

2.8.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 2

- [1] M. Cortes Cherta, Curso de Apararmenta Eléctrica, Curso 90-91, Merlin Gerin, 1990.
- [2] C.H. Flurschein, Power circuit breakers theory and design, Peter Peregrinous Ltd, Second Edition, 1982.
- [3] L.A. Siegert, Alta Tensión y Sistemas de Transmisión, Editorial Limusa S.A., 1988.
- [4] J. Martinez Velazco, “Representación Avanzada de Interruptores mediante el EMTP”. 4^{tas} Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, Porto, Potugal, Julio 1995, pp. 253-260.
- [5] CIGRE, Working group 13.01: “Practical application of arc physics in circuit breakers. Survey of calculation methods and application guide”. ELECTRA-CIGRE, N° 118, May 1988, pp. 64-79.
- [6] CIGRE, Working group 13.01: “Applications of black box modelling to circuit breakers”. ELECTRA-CIGRE, N° 149, August 1993, pp. 40-71.
- [7] L. Dubé, I. Bonfanti, “Models: A New Simulation Tool in the EMTP”. European Transactions on Electrical Power Engineering/ETEP, vol.2, N°1, January-February 1992, pp. 45-50
- [8] M. Kizilcay, T. Pniok, “Digital simulation of fault arcs in power systems”. European Transactions on Electrical Power Engineering/EETEP, vol.1, N°1, January-February 1991, pp. 55-60.
- [9] W. Gimenez, O. Hevia, “Metodología para la modelización del arco eléctrico a partir de oscilogramas de ensayos”. III Seminario Argentino de usuarios del EMTP, 26 y 27 de Noviembre de 1998, Buenos Aires, Argentina.
- [10] G. Voigt, "Current chopping phenomena in SF6 selfblast circuit breakers". European Transactions on Electrical Power Engineering / ETEP vol 3, N°6. November-December 1993, pp. 437-442.
- [11] L. Van Der Sluis, W. Rutgers, “The Comparison of Test Circuits with arc models”. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 10, N°1, January 1995, pp. 280-285.
- [12] L. Van Der Sluis, B.L. Sheng, “The influence of the arc voltage in synthetic test circuits”. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 10, N°1, January 1995, pp. 274-279.
- [13] K. Nakanishi, Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers, Marcel Dekker Inc, 1991.
- [14] K. Ragaller, Current Interruption in High-Voltage networks, Plenum Press, 1977.
- [15] H.W. Dommel, T. Lui, CanAm EMTP User Group, EMTP Rule Book, Vol 1 y 2, 1995.
- [16] H.W. Dommel, CanAm EMTP User Group, EMTP Theory Book, BPA, 1987.
- [17] Grupo de Investigación de Sistemas Eléctricos de Potencia GISEP-CAUE, Introducción al uso del EMTP, Universidad Tecnológica Nacional Fac. Reg. Santa Fe, 1997.
- [18] R. Bianchi Lastra, Manual de uso del ATP, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería, Octubre 1991.
- [19] Department of Engineering Professional Development, College of Engineering, Introduction to the Electromagnetic Transients Program, University of Wisconsin-Madison/Extension, 1997.
- [20] H. Dommel, “Modelación y Cálculo de Transitorios en Sistemas Eléctricos”. Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1998.
- [21] Grupo de Investigación de Sistemas Eléctricos de Potencia GISEP-CAUE, Curso avanzado para usuarios EMTP, Universidad Tecnológica Nacional Fac. Reg. Santa Fe, 1995.
- [22] L Dubé, “Users Guide to MODELS in ATP”. April 1996.
- [23] J.A. Martinez Velasco, “Aplicaciones del código Models”. 2^{das} Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, Julio 1991, Coimbra, Portugal.

grupos de usuarios organizados en comités en todo el mundo que mantienen su desarrollo de forma continua, se lo escogió como herramienta de trabajo para realizar las simulaciones que se presentarán en capítulos posteriores.

Para finalizar, los ejemplos de interruptores que se han presentado en este capítulo son todos aquellos que el ATP posee incluidos dentro de su estructura, lo que trae como consecuencia que si el usuario necesita realizar algún estudio en particular como lo es el trabajo que se desarrollará en esta tesis, se deberá profundizar en aquellas nuevas herramientas que trae incorporadas como lo son las secciones de control TACS o MODELS.

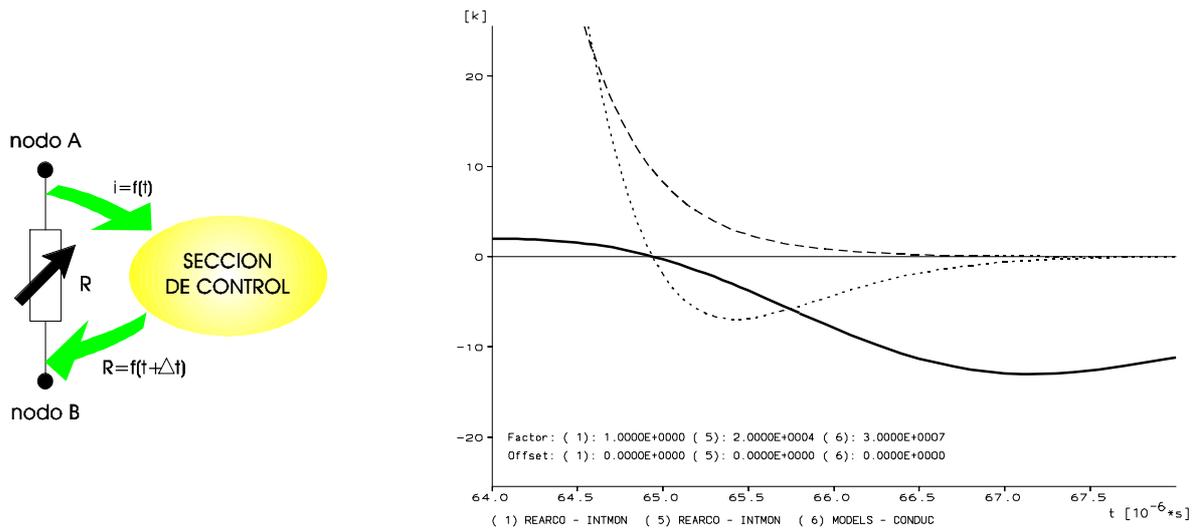


Figura N°2-9: Funcionamiento de un interruptor controlado por MODELS en el ATP.

