

## **5.- CONCLUSIONES:**

Este trabajo demuestra la aplicabilidad del modelo de arco representado por la ecuación de O. Mayr tanto con parámetros constantes como con parámetros dependientes de la conductancia para estudios de importancia donde la interacción entre arco y red es necesario representar.

El análisis de las figuras 4 (a) y 6 (a) muestra que la forma de onda de la tensión antes y después del paso por cero sufre un “pico” que no se presenta en las figuras 8 (a) y 10 (a) aunque en éste último caso se puede demostrar que su pico se debe a la influencia del circuito y no a consecuencia del funcionamiento del modelo ya que una ampliación de la zona da una oscilación de frecuencia propia. Además, la amplitud de los picos de tensión que se presentan con parámetros constantes están directamente relacionados con la proximidad al valor de la potencia que indica la reignición mientras que con parámetros variables esto no se verifica.

Por otra parte, la posibilidad de “jugar” con los valores de los parámetros muestra que no existe un único valor a partir del cual siempre se verifica la reignición del arco sino más bien una región de valores más o menos ancha en función de las características propias del arco que se puede observar en la figuras 10 (a) y (b) donde aparenta desaparecer y luego se produce su renacimiento con el aumento de la tensión característico.

## **BIBLIOGRAFÍA:**

[1] EMTP - Theory Book, July 1995.

[2] ATP - Rule Book, 1995.

[3] 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.

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

[5] Gimenez, W.; Hevia, O.; Vaillard, E.: “Modelo de arco eléctrico con parámetros dependientes de la conductancia para el EMTP/ATP”. 5<sup>tas</sup> Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica, Tomo I, pág. 531-538, Julio 1997, Salamanca-España.

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

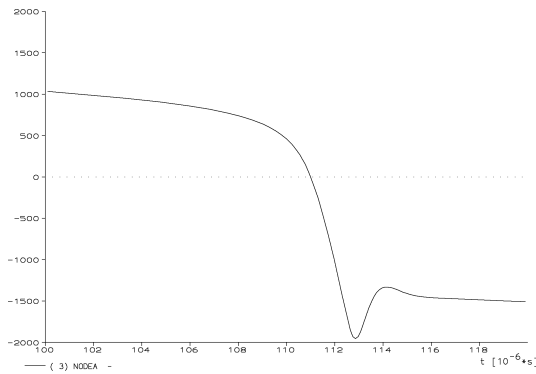
[7] Habedank, U: “On the mathematical description of arc behaviour in the vicinity of current zero”. *EtzArchiv Elektrotech.* Bd. 10, H 11, 1988, pp 339-343.

siguientes:

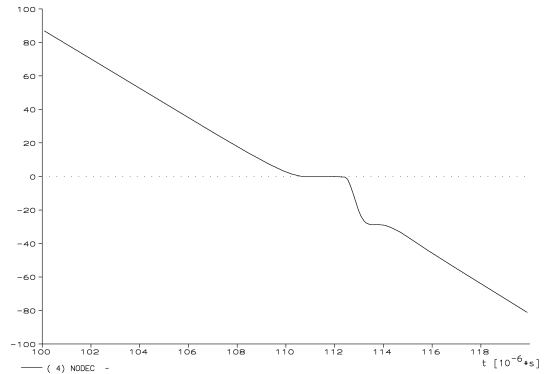
$$P_0(g) = 2.000,0 \cdot g^{1,100847} \text{ [kW]}$$

y

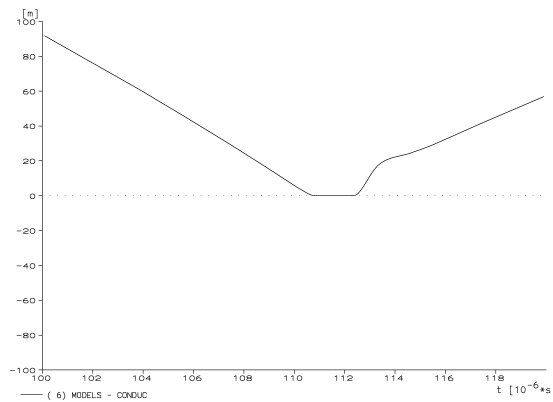
$$\Theta(g) = 34,288692 \cdot g^{0,816465} \text{ [\museg]}$$



(a) Tensión [V]



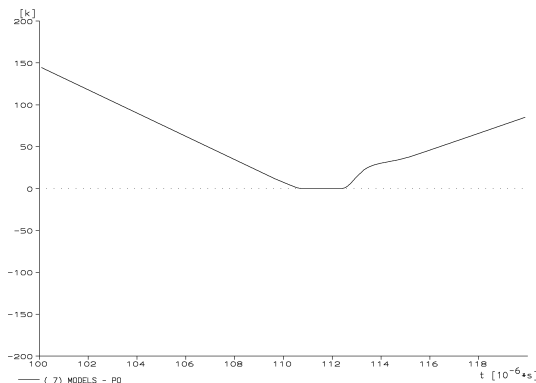
(b) Corriente [A]



