00
EN VALORES ABSOLUTOS          .2178E-01 .2874E+00

      CALCULO DE COEFICIENTES DE LA FUNCION
      Y = A * X ** B

SOLUCION OBTENIDA EN 166 ITERACIONES

A=          .00950830
B=          .55164048

      I  -----X-----Y-----YC----- ERROR ----- ERRORȳ -----
      TABLA  CALCULO  ABSOLUTO  RELATIVO  ABSOLUTO  RELATIVO

      1 .9765E-03 .2345E-03 .2077E-03 .2682E-04 .1143E+00 .7192E-09 .1307E-01
      2 .1165E-02 .2279E-03 .2290E-03-.1059E-05-.4647E-02 .1122E-11 .2159E-04
      .....
      99 .1945E-01 .9654E-03 .1082E-02-.1166E-03-.1208E+00 .1360E-07 .1459E-01
      100 .1964E-01 .9776E-03 .1088E-02-.1102E-03-.1127E+00 .1214E-07 .1270E-01

VALORES MEDIOS                -.1156E-05-.2547E-01 .9154E-08 .1700E-01
EN VALORES ABSOLUTOS          .7382E-04 .1069E+00
    
```

Figura N°I-8: Ejemplo de un archivo de salida.

Además todos los programas tienen en la línea seis y ocho del archivo de entrada, la posibilidad de incluir peticiones de salidas gráficas.

### I-3.4.- OPCIONES DE GRAFICACIÓN

Los programas desarrollados además de dar el valor numérico de los parámetros de la ecuación diferencial entre otros datos también poseen, tal como se indicó anteriormente, una serie de opciones para obtener salidas gráficas con el fin de poder comparar entre ellas la variación de cada parámetro, mostrándose a continuación las distintas posibilidades a modo de ejemplo, a partir de un oscilograma con reingnición del arco.

También se brindan algunos comentarios que pueden ser extraídos del análisis de cada figura en particular y que sirven para mejorar la comprensión y el análisis de los procesos



Para tener una idea más clara para el llenado del archivo de entrada se presenta uno a continuación:

```

TITULO
915 Doppelduesen-Schalter In 45 kA / 60 Hz Versager
PUNTOS  AMV  AMI1  AMI2  ANF  ITIPO  AKF
512      1.0  1.0  1.0  32.0  1.0  1.0
PLOTV   PLOTI  PLOTP  PLOTDI/DT  PLOTDV/DT  PLOTG  PLOTR  PLOTDG/DT
        0     0     0     0     0     0     0     0
PLOTPo  PLOTΘ  PLOTPoF  PLOTΘF  PLOTPo(T)  PLOTΘ(T)  PLOTDG(T)  PLOTG(T)
        0     0     0     0     0     0     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
.....
 3.996382         65.27731
 4.002593         65.45399
 4.00878         65.45331
 4.014968         65.45263
 4.021131         65.27457
FIN
    
```

Figura N°I-6: Ejemplo de un archivo de entrada.

### I-3.2.- PRESENTACIÓN EN PANTALLA

Durante la ejecución de todos los programas se van presentando en pantalla la secuencia de pasos que se van realizando, algunos de ellos son de especial importancia y se pueden observar en la figura I-7, donde luego de una parte donde se trata el manejo de archivos y la lectura de datos, se muestra los extremos de la tabla de tiempos y el incremento con que se trabaja. También se muestran los ajustes que cada programa hace con las tablas que va a trabajar con el fin de que siempre estén sincronizadas en el tiempo respecto al primer cero de tensión que por imposición debe coincidir con el primer cero de corriente, y da la cantidad de iteraciones que se realizan para encontrar la solución buscada.

Al finalizar presenta en pantalla un mensaje con los valores de los parámetros obtenidos junto con un resumen de las opciones que escogió el operador para su determinación, como son el modelo de arco eléctrico, el método utilizado para el cálculo y el comportamiento de los parámetros.