El proceso de control sobre la resistencia se basa en la resolución del conjunto de ecuaciones diferenciales que describe la red para el tiempo t , luego se calcula el valor de la resistencia según una ley de variación predeterminada en la sección de control a través de una sucesión de secuencias lógicas, luego de las cuales se impone el resultado al paso siguiente de cálculo en $t = t + Dt$. Este proceso se repite a lo largo de toda la simulación y en cada intervalo de tiempo.

El grado de representatividad de la simulación está en gran medida determinado por la calidad de la ecuación escogida para relacionar las variables involucradas en el modelo como veremos en los capítulos posteriores.

2.7.- CONCLUSIONES

En este capítulo, donde se presentó al arco eléctrico como el principal objeto de estudio en los interruptores de potencia, se pudo observar las diferentes técnicas más usuales para su representación y el análisis de su campo de aplicación en una red de potencia. Si bien las técnicas descritas tienen objetivos similares, la elección de alguna de ellas dependerá tanto del problema a resolver como de los medios con que se cuente a la hora de iniciar el análisis ya que cada una de ellas tiene sus propias ventajas e inconvenientes que deberán ser tenidas en cuenta al momento de escoger alguna.

Evidentemente, como todo cálculo en ingeniería, la habilidad del usuario de cualquier técnica también influye a la hora de escoger un camino para la resolución de un problema en particular.

Para el desarrollo de este trabajo se ha escogido la técnica de simulación mediante cajas negras sumado al uso del ATP. La elección esta combinación fue a consecuencia de tener la posibilidad de poseer registros oscilográficos de ensayos reales sobre distintos tipos de interruptores y a diferentes niveles de tensión, que fueran cedidos por un tercero u obtenidos a través de ensayos propios. Por otra parte como el ATP es de distribución gratuita y de amplia aceptación en el ámbito universitario y en empresas de primer nivel, sumado a que cuenta con

2.6.4.- INTERRUPTOR SISTEMÁTICO

En este caso, el ATP efectúa una gama de simulaciones operando el interruptor según un programa de tiempos que están determinados por el usuario y son producto del estudio a desarrollar. Su uso está limitado a pocos casos particulares

2.6.5.- INTERRUPTOR DE MEDICIÓN

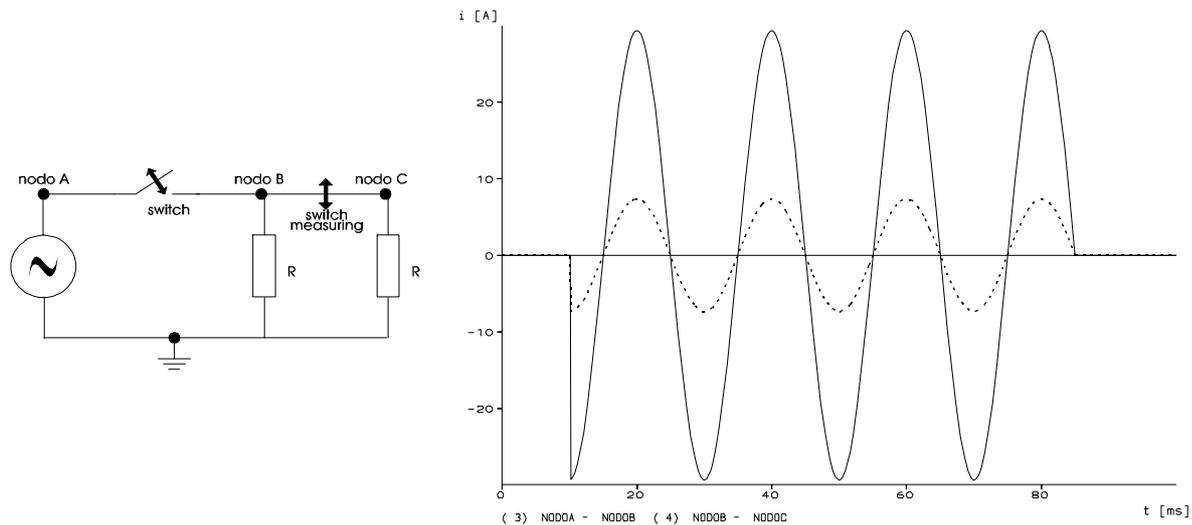


Figura N°2-8: Funcionamiento de un interruptor de medición en el ATP.

Por definición dentro del ATP, un interruptor de medición está permanentemente cerrado aún en estado estacionario antes del comienzo de la simulación, donde se determinan las condiciones de inicio de la misma, y se utiliza para la medición de corriente o de potencia y energía en lugares donde no es posible realizarla con otras opciones.

En la simulación realizada como ejemplo, se compara la corriente total aportada por la fuente con la que circula del *nodo B* (línea continua) al *nodo C* (línea punteada), siendo los tiempos de cierre y de apertura del interruptor principal, iguales a los empleados en el ítem 2.6.1.

2.6.6.- INTERRUPTOR CONTROLADO

Para ejemplificar sobre el funcionamiento de un “interruptor controlado” desde la sección de MODELS del ATP [4,7,8,22], se reproduce un caso para el estudio de la variación de la conductancia del arco eléctrico durante la apertura del interruptor que está simulado como una resistencia variable cuyo valor está calculado a cada paso de tiempo.