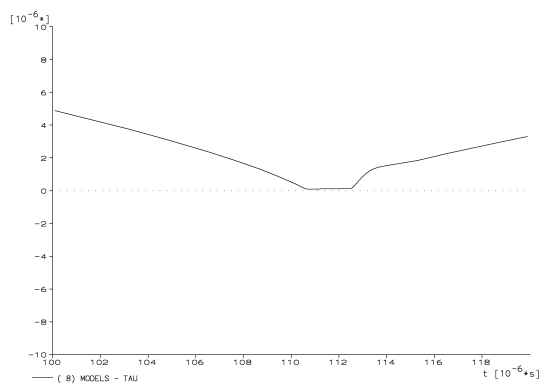
(c) Conductancia [S]

Figura N°10: Resultados de la simulación de la no apertura. Evolución de las principales variables vistas desde el circuito.

La evolución de la potencia como la de la constante de tiempo siguen la forma de variación de la conductancia según la figura que se muestra a continuación.



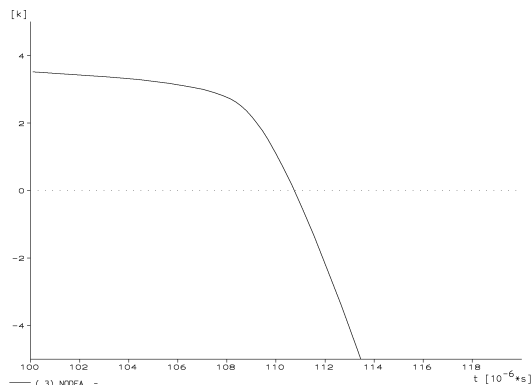
(a) Potencia [kW]



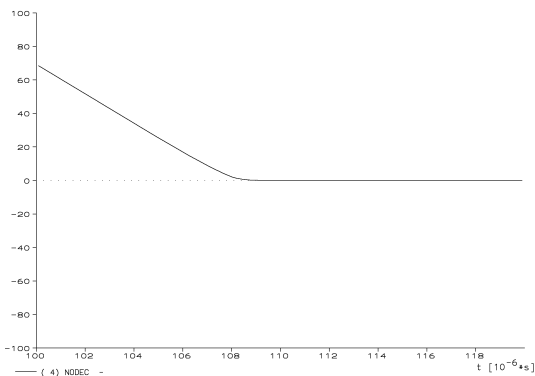
(b) Constante de tiempo [\museg]

Figura N°11: Resultados de la simulación de la no apertura. Evolución de las variables internas del modelo.

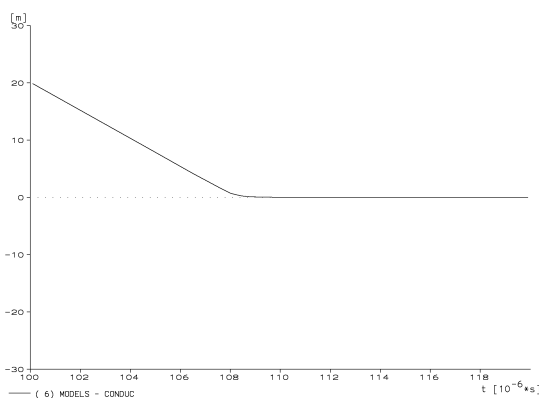
En las figuras siguientes se simula la apertura exitosa de un interruptor donde se puede apreciar la evolución de la tensión , de la corriente y de la conductancia que “ve” el circuito.



(a) Tensión



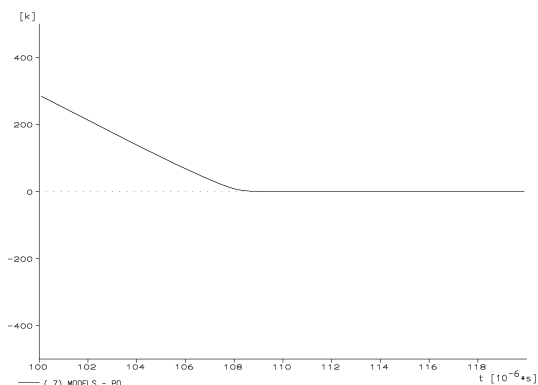
(b) Corriente [A]



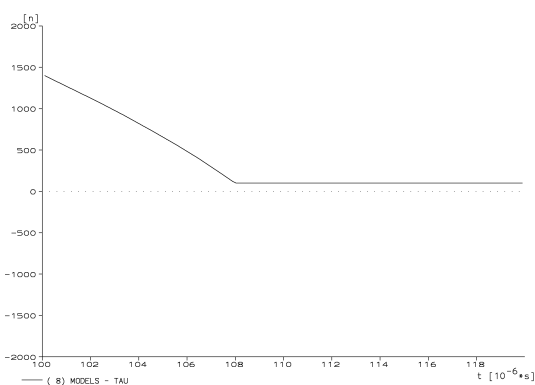
(c) Conductancia [S]

Figura N°8: Resultados de la simulación de apertura. Evolución de las principales variables vistas desde el circuito.