LISTA DE VARIABLES PARA LA GRAFICACIÓN		
VARIABLE	SIGNIFICADO	FORMATO
PLOTV	Gráfica de la tensión en función del tiempo.	I10
PLOTI	Gráfica de la corriente en función del tiempo.	I10
PLOTP	Gráfica de la potencia del arco en función del tiempo.	I10
PLOTDI/DT	Gráfica de la derivada de la corriente en función del tiempo.	I10
PLOTDV/DT	Gráfica de la derivada de la tensión en función del tiempo.	I10
PLOTG	Gráfica de la conductancia en función del tiempo.	I10
PLOTR	Gráfica de la resistencia en función del tiempo.	I10
PLOTDG/DT	Gráfica de la derivada de la conductancia en función del tiempo.	I10
PLOTP <sub>o</sub>	Gráfica de P <sub>o</sub> en función de la conductancia.	I10
PLOT $\Theta$	Gráfica de $\Theta$ en función de la conductancia.	I10
PLOTP <sub>o</sub> F	Gráfica de P <sub>o</sub> y del ajuste en función de la conductancia.	I10
PLOT $\Theta$ F	Gráfica de $\Theta$ y del ajuste en función de la conductancia.	I10
PLOTP <sub>0</sub> (T)	Gráfica de la aproximación de P <sub>0</sub> en función del tiempo.	I10
PLOT $\Theta$ (T)	Gráfica de la aproximación de $\Theta$ en función del tiempo.	I10
PLOTDG(T)	Gráfica de la aproximación de dg/dt en función del tiempo.	I10
PLOTG(T)	Gráfica de la aproximación de la conductancia.	I10

Tabla N<sup>o</sup>I-3: Lista de parámetros correspondientes a la graficación.

- > Línea 9: Con la palabra “TENSIONES”, indica que a continuación sigue la tabla con los valores de tensiones.
- > Línea 10 hasta 999, por ejemplo: Incluye la tabla con los valores de tiempos y tensiones en formato libre, finalizando con una línea que contiene la palabra “FIN” en sus tres primeras columnas. La tabla debe contener un máximo de 2048 valores.
- > Línea 1000, por ejemplo: Con la palabra “CORRIENTES” indica que siguen los valores de la tabla de tiempos y corrientes (o de derivada de corriente).
- > Línea 1001 hasta 1999, por ejemplo: Indica que sigue la tabla de tiempos y corrientes (o derivada) en formato libre, con las mismas características que la tabla de las tensiones.

> Línea 4: Se colocan los parámetros que se indican a continuación:

LISTA DE PARÁMETROS PARA LA LÍNEA N°4.		
VARIABLE	SIGNIFICADO	FORMATO
PUNTOS	Número de puntos que constituirán las tablas de trabajo (máximo 1024)	F10.0
AMV	Factor de multiplicación de los valores de tensión, de manera tal que resulten expresados en Voltios.	F10.0
AMI1	Factor de multiplicación de los valores de corrientes antes del paso por cero, de manera que resulten expresados en Amperios.	F10.0
AMI2	Factor de multiplicación de los valores de corrientes después del paso por cero, de manera que resulten expresados en Amperios.	F10.0
ANF	Coefficiente que controla el filtrado posterior de los datos: 0.0 indica que no se efectuará filtrado. Valores recomendados entre 10 y 40.	F10.0
ITIPO	0.0 indica que se leerán valores de derivada de corriente. 1.0 indica que se leerán valores de corriente.	F10.0
AKF	0.0 indica que se opta por determinar "P <sub>0</sub> " y "Θ" constantes. 1.0 indica que se determinarán los coeficientes de las correspondientes funciones potenciales.	F10.0

Tabla N°I-2: Parámetros correspondientes a la cuarta línea.

> Líneas 5-8: Indican las peticiones de generación de los archivos gráficos de salida. Un uno habilita la petición, un cero la inhibe.