En la simulación que aquí se presenta se observa la variación de la conductancia g del arco eléctrico, en línea de puntos y multiplicada por $3 \cdot 10^7$, alrededor del cero de corriente i multiplicada por $2 \cdot 10^4$, en línea de trazos, según la expresión:

$$g + \Theta \left(\frac{dg}{dt} \right) = \frac{i^2}{p}$$

siendo Θ la constante de tiempo del arco y p la pérdida de potencia en estado estacionario. La tensión en el arco está graficada en línea continua.

2.6.2.- INTERRUPTOR CONTROLADO

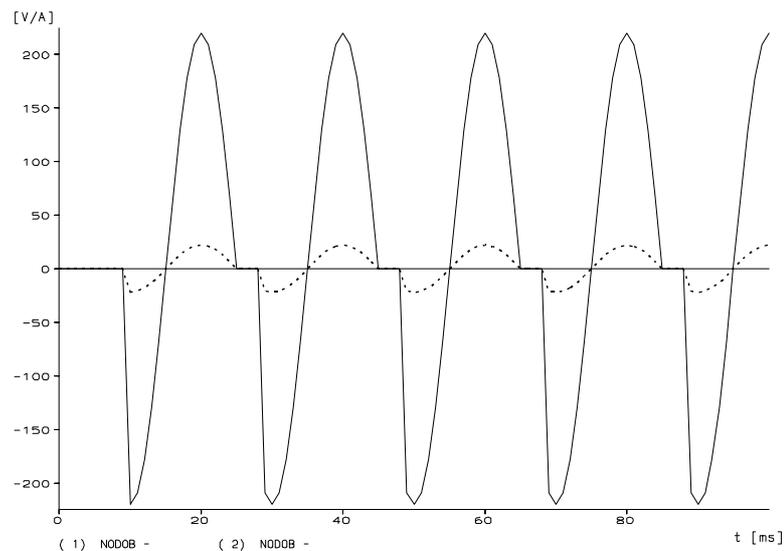


Figura N°2-7: Funcionamiento de un interruptor controlado en el ATP.

El circuito utilizado para la simulación es igual al de la figura 2-6. Aquí el interruptor controlado está inicialmente abierto y cierra sus contactos para $t_{close} = 10$ [mseg] aunque el cierre se hará efectivo únicamente cuando la tensión entre sus contactos supere un umbral previamente elegido e igual a 180 [V]. Luego permanece cerrado un tiempo predeterminado luego del cual abrirá permaneciendo activa esta secuencia de “cierre-espera-apertura” hasta el final de la simulación repitiéndose el mismo ciclo cada vez. La línea continua representa la tensión del *nodo B* y la punteada la corriente. Este modelo de interruptor es útil por ejemplo, para simular la acción de un explosor sobre una línea de transmisión.

2.6.3.- INTERRUPTOR ESTADÍSTICO

El interruptor estadístico pretende simular la operación real de un interruptor en lo que se refiere a los tiempos de actuación y discordancia entre polos, pero no la representación real del proceso de interrupción.

Para efectuar estudios de sobretensiones en sistemas de alta tensión por conexión de otras líneas debe efectuarse una cantidad apreciable de simulaciones de tales maniobras, con diferentes tiempos de actuación de interruptores, para considerar las distintas condiciones de la operación con respecto al ciclo de la onda de tensión. Para ello el ATP dispone de un mecanismo de actuación sobre los interruptores de forma tal que en un solo archivo de datos es posible operar un interruptor con tiempos aleatorios, con un valor promedio y una desviación normal o uniforme dada. También es posible considerar varios interruptores estadísticos en el mismo caso (por ejemplo, los tres polos de un interruptor) ya sean independientes (lo más común) o con tiempos dependientes con un interruptor como maestro y los restantes como esclavos.

Aquí el resultado no es una simulación en sí sino una tabla con valores de tiempos de cierre y magnitudes de sobretensiones.

En gran medida la calidad de la representación de un interruptor depende en mayor grado de la experiencia del operador y de su capacidad, que de las recomendaciones que se puedan realizar al respecto. A pesar de esto, la utilización de interruptores ordinarios se realiza de manera habitual para el estudio de los fenómenos que ocurren fuera de sus bornes o sea, en el resto de red eléctrica donde está instalado. La tabla 2-3 muestra un resumen de las posibilidades más habituales de interruptores ordinarios.

Por su parte, el uso de interruptores controlados queda reservado a aquellos estudios donde el principal protagonista es el propio interruptor. En estos interruptores controlados, su accionar está gobernado desde una sección de control, que puede ser TACS o MODELS [21-23] según sea el caso, y satisface una serie de secuencias lógicas de operación especificadas dentro de esta sección de control.

2.6.- EJEMPLOS DE UTILIZACIÓN DE INTERRUPTORES EN EL ATP

Para ejemplificar sobre el empleo de cada uno de los tipos disponibles de interruptores en el ATP, a continuación se darán ejemplos de los casos más representativos de utilización, sin que estos usos impliquen alguna restricción en este sentido. También se realizará una simulación para cada caso y se presentarán los resultados obtenidos.

2.6.1.- INTERRUPTOR CONVENCIONAL

En la figura 2-6 se muestra el circuito utilizado y el resultado de la simulación.