Por otra parte, la evolución de los parámetros del modelo son:



(a) Potencia [W]



(b) Constante de tiempo [seg]

Figura 9: Resultados de la simulación de apertura. Evolución de las variables internas del modelo.

En el caso de simular la apertura fallida del interruptor se puede variar tanto el término independiente como el exponente de la potencia o de la constante de tiempo, obteniéndose en ambos casos resultados similares en cuanto a la forma de la variación de los principales ítems involucrados. En el caso que se muestra a continuación solo se ha modificado el término independiente de la potencia para obtener la reigñición del arco eléctrico con lo cual los parámetros toman los valores

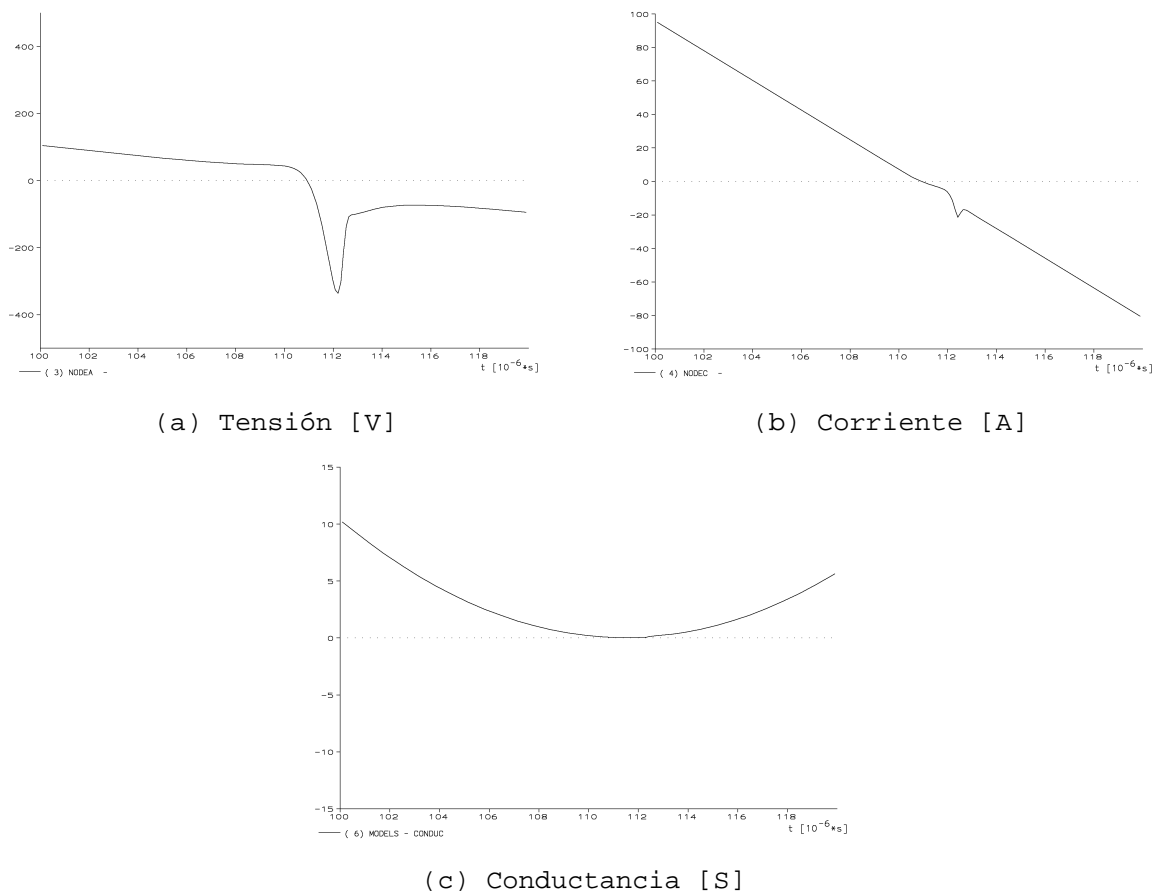


Figura N°6: Resultados de la simulación de no apertura. Evolución de las principales variables vistas desde el circuito.

También para este caso,  $P_0$  y  $\Theta$  permanecen constantes.