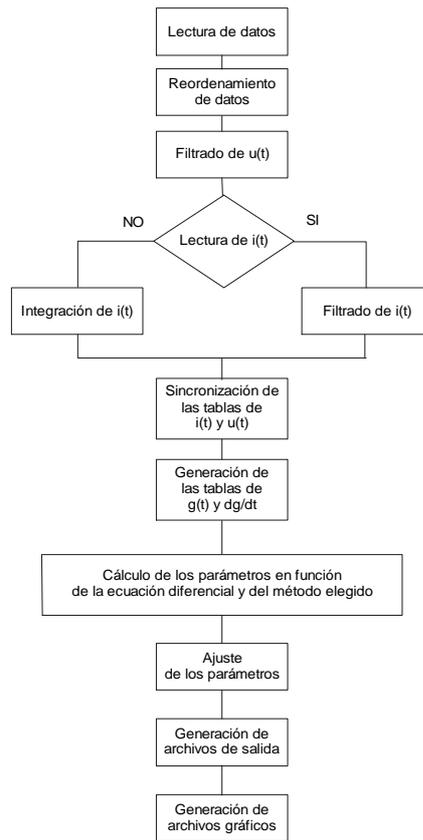


Figura N°I-5: Diagrama de flujo general de los programas desarrollados.

Por lo anterior, todos los programas, tienen la posibilidad de suavizar las curvas antes de equiespaciadas y sincronizarlas entre sí a partir del tiempo cero donde se impone para todos los cálculos que sea cero la corriente y la tensión simultáneamente. Esto asegura que la tabla de tiempos sea única para la tensión y la corriente, lo que permite aparejar los valores entre sí. Con estos valores de tensión y corriente se calculan entonces una tabla de conductancia  $g(t)$  y su derivada  $dg/dt$ . Luego, dependiendo de la ecuación diferencial escogida para representar el arco, se tiene uno u otro programa.

Al ejecutar 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 realizan 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. Al finalizar la ejecución se puede graficar aquellas variables que se hayan solicitado.

### I-3.1.- EL ARCHIVO DE ENTRADA

Como se mencionó anteriormente cada programa requiere de un archivo de entrada de datos con tablas de tensiones y de derivadas de corrientes (o de tensiones y de corrientes), con el siguiente formato en cada una de sus líneas:

- > Línea 1: Indica que a continuación sigue el título del archivo.
- > Línea 2: Se coloca el título del archivo con formato A60.
- > Línea 3: Indica que a continuación siguen los parámetros generales para el cálculo.

RESUMEN DE LOS PROGRAMAS DESARROLLADOS			
Nombre del programa	Ecuación del modelo	Método empleado	Comportamiento de los parámetros
MAYRAMS	Mayr	Amsinck (un sólo ensayo con reingnición)	Constantes y variables
CASSAMS	Cassie	Amsinck (un sólo ensayo con reingnición)	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°I-1: Resumen de los programas desarrollados.

Como todos los programas tienen un mismo cuerpo y siguen a la misma lógica de cálculo, la explicación que a continuación se presenta es válida indistintamente para todos ellos.

El archivo de entrada contiene un título, algunas peticiones de cálculo y otras de graficación que el usuario debe escoger previamente; también contiene los datos de tensión y corriente o la derivada de la corriente en forma de tablas, ambas en función del tiempo cuya base resulta de la digitalización del oscilograma que, generalmente, presenta dos problemas: dichas tablas no tienen los mismos límites extremos para los cuales fueron creadas y además no están equiespaciadas en el tiempo, es decir, no están sincronizadas. También los saltos de tiempo entre un valor y el siguiente no son homogéneos aún dentro de la misma tabla, además poseen “ruido o suciedad” provocado por el sistema de medida en sí o por la calidad del papel empleado en el oscilograma, por ejemplo, que debe ser minimizado al máximo.

A continuación, la figura I-5, presenta la lógica a la que responde la secuencia de pasos que se ejecutan dentro de todos los programas.