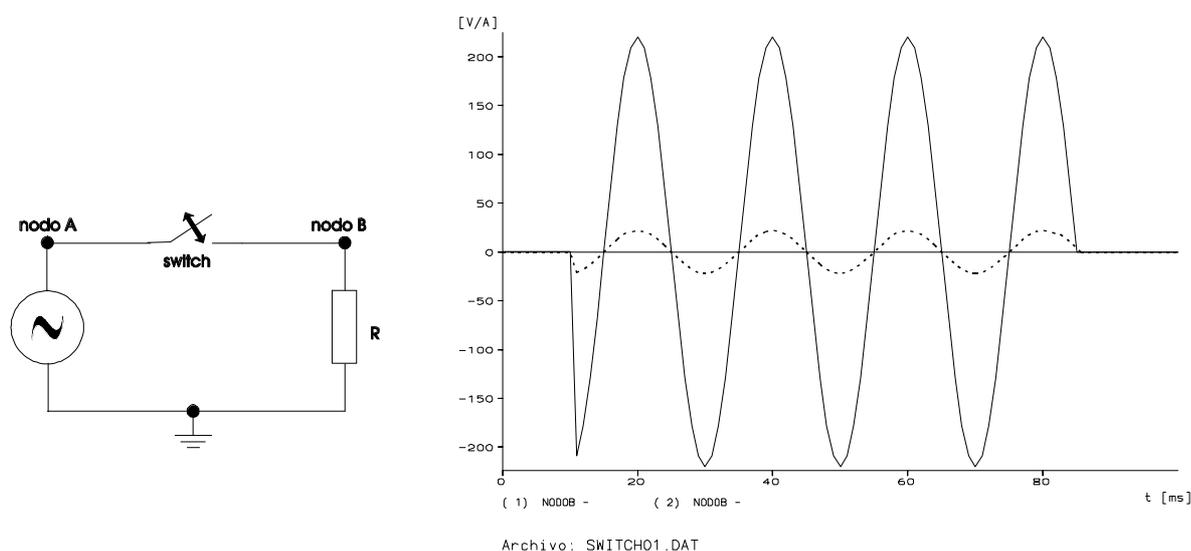


Figura N°2-6: Funcionamiento de un interruptor convencional en el ATP.

En la parte izquierda de la figura anterior se puede observar el circuito eléctrico que utiliza un interruptor convencional para cortar una corriente que circula a través de una resistencia. Aquí se “ordenó” al interruptor que cerrara para $t = 10$ [mseg] y que abriera para $t = 80$ [mseg]. A la derecha está el resultado de la simulación: la línea continua es la tensión respecto de tierra del *nodo B* y la línea de puntos la corriente en la resistencia R. También se puede apreciar como se “cumple” la condición de que el interruptor cierre en t_{close} y abra para el primer paso por cero luego de cumplido el tiempo t_{open} , a los 85 [mseg] aproximadamente.

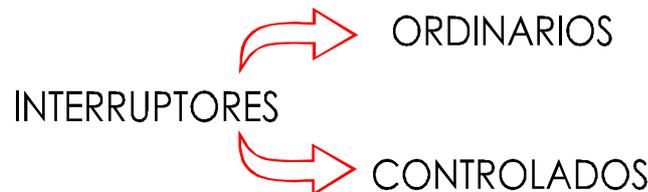
quiere analizar, para cada intervalo de tiempo definido por el usuario durante todo el tiempo de simulación escogido. Para esto, el ATP utiliza la regla de integración trapezoidal sobre las ecuaciones que describen el comportamiento del sistema.

El archivo de datos de entrada del programa incluye el tiempo total de simulación, el intervalo de tiempo escogido, las peticiones de variables de salidas a ser analizadas y el conjunto interconectado de componentes que constituyen el modelo del sistema a representar. Como resultado de la ejecución el programa, éste provee los valores de las variables escogidas a cada paso de tiempo durante todo el proceso de simulación que luego deben ser graficados, impresos o almacenados como archivos para su posterior tratamiento.

Finalmente, la elección de un modelo u otro para representar cualquier elemento o conjunto de ellos de una red, debe ser elegido dependiendo del fenómeno específico a estudiar, ya que es fácil llegar a resultados erróneos causados por la mala elección del modelo o incorrecta utilización del mismo.

2.5.- REPRESENTACIÓN DE INTERRUPTORES EN EL ATP

Actualmente en el ATP coexisten dos formas de representar al interruptor, a saber:



que en función del grado de complejidad deseado o el objetivo final perseguido puede ser recomendable el uso de uno u otro en particular.

TIPOS DE INTERRUPTORES ORDINARIOS EN EL ATP	
Convencionales:	El interruptor abrirá al primer paso por cero posterior al tiempo de apertura escogido por el usuario y cerrará sin condiciones al tiempo elegido.
Controlados por tensión:	Este interruptor inicialmente esta abierto, cerrará para un $t > t_{close}$ y una vez que la tensión supere la especificada permaneciendo cerrado un tiempo escogido, luego abrirá
Estadísticos:	Es un interruptor cuyo tiempo de cierre es aleatorio permaneciendo cerrado el resto de la simulación.
Sistemáticos:	Para el cual el tiempo de cierre esta espaciado regularmente entre tiempos escogidos.
Para medición:	Esta siempre cerrado y sirve para medir los parámetros eléctricos.

Tabla N°2-3: Posibilidades de representación de interruptores en el ATP.

TECNICAS DE ESTUDIO DE INTERRUPTORES			
TIPO DE PROBLEMA	ETAPA DE APLICACIÓN		
	Desarrollo	Prueba	Operación
Comprensión de procesos físicos	MF		
Dimensionamiento mecánico	MF	CD	
Descripción de la recuperación del dieléctrico	MF y CD	CD	CD
Influencia del arco sobre la corriente	MF, CD y BB	CD y BB	BB
Interruptores de HVDC	MF, CD y BB	CD y BB	CD y BB
Pequeñas corrientes inductivas	MF, CD y BB	CD y BB	CD y BB
Falta kilométrica	MF, CD y BB	CD y BB	CD y BB
Diseño y verificación de circuitos de prueba	CD	BB	

Tabla N°2-2: Campo de aplicación de las técnicas de estudio aplicables a interruptores

Siendo: “MF” modelo físico del arco.

“CD” curvas y diagramas característicos.

“BB” los modelos de arcos según cajas negras.

2.4.- EL EMTP/ATP

El Electromagnetic Transients Program (EMTP) [15-20] y su versión actual el Alternative Transients Program (ATP) es un programa digital que permite simular procesos transitorios electromagnéticos, electromecánicos y de sistemas de control en sistemas eléctricos polifásicos de potencia. Los estudios más habituales son: transitorios de maniobras, impulsos atmosféricos, coordinación de protecciones, sollicitaciones torcionales de ejes, ferromagnética, análisis de armónicos, arranque de motores, sistemas de control y sistemas en alta tensión en corriente continua (HVDC), entre muchos otros posibles.