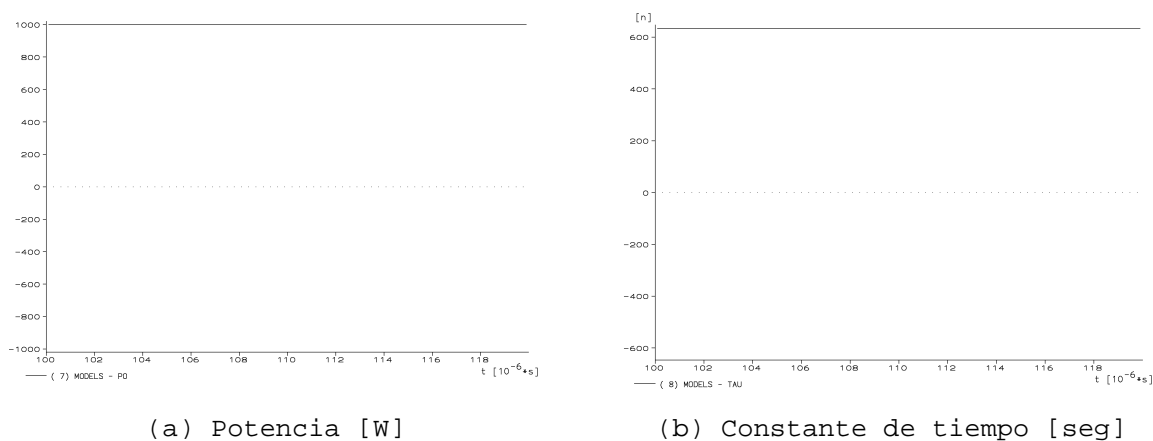


Figura N°7: Resultados de la simulación de no apertura. Evolución de las variables internas del modelo.

#### 4.2.- SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL INTERRUPTOR CON PARÁMETROS VARIABLES CON LA CONDUCTANCIA.

Para esta simulación se utiliza el mismo circuito de la Figura 2 con los valores de la potencia y la constante de tiempo en función de la conductancia iguales a:

$$P_0 (g) = 21.259,849704 \cdot g^{1,100847} \text{ [kW]} \quad \text{y} \quad \Theta (g) = 34,288692 \cdot g^{0,816465} \text{ [\mu seg]}$$

y de la conductancia que “ve” el circuito en la Figura 4 y la evolución de las variables internas del modelo en la Figura 5.