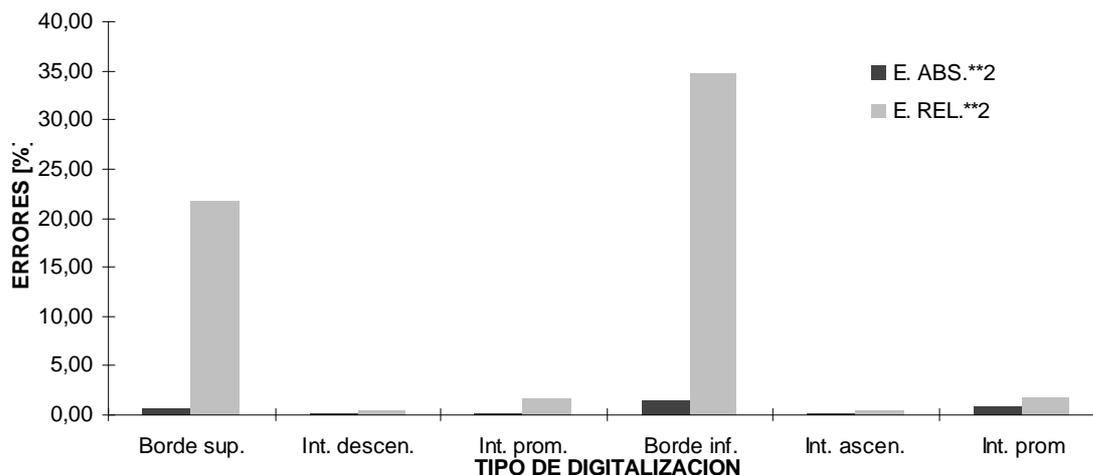


Figura N°I-4: Errores porcentuales y absolutos según el sentido de digitalización.

El análisis de la figura anterior determina que el mejor sentido de digitalización es el interior ya sea descendiente o ascendiente, el peor es siguiendo los bordes externos de la curva, mientras que los valores promedios son buenos pero no mejores que los interiores.

### I-3.- PROGRAMAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS

Los programas fueron desarrollados en lenguaje Fortran y utilizan como entrada un archivo “\*.dat” que debe ser confeccionado según se explicará, para dar como salida uno de extensión “\*.sal” que contiene los pasos ejecutados y uno “\*.plo” que se utiliza para obtener salidos gráficas. La diferencia entre ellos radica en la ecuación diferencial para simular al arco y en el método que se debe emplear para determinar sus parámetros en función de los datos obtenidos.

Evidentemente en la explicación que sigue se ha generalizado su tratamiento mencionando aquellas particularidades comunes a cada programa ya que por la propia naturaleza de los métodos empleados para el cálculo existen diferencias entre ellos que no se tratan en particular.

La figura siguiente ejemplifica sobre las distintas posibilidades de seguimiento de la curva.

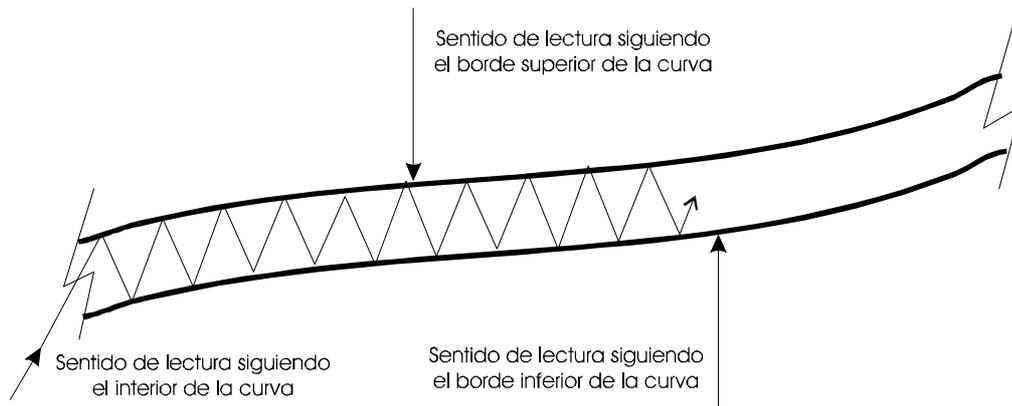


Figura N°I-2: Detalle de los sentidos de recorrido de la curva.

También puede existir la posibilidad de que el programa al detectar el cambio de color pregunte al operador cual es el valor de la ordenada que se corresponde con ese cambio, si es el del pixel anterior al cambio de color o el posterior.