El funcionamiento del programa se basa en la resolución del conjunto de ecuaciones algebraicas diferenciales, que representan a cada uno de los elementos de la red eléctrica que se

Como se puede apreciar la aplicación de este tipo de análisis puede llegar a ser muy conveniente si es que se está estudiando un caso de características similares al encontrado en la literatura o si se realiza un grado de simplificación similar, en caso contrario se deberán realizar los experimentos pertinentes para obtener el grado de certeza deseado, lo que conlleva un notable incremento en la labor a realizar.

2.2.4.- VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS TÉCNICAS DISPONIBLES

Las ventajas de usar un modelo del tipo caja negra son que permite encontrar las curvas límites de utilización de los interruptores en base a los ensayos realizados. Con ellos es posible describir la influencia de la red eléctrica sobre el arco y estudiar su comportamiento para variaciones del circuito, como ser la inclusión de resistores de cierre o capacitancias en paralelo. También es posible obtener algunas propiedades estadísticas al analizar varios juegos de ensayos y es posible utilizarlos en aplicaciones especiales como lo es la determinación de la influencia de la red durante el período de alta corriente, o la modelización de sus inestabilidades, entre otras más. Sus inconvenientes más notorios son la necesidad de realizar ensayos para obtener los oscilogramas que luego permitan hallar las ecuaciones matemáticas que describen el arco y principalmente el costo de estos ensayos, que es de varios miles de dólares para interruptores de alta tensión. Otra dificultad es la necesidad de manejar algún programa de simulación para poder reproducir no sólo el ensayo realizado, con el fin de verificar el comportamiento del modelo, sino también para poder realizar las extrapolaciones necesarias hacia otras situaciones o comportamiento de la red eléctrica.

Para los modelos físicos del arco cuyas ecuaciones fueron descritas, la cantidad de parámetros a determinar para poder utilizarlos correctamente los hacen prácticamente inaplicable para la gran mayoría de posibles usuarios, quedando limitada su utilización a aquellos grandes laboratorios capaces de descifrar la casi veintena de variables involucradas en el conjunto de ecuaciones. Su principal aplicación se debe al entendimiento de los procesos físicos que el arco involucra y a la posibilidad de valorar cuantitativamente su comportamiento lo que lo hace principalmente utilizable para aquellas personas que se dedican al diseño y prueba de interruptores de potencia.

La utilización de diagramas para el estudio del funcionamiento de interruptores posee la ventaja de resumir las propiedades físicas del arco junto con los aspectos inherentes a la red eléctrica y con ello, muchos problemas en la determinación del campo de aplicación de un interruptor pueden ser solucionados fácilmente. No obstante, la necesidad de realizar numerosos ensayos para hallar las curvas límites dieléctrica y térmica del interruptor, vuelven este método de aplicación similar a los anteriores perdiéndose la ventaja de la simpleza del análisis.

2.3 CAMPO DE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DISPONIBLES

Si bien las distintas técnicas de estudio de interruptores pueden ser utilizadas para determinados casos [4,6,13] aquí se presenta el campo de aplicación más común para cada una de ellas, según las recomendaciones de la bibliografía disponible actualmente:

Haciendo mediciones del rango de aumento de la tensión para dos tipos de interruptores distintos, uno en aire y otro en SF6 bajo idénticas condiciones en [14], se tiene una gráfica de la relación anterior que permite predecir dicho valor para otro rango de corrientes distinto que el ensayado.

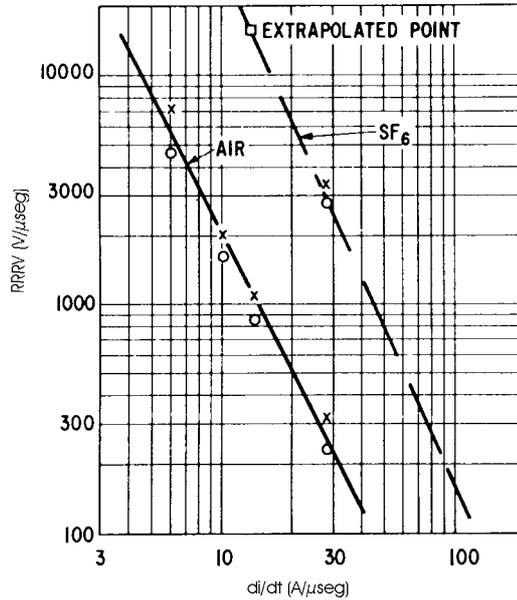


Figura N°2-4: Comparación de las $RRRV=f(di/dt)$ para el aire y el SF6.

Al igual que la descripción anterior también se puede obtener una gráfica de la relación

$$\frac{du}{dt} \approx p^n$$

que muestra la dependencia de la variación de la tensión de recuperación respecto de la presión del gas aislante y que se grafica como,

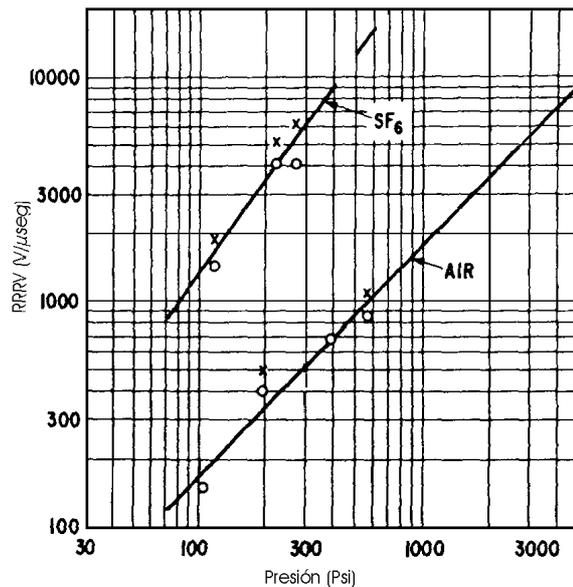


Figura N°2-5: Comparación de las $RRRV = f(p)$ para el aire y SF6.

para una variación de corriente de 13,5 [A/μs].