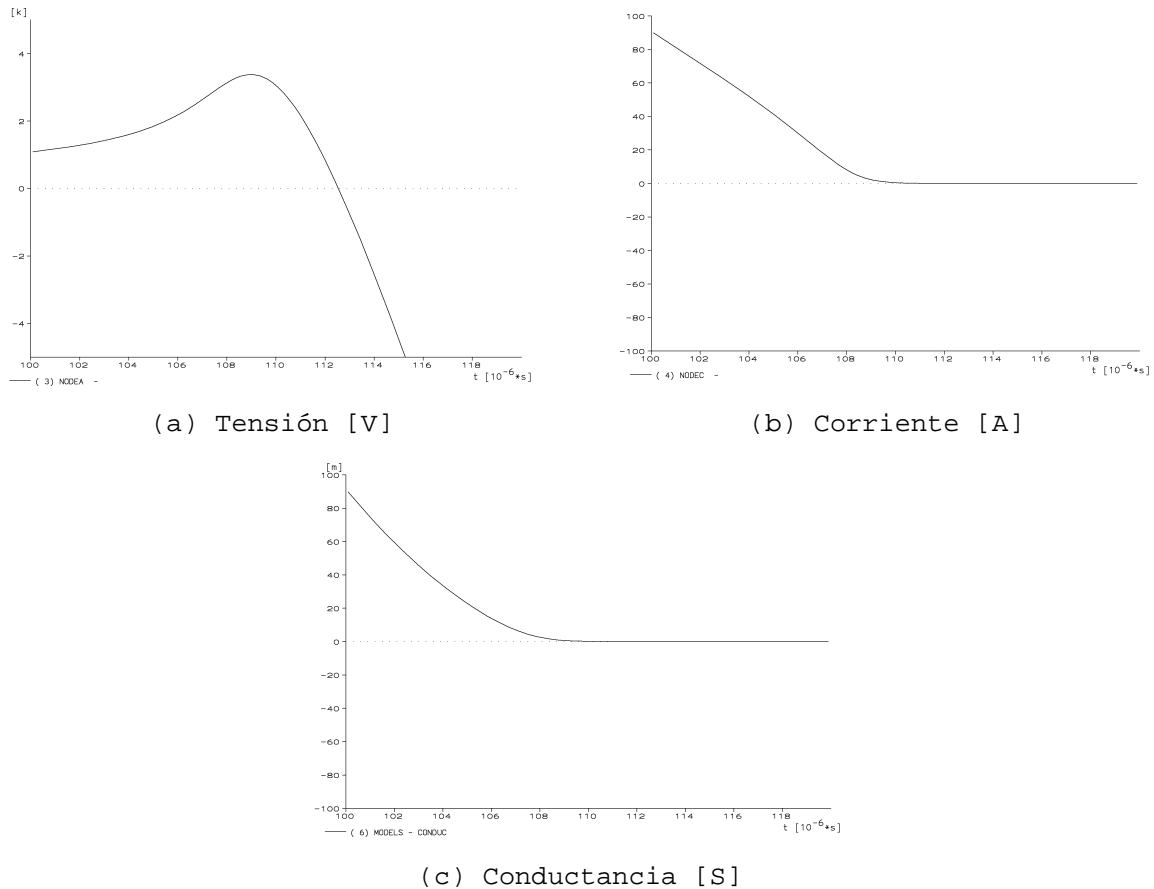


Figura N°4: Resultados de la simulación de apertura. Evolución de las principales variables vistas desde el circuito.

Tanto la potencia como la constante de tiempo permanecen constantes a lo largo de toda la simulación.

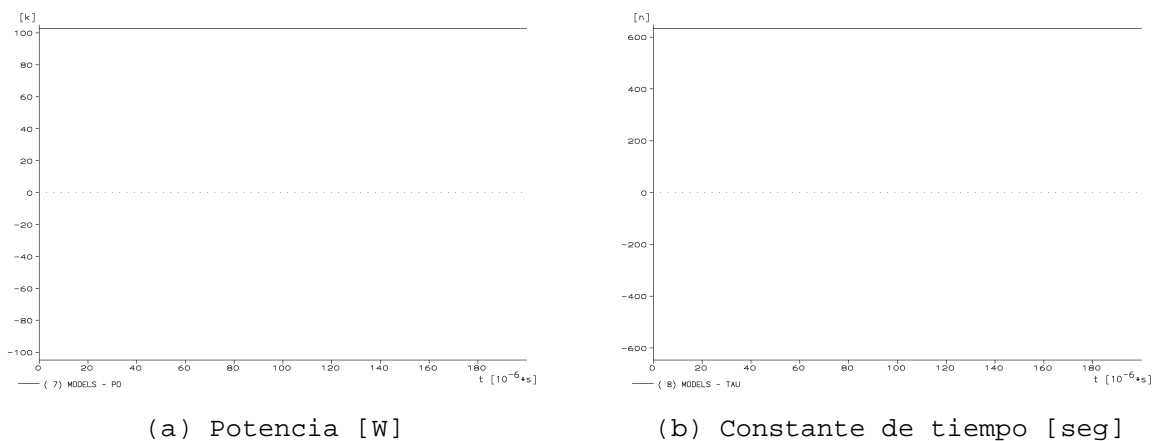


Figura N°5: Resultados de la simulación de apertura. Evolución de las variables internas del modelo.

En cambio, empleando  $P_0 = 1,0$  [kW] y  $\Theta = 0,63$  [ $\mu$ seg] se simula la no apertura del interruptor donde aquí también se puede observar la evolución de las principales variables que “ve” el circuito asociado al interruptor en la Figura 6.