Utilizando la misma figura que la anterior, la figura I-3, muestra en detalle como se pierde calidad en la asignación de valores cuando se amplifica varias veces la curva digitalizada aumentando aún más la dispersión cuanto más gruesa sea la curva.

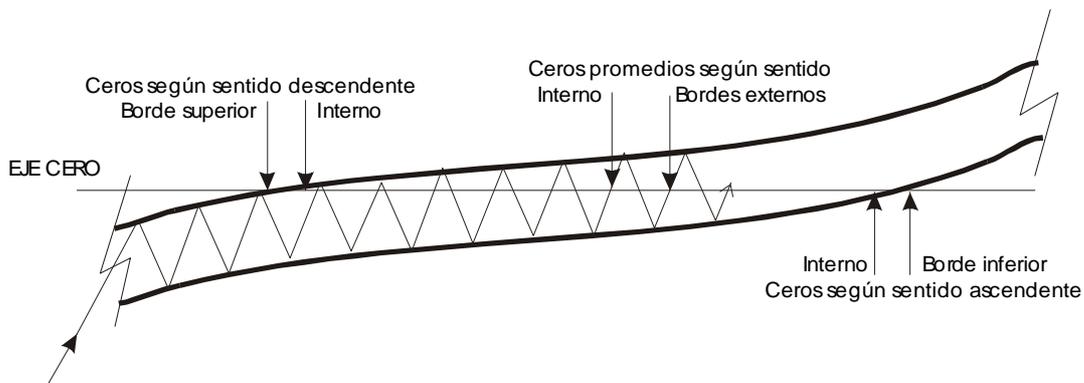


Figura N°I-3: Detalle del paso por cero de la corriente.

Evidentemente según la figura anterior, hay que escoger muy bien el sentido de lectura ya que puede inducir errores notables en la digitalización de una curva principalmente debido a que el trazo al cual se le desea otorgar un valor de ordenada tiene más de un pixel de espesor, generalmente entre tres y cuatro, y se vuelve más ancho cuando se une con alguna marca de referencia como lo es el eje de abscisas como se muestra en la figura.

Para poder determinar cual era la mejor opción se procedió a la digitalización de un oscilograma según todas las opciones posibles y se compararon entre sí los resultados obtenidos de manera de poder analizar su desviación respecto del supuesto "valor real" calculado como promedio de todas las posibilidades. El resultado se muestra en la figura I-4.

oscilogramas, la primera curva refleja el comportamiento de la derivada de la corriente antes y después del tiempo cero tomado como referencia, que es el instante donde coincide el cero de tensión con el de la corriente, la segunda curva es la tensión en los contactos del interruptor que equivale a la tensión que está aplicada al arco. La tercera curva es la corriente en el arco y es el resultado de integrar su derivada que es la que en la realidad se registra mientras, que la última curva es la resistencia calculada del arco para todo el tiempo que dura el ensayo. También se muestran los valores de algunos puntos característicos que serán utilizados para controlar el funcionamiento de la metodología de cálculo.

## **I-2.- DIGITALIZACIÓN DE OSCIOGRAMAS**

El primer paso en la obtención de los parámetros del arco es la lectura de los oscilogramas con un scanner de buena calidad, preferentemente de página completa, en una resolución de 300 dpi o superior; en función del programa que controla al periférico se obtiene un archivo de extensión “bmp” y que, a modo de ejemplo, tiene alrededor de 0.8 [Mbytes] de extensión de memoria por cada hoja tamaño A4.

Luego, para mejorar la definición de la curva dentro de la imagen leída, se debe limpiar y despejar la curva de todos aquellos posibles puntos de “suciedad” (manchas en el papel) o de presencia necesaria (ejes coordenados, por ejemplo) de manera que al final del proceso sólo se tenga la curva a digitalizar junto con aquellas referencias que necesite el programa digitalizador o que definan los valores numéricos de la curva: intersección de los ejes coordenados, marcas de escala de valores sobre los ejes o puntos extremos de los mismos, y transformando el archivo original de extensión “bmp” a la extensión necesaria, procediéndose para finalizar a digitalizar el oscilograma.