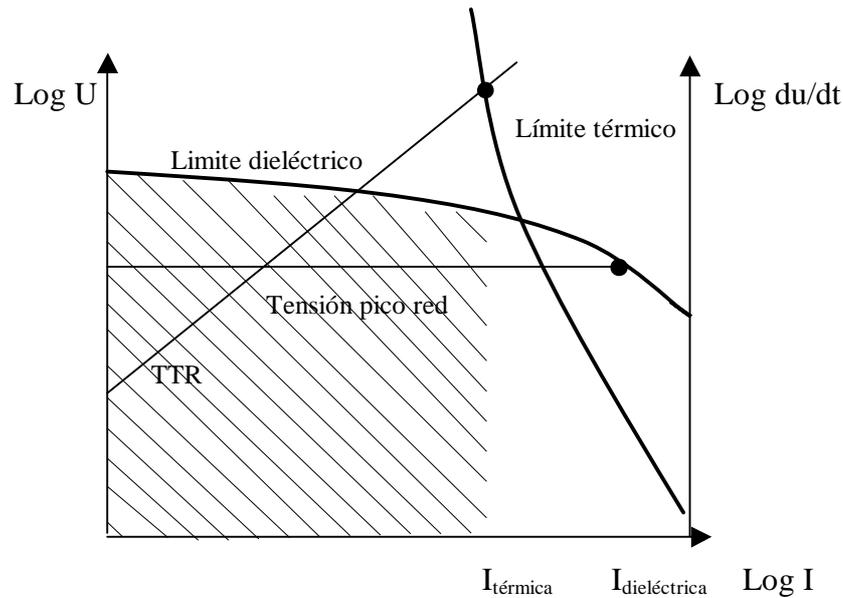


Figura N°2-3: Determinación del límite de operación exitosa del interruptor.

Las dos curvas que caracterizan al interruptor están representadas por líneas gruesas en la figura anterior mientras que las líneas finas, caracterizan la red eléctrica. Las líneas continuas representan el comportamiento dieléctrico del interruptor y la línea a trazos, el comportamiento térmico.

Varias situaciones diferentes pueden ocurrir dependiendo de las posiciones relativas entre ambas intersecciones. En el ejemplo, la intersección de ambas líneas continuas, que determina la máxima corriente admisible I_d sin provocar un colapso del dieléctrico del interruptor, resulta de un valor superior al límite I_t determinado por el comportamiento térmico del conjunto red-interruptor. Esta situación origina un área de aplicación del interruptor limitada por el valor máximo de la corriente térmica y por la característica dieléctrica propia del interruptor, que está representada por el área a rayas de la figura 2-3.

Para otra posición en la red u otro tipo de interruptor en donde la corriente límite dieléctrica sea inferior a la corriente límite térmica, el área de aplicación estará ahora determinada por el valor máximo de corriente que es capaz de soportar el interruptor sin tener falla de origen dieléctrico.

También existen otros tipos de diagramas y curvas que sirven para predecir el comportamiento del interruptor para otras condiciones de utilización. Así podemos ver [14] cómo se utiliza la relación

$$rrrv_{critica} \approx \frac{1}{\left(\frac{di}{dt}\right)^m}$$

obtenida experimentalmente relacionando la máxima velocidad de aumento de la tensión en bornes del interruptor ($rrrv_{critica}$), luego del paso por cero de la corriente y sin producir renacimiento del arco, en función de la rapidez de cambio de la corriente, con un exponente m que depende del proceso de apagado del arco.

del interruptor luego del paso por cero de la corriente, ya que esta condición es la más desfavorable para el medio aislante.

La curva gruesa de la figura 2-2 representa el comportamiento del medio aislante y define dos regiones: la superior corresponde al colapso dieléctrico del interruptor mientras que la inferior representa la operación exitosa del mismo. Dibujada como una línea fina, se encuentra la representación de la máxima tensión que el circuito es capaz de imponer en bornes del interruptor y que es independiente de la corriente que circula por él.

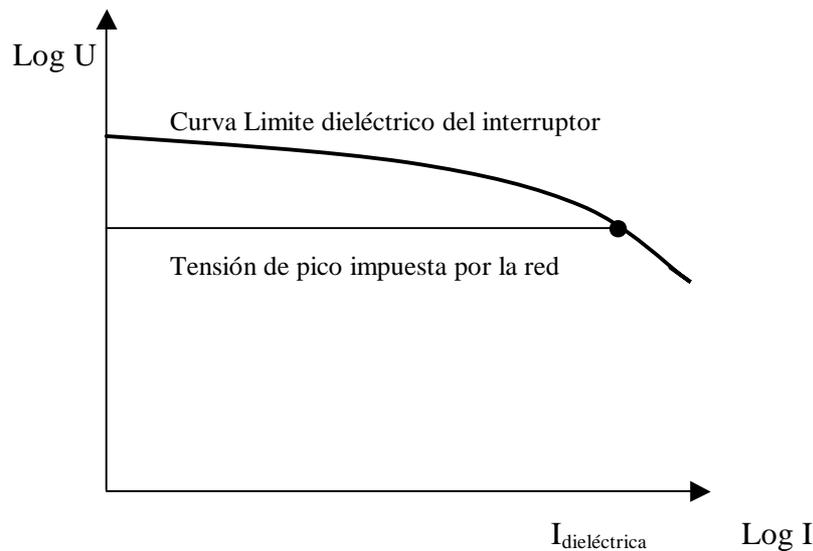


Figura N°2-2: Determinación del límite de reignición dieléctrica del interruptor.