Por su parte, el interruptor esta representado por un switch controlado desde la sección “Models” [2] de la siguiente manera,

```

MODEL arcresmay
COMMENT*****
* MODELO SEGUN THIEL=
*
*          1      dg      1      u . i
*      --- . ---- = ---      (----- - 1)
*          g      dt      Θ(g)    Po(g)
*
* Po= AP*G**BP
* TM= AQ*G**BQ
*****ENDCOMMENT
CONST
  minconduc {VAL:1.E-7}
DATA
  AP {DFLT:1.0}, BP {DFLT:1.0}, AQ {DFLT:0.1}, BQ {DFLT:1.0}
  imax {DFLT:30000}
INPUT
  current, tension1, tension2, status, closecommand {DFLT:false}
  opencommand {DFLT:false}
VAR
  tension, power, tau, derc, deri, conductance, arcresis, driving
  openclose, isopening
OUTPUT
  arcresis, openclose
HISTORY
  current, status, closecommand, opencommand
INIT
  IF status=open THEN openclose:=open; conductance:=minconduc
  power:=AP*conductance**BP; tau:=AQ*conductance**BQ
  ELSE openclose:=closed; conductance:=0.1
  ENDIF
  arcresis:=recip(conductance); isopening:=false; tau:=AQ*conductance**BQ
  power:=AP*conductance**BP
ENDINIT
EXEC
  tension:=tension1-tension2
  IF status=open AND closecommand THEN conductance:= 1.0e10
  openclose:=closed; conductance:=abs(current/tension); arcresis:=recip(conductance)
  ELSIF status=closed AND opencommand THEN isopening:=true
  ENDIF
  IF isopening THEN power:=AP*conductance**BP; tau:=AQ*conductance**BQ
  IF tau <= TIMESTEP*10.0 THEN tau:= TIMESTEP*10.0
  ENDIF driving:=current**2/power
  DIFFEQ( 1.0|D0 + tau|D1 ) |conductance:=driving
  IF conductance<=minconduc THEN openclose:=open; conductance:=minconduc;
  isopening:=false
  ENDIF
  arcresis:=recip(conductance)
ENDIF
  derc:=deriv(conductance); deri:=deriv(current)*1.0e6 {MIN:-30.0,MAX:30.0}
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Figura N°3: Detalle de la sección de control para un interruptor simulado por la ecuación de Mayr con parámetros variables con la conductancia.

Para el caso de tener que simular un interruptor pero con parámetros constantes, se reemplaza el valor del exponente de (1) por cero de forma que la conductancia permanezca igual para toda la simulación; es decir, en el archivo de entrada *BP* y *BQ* iguales a cero, siendo *AP* y *BP* los valores calculados según el método elegido.

En la comparación que a continuación se muestra se ha simulado tanto la apertura exitosa del interruptor como el intento fallido para observar el comportamiento de las principales variables involucradas en el proceso; modificando al azar el valor de los parámetros.

#### 4.1.- SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL INTERRUPTOR CON PARÁMETROS CONSTANTES.

Utilizando los valores de  $P_0 = 102$  [kW] y  $\Theta = 0,63$  [μseg], se simula la apertura exitosa del interruptor en las dos figuras siguientes donde se puede apreciar la forma de la tensión, de la corriente

empleado fue  $\Delta t = 1,0 \times 10^{-8}$  [seg] y el tiempo total de simulación fue de 200 [µseg] [1]; siendo el archivo de entrada para las simulaciones el siguiente:

```

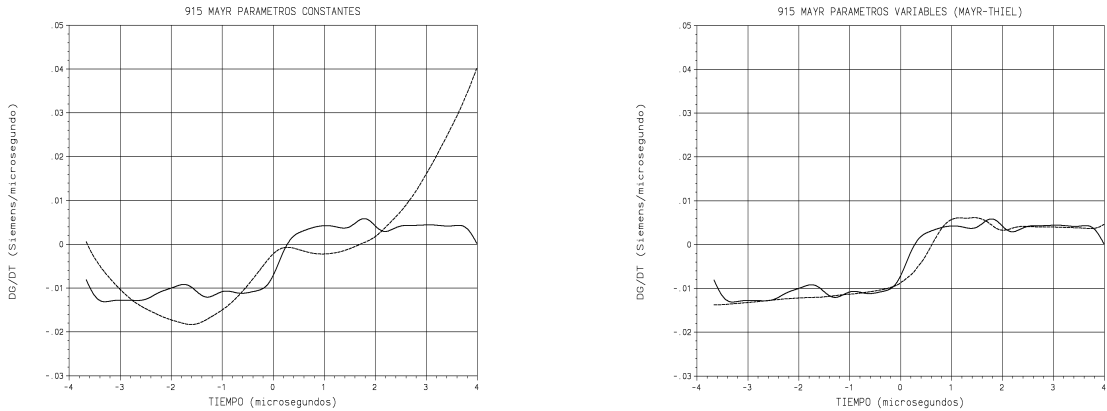
BEGIN NEW DATA CASE
c
C
C           SEMINARIO ARGENTINO DE USUARIOS DEL EMTF
C
C *****
C MISC. DATA CARDS
C
C DELTAT      TMAX      XOPT      COPT      EPSILN      TOLMAT      TSTART
C 1.E-8      2.E-4
C IOUT      IPLOT      IDOUBL      KSSOUT      MAXOUT      IPUN      MEMSAV      ICAT      NENERG
C 1000      1          1          1          1          1
C *****
MODELS
INPUT
  curr1 {i(nodec)}          -- corriente por el interruptor
  tensio1 {v(nodea)}
  tensio2 {v(nodec)}
  breakstat {switch(nodec)} -- estado abierto/cerrado del interruptor
OUTPUT
  resist      -- define el valor de la resistencia de arco
  signal      -- controla cierre/apertura del interruptor
$INCLUDE HTHIEL.MDL
USE arcresmay AS arc
DATA
AP:= 21259.849E3  -- Este es el valor de potencia calculada y si abre
BP:= 1.10084658
AQ:= 34.28869234E-6
BQ:= 0.81646509
  imax:=40000.0
INPUT -- OBS!-> a opencommand se le asigna el resultado de una exp. logica
  current:=curr1, status:=breakstat, opencommand:=(t>0);tension1:=tensio1
  tension2:=tensio2
OUTPUT
  resist:=arcresis, signal:=openclose
ENDUSE
RECORD
  arc.conductance AS conduc
  arc.power as Po
  arc.tau as tau
  arc.tension as tensio
  arc.current as corrie
ENDMODELS
C
C RAMAS =====
C NODEA1NODEA2          RRRRRRLLLLLLCCCCCC
  GEN  NODEA          15.54
  NODEA NODEB          192.2      0.15
  NODEB          33.0      0.315
  NODEB          3.2
  NODEA          8.8E-3
C
C RESISTENCIA CONTROLADA POR EL MODELO
91NODEA NODEC TACS  RESIST          3
BLANK FIN DE DATOS DE RAMAS
C
C INTERRUPTORES =====
C Este interruptor abre cuando la conductancia del arco es practicamente nula
13NODEC          CLOSED          SIGNAL 13
C Interruptor para inicializacion, se abre en el primer paso de tiempo
  NODEA          -1.  1.E-8  50000.          2
BLANK FIN DE INTERRUPTORES
c
C FUENTES =====
14GEN          138.0E3      50.  178.          -1.  1.
BLANK FIN DE FUENTES
BLANK FIN DE OUTPUTS
  GEN
BLANK FIN DE PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