### **I-2.1.- DETERMINACIÓN DEL MEJOR SENTIDO DE DIGITALIZACIÓN DE UN OSCIOGRAMA**

Dependiendo del programa de digitalización utilizado, éste puede tener diversas alternativas para escoger en lo que respecta al sentido de lectura de la imagen que se realiza generalmente de izquierda a derecha. Entonces los sentidos son:

- ▷ 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 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 inferior 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 sólo ese valor sobre el eje de abscisas.

# APÉNDICE I: Metodología Desarrollada para la Obtención de los Parámetros

## I-1.- INTRODUCCIÓN

Como la determinación de los parámetros se realiza a partir de los resultados obtenidos de ensayos reales, la sucesión de tareas que se debe completar para su obtención está en función de los datos a partir de los cuales se pretende calcularlos, es decir, depende de la manera en la cual tengamos la información. En general existen tres posibilidades: la información se encuentra almacenada en forma magnética como archivos de salida del osciloscopio, impresa en papel en forma de tablas de valores  $y = f(x)$ , o en forma de oscilograma también impresos en papel.

La metodología que se detalla a continuación es aplicable a partir de los oscilogramas de los ensayos impresos en papel común, 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 acá se detallan. Por ejemplo, si los datos se tienen en forma de tabla directamente hay que dar formato a un archivo de entrada evitándose la digitalización, la limpieza y la sincronización de datos - como se verá luego -.

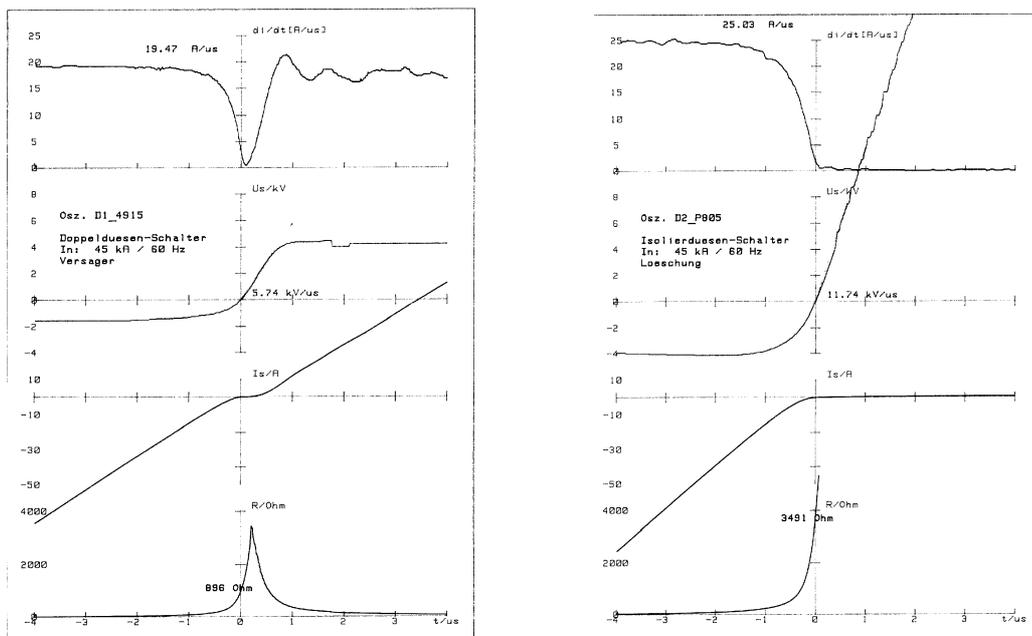
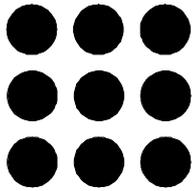


Figura N°I-1: Ejemplo de dos oscilogramas, uno con y el otro sin reignición.

En la figura anterior se puede observar el registro de las variables eléctricas para dos ensayos uno de los cuales es una apertura fallida y el otro una exitosa. En ambos





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

**APÉNDICE I:**

**METODOLOGÍA**

**DESARROLLADA**

**PARA LA OBTENCIÓN**

**DE LOS PARÁMETROS**