Figura N°2: Archivo de entrada para el caso de parámetros variables.

### 3.- COMPARACIÓN DE MODELOS

Uno de los principales aspectos que pueden ser estudiados en la simulación del funcionamiento de un interruptor se refiere a la manera de considerar a los parámetros de las ecuaciones de los modelos ya que pueden ser considerados como constantes a lo largo de toda la simulación o bien como variables.



(a) Parámetros constantes (b) Parámetros variables

Figura N°1: Aproximación obtenida según la característica de los parámetros.

En la Figura N°1 se muestra la variación de la derivada de la conductancia, término de la izquierda de los modelos, juntamente con la aproximación que se logra al considerar los parámetros como constantes (a) para toda la simulación o como dependientes (b) de la conductancia con la forma potencial del tipo:

$$Q = A \cdot g^B \quad \text{y} \quad P_o = C \cdot g^D \quad (1)$$

siendo  $P_0 = 102$  [kW] y  $\Theta = 0,63$  [ $\mu\text{seg}$ ] para el primer caso y  $P_0(g) = 21.259,849704 \cdot g^{1,100847}$  [kW] y  $\Theta(g) = 34,288692 \cdot g^{0,816465}$  [ $\mu\text{seg}$ ] para el segundo.

### 4.- EJEMPLO.

Para poder valorar la bondad de uno u otro método de aproximación de parámetros se utilizó el circuito [5] que se muestra en la Figura N°2, para realizar la simulación del funcionamiento del interruptor.

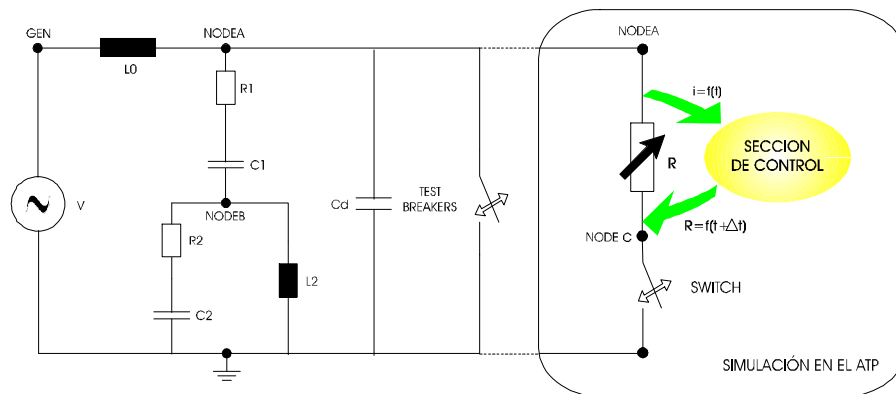


Figura N°2: Circuito utilizado en las simulaciones.

Los valores de los elementos del circuito anterior son  $R1 = 192,2$  [ $\Omega$ ],  $R2 = 33,0$  [ $\Omega$ ],  $L0 = 15,54$  [mH],  $L2 = 3,2$  [mH],  $C1 = 0,15$  [ $\mu\text{F}$ ],  $C2 = 0,315$  [ $\mu\text{F}$ ] y  $Cd = 8,8 \times 10^{-3}$  [ $\mu\text{F}$ ]. El paso de tiempo



variables involucradas a través de procedimientos matemáticos adecuados a partir de datos obtenidos de ensayos o bien de algún tipo de registro del evento.

## 2.- MODELOS BÁSICOS DEL ARCO ELÉCTRICO

Las ecuaciones más comúnmente empleadas para representar al arco eléctrico [3,4] se muestran en el cuadro siguiente, junto con las principales suposiciones que fueron realizadas en su formulación y el campo de aplicación más adecuado a su comportamiento:

MODELOS BÁSICOS DEL ARCO ELÉCTRICO		
	MODELO DE MAYR	MODELO DE CASSIE
Densidad de corriente	Variable con la distancia al eje central 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	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left( \frac{v \cdot i}{P_0} - 1 \right)$	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left( \frac{v^2}{V_0^2} - 1 \right)$
Apto para representar	Pequeñas corrientes	Grandes corrientes

Tabla N°1: Modelos básicos del arco eléctrico.

Si bien existen otras maneras de representar al arco eléctrico según el evento especial a estudiar: reigniciones, arcos elásticos, aleatoriedad, etc., todas ellas merecen estudios muy especiales que escapan a este trabajo ya que emplean en su mayoría modelos físicos o combinados que intentan detallar con precisión los procesos involucrados desde el punto de vista de equilibrios térmicos o moleculares.

A su vez, la utilización de las ecuaciones anteriores [5] plantea la necesidad de determinar los parámetros,  $Q$  y  $P_0$  para el modelo de Mayr y  $Q$  y  $V_0$  para el modelo de Cassie a partir de registros de ensayos juntamente con el empleo de métodos numéricos que posibilitan determinarlos como constantes para toda la simulación o variables con la conductancia de una forma exponencial, por ejemplo, aunque podría ser una dependencia lineal o cuadrática si se escogiera especialmente.

El modelo de Mayr es más representativo de lo que ocurre en el arco cuando la corriente está próxima al cero mientras que el modelo de Cassie lo es cuando la corriente es elevada, como se menciona en la Tabla N°1; por otra parte a ambos modelos se los puede considerar de la misma familia ya que ambos pueden ser obtenidos según el procedimiento y suposiciones hechas en [6]. Analizando las expresiones de sus ecuaciones diferenciales, se ve que son muy similares entre sí ya que ambas tienen al tiempo juntamente con una variable eléctrica íntimamente involucrada en el arco como variables independientes y dos parámetros a determinar. Esta similitud permite agruparlas como si fueran de una misma familia, de forma de realizarles las mismas consideraciones en cuanto a la metodología para la determinación de sus parámetros [6,7].

# DISCUSIÓN SOBRE LA REPRESENTATIVIDAD DE LOS MODELOS MÁS COMUNES DEL ARCO ELÉCTRICO.

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:

Es práctica habitual utilizar algún modelo de arco eléctrico para simular el funcionamiento de un interruptor extrapolando su comportamiento a alguna otra situación, tomando algunas consideraciones especiales respecto al funcionamiento interno del arco eléctrico.

Para disminuir estas suposiciones aquí se presentan los modelos más utilizados en la literatura, que se basan en la aplicación de la ecuación de O. Mayr para simular al arco eléctrico en la sección "Models" del Alternative Transient Program (ATP).

En este trabajo se muestra la aplicación del modelo de Mayr con parámetros constantes y también con parámetros variables con la conductancia, entregándose los archivos de control inclusive; ya que representa mejor el paso por cero de la corriente, mientras que para regiones alejadas del cero es aplicable el modelo propuesto por A. Cassie.

Para demostrar la utilidad del modelo de Mayr se simula el funcionamiento de un interruptor de SF6 de 145 kV en un circuito de ensayo para el caso de apertura exitosa y para la "apertura fallida", haciendo hincapié en la evolución de las variables internas del modelo y en las variables eléctricas del circuito asociado.

**Palabras clave:** Arco eléctrico, Simulación, EMTP, ATP, Transitorios Electromagnéticos, Reignición, SF6.

## 1.- INTRODUCCIÓN:

La utilización del ATP para representar estados transitorios requiere conocer "a priori" los procesos físicos involucrados y también se necesita establecer el grado de precisión para el cual se desean obtener resultados más o menos acordes con la realidad. Así, el usuario, se encuentra con diversas posibilidades de representación del interruptor que van desde el convencional, apto para estudios de TTR (Tensión Transitoria de Restablecimiento) hasta el tipo de resistencia variable controlada desde la sección de TACS o Models para aquellos estudios avanzados sobre el arco eléctrico o de la mutua influencia arco-red; pasando por los interruptores de medición, estadísticos, sistemáticos y controlados por tensión, usados generalmente por un motivo en particular [1,2].

La técnica de modelización de interruptores utilizando "cajas negras" se basa en el empleo de una ecuación diferencial en la sección de control del ATP para representar algún evento en especial a través de ella, para esto primero hay que seleccionar la ecuación y luego determinar todas aquellas