La intersección de ambas curvas en la figura anterior determina la máxima corriente que el interruptor es capaz de soportar sin sufrir una reignición del tipo dieléctrico.

Para definir el campo de aplicación de un interruptor de potencia dentro de una red eléctrica, hay que tener en cuenta la posibilidad de ocurrencia de fallas de origen térmico y de origen dieléctrico de forma simultánea; lo que da origen a la necesidad de superponer las dos figuras anteriores para obtener un área de comportamiento satisfactorio del interruptor. Dicha superposición se muestra en la figura siguiente.

2.2.3.- MODELOS BASADOS EN DIAGRAMAS

La capacidad de interrupción de un interruptor de potencia depende primeramente del tipo de gas que tenga dentro de la cámara de interrupción, de la presión y temperatura a la que se encuentre éste y también del flujo del gas durante la apertura. Estas dependencias se las puede relacionar dentro de una forma matemática y esto permite representarlas en un diagrama. Lo mismo ocurre con el incremento de la tensión impuesta por el circuito a los bornes del interruptor [14] que también se puede dibujar en el mismo diagrama.

De esta manera se comienza con el estudio de la utilización de un interruptor de potencia para ser colocado en un punto específico de la red de potencia, para lo cual hay que conocer las características propias tanto del interruptor como las de la red eléctrica en el punto de utilización del interruptor.

Graficando las características antes mencionadas en escala doble logarítmica se tiene la figura 2-1 en donde se puede apreciar en línea fina la Tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR) impuesta por el circuito, por ejemplo para el caso de un defecto kilométrico y en línea gruesa, la curva que define el límite de la ocurrencia o no del renacimiento del arco por reignición térmica. El área por encima de la curva gruesa corresponde a la región de la reignición térmica del intento de interrupción, mientras que el área que se encuentra por debajo de la línea se corresponde con la apertura exitosa de un interruptor.

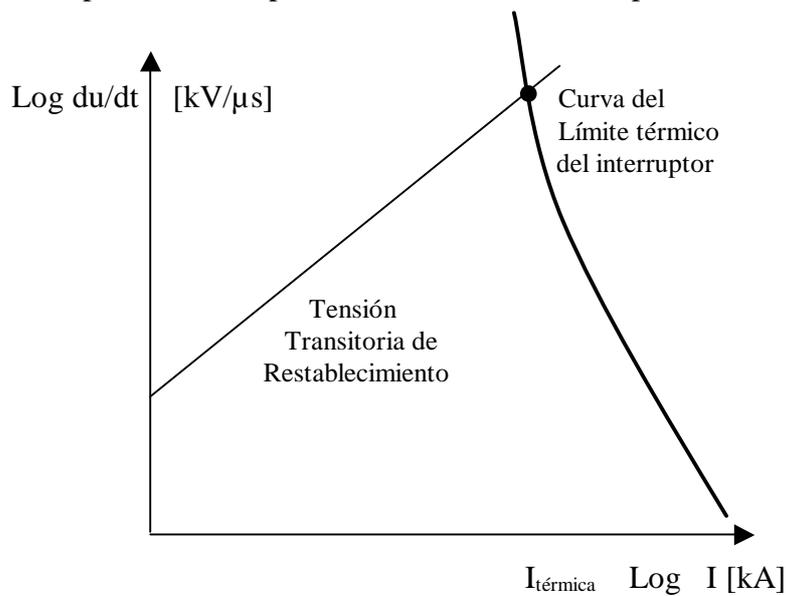


Figura N°2-1: Determinación del límite de reignición térmica del interruptor.

El punto de intersección de la recta que representa al comportamiento de la red con la curva que representa al interruptor, determina la máxima corriente que el interruptor es capaz de interrumpir de forma satisfactoria. Si se utiliza otro tipo de interruptor o se lo emplea en otra sección de la red de potencia, habrá que repetir los pasos anteriores para definir el nuevo límite de interrupción térmica.

Como se mencionó anteriormente, también existe la reignición del arco eléctrico debido al colapso de las propiedades dieléctricas del medio aislante que se verifica luego de transcurridos algunos microsegundos luego del paso por cero de la corriente. A diferencia del caso anterior donde se tenía sólo en cuenta la velocidad de crecimiento de la onda de tensión, a menor velocidad le correspondía un incremento en el valor límite de corriente soportada, aquí se debe considerar el valor máximo de tensión que el circuito es capaz de aplicar en los bornes

De esta manera se deberán tener en cuenta las formas de transmisión de calor desde el arco al medio, por movimiento “térmico” en las cercanías del arco, por transferencia de energía térmica que es proporcional a la conductividad térmica del medio aislante y también la transferencia de energía por radiación. Presión, densidad, velocidad, entalpía del gas deberán ser conocidos juntamente con la intensidad del campo eléctrico, conductividad eléctrica y térmica, además de la distribución de las temperaturas reinantes.

Otros modelos físicos del arco eléctrico [11,12] se basan en la división de arco para antes y después del paso por cero de la corriente. Antes del cero, la resistencia del arco $R_{arco} = l/g$ se calcula a partir de una ecuación diferencial que relaciona la conductancia del arco g con dos parámetros: presión del gas $P(i)$ que es función de la corriente y una constante de tiempo Θ y tiene la forma general siguiente:

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

Luego del cero de corriente, la resistencia del arco se calcula en relación a la densidad de partículas cargadas (electrones, iones positivos y negativos) en un cilindro de gas caliente que se va enfriando, a partir de la densidad inicial de electrones calculada de la fórmula anterior para el cero de corriente. La conductividad del canal, supuesto uniforme de longitud L y radio r , cambia debido a la modificación en la densidad de electrones N_e causada por: difusión \mathbf{g} recombinación de iones con electrones \mathbf{b}_{e-i} , acoplamiento \mathbf{h} , e ionización \mathbf{a} . También la densidad de iones N_+ y N_- varía con el tiempo. Si se asume la neutralidad de carga entonces la variación del número de electrones es expresada por:

$$\frac{dN_e}{dt} = -\mathbf{g}N_e - \mathbf{b}_{e-i} \cdot N_e \cdot N_i + \mathbf{a}_{eff} \cdot |V_{dr}| \cdot N_e$$

mientras que la variación en la densidad de iones negativos es:

$$\frac{dN_-}{dt} = -\mathbf{a}_{eff}^{min} \cdot |V_{dr}| \cdot N_e - \mathbf{b}_{i-i} \cdot N_- \cdot N_+$$

siendo entonces la cantidad de iones positivos:

$$N_+ = N_e + N_-$$

Cuando una tensión está aplicada al canal, las partículas cargadas son arrastradas por un campo eléctrico $E = V/L$. La conductividad puede ser expresada por:

$$G = C_e \cdot N_e \cdot \frac{T}{p} \cdot \frac{r^2}{L} + C_i \cdot (N_+ + N_-) \cdot \frac{T}{p} \cdot \frac{r^2}{L}$$

en la cual T es la temperatura del gas y p su presión, C_i y C_e constantes dependientes de la composición del gas. El resto de los parámetros intervinientes son en general dependientes del tiempo, de la temperatura del gas o del campo eléctrico.

parámetros mediante técnicas adecuadas a oscilogramas de tensión y de corriente de ensayos ya realizados.

- ▷ Modelos físicos de arcos, que incluyen una descripción física en detalle de los procesos involucrados en el corte de corriente calculados a partir de leyes de conservación de la energía y teniendo en cuenta las propiedades físico-químicas del gas aislante y modelos detallados de mecanismos de intercambio de calor por convección y conducción mayoritariamente.
- ▷ Modelos basados en fórmulas y diagramas que establecen el campo de aplicación del interruptor en base a diagramas que se obtienen a partir de ensayos o cálculos realizados en base a alguno de los dos modelos anteriores.

Cada uno de estos modelos presenta ventajas y desventajas dependiendo de la aplicación para la cual hayan sido escogidos. Para el análisis de procesos transitorios mediante simulación digital el modelo de caja negra es el más adecuado y será explicado a continuación de forma general dejándose para un capítulo posterior, su análisis en particular [4].

2.2.1.- MODELOS TIPO “CAJA NEGRA”

Este tipo de modelo consiste en describir el arco eléctrico usando una ecuación diferencial que relaciona sus parámetros eléctricos más relevantes, obtenidos a partir de ensayos que se realizan en laboratorios a los que se le suman técnicas matemáticas para hallar las incógnitas que surjan de la formula elegida [4-10].

La técnica en el uso de estos modelos se basa en que el circuito analizado “no ve” qué es lo que hay dentro de “esa” caja que se está simulando, ya que sólo obtiene una respuesta en función de una excitación que esta gobernada por la ecuación diferencial empleada. Así visto, un modelo de este tipo, sólo busca encontrar la mejor y más adecuada relación matemática que pueda representar al proceso dentro del campo de aplicación más amplio que se pueda encontrar. Entonces, el principal objetivo es tratar de predecir la conducta del arco sin interesar los procesos físicos y químicos que están involucrados dentro de él.

Los pasos a seguir para este tipo de modelo son, primeramente, realizar ensayos sobre un interruptor para obtener oscilogramas de corriente y de tensión. Con ellos hay que trabajar para encontrar los parámetros de la ecuación diferencial que se desee utilizar, para finalizar realizando los ajustes necesarios o tomar las suposiciones que sean valederas para determinar el campo de aplicación del modelo. Luego, y con el conocimiento del circuito eléctrico utilizado durante los ensayos, se deben realizar simulaciones numéricas con el fin de poder conocer el campo de aplicación del interruptor ensayado, a través de la obtención de sus curvas límites de aplicación.

2.2.2.- MODELOS FÍSICOS DEL ARCO ELÉCTRICO

La utilización de éste tipo de modelo [11-14], requiere la descripción pormenorizada de los procesos físicos internos del arco eléctrico, para lo cual hay que utilizar las ecuaciones de balance de energía, balance de masa o de continuidad y balance del momento, a las que hay que sumarle también la ley de Ohm. El análisis se podrá realizar globalmente o si, se necesita, se deberá realizar utilizando las ecuaciones nombradas para cada una de las direcciones espaciales que posee el arco, radial y axial.

separados como para soportar la tensión impuesta entre ellos por el circuito. En tanto, la inercia térmica hará que continúe un canal central caliente debido a restos de ionización y por lo tanto, con cierta conductividad residual que permitirá el pasaje de una pequeña corriente llamada de “post-arco” que circulará dentro del canal donde la temperatura es mayor. Si el mecanismo de extinción del interruptor juntamente con el poder de desionización del medio aislante son capaces de retirar el calor residual de esta zona en una proporción mayor al calor generado por esta corriente residual más el calor absorbido por el arco, la conductancia se anulará y la corriente será totalmente interrumpida. Caso contrario se tendrá un restablecimiento del pasaje de la corriente y con ello un renacimiento del arco eléctrico.

Es necesario resaltar aquí que la ocurrencia o no del restablecimiento del arco está dada por la combinación de un proceso de intercambio térmico y de la tensión impuesta entre los contactos por el circuito como fue explicado en el párrafo anterior. Visto de esta forma, el renacimiento del arco eléctrico tendrá orígenes distintos y según sea tendrá su nombre:

TIPOS DE REIGNICIÓN DEL ARCO ELÉCTRICO	
REIGNICIÓN TÉRMICA:	Cuando por efecto de la ionización residual del arco y la elevada temperatura de la zona, el medio aislante es incapaz de “enfriar” el arco causando el resurgimiento de la corriente de post-arco.
REIGNICIÓN DIELÉCTRICA:	Cuando la tensión que soportan entre sí los contactos es superior a la que puede soportar la capa aislante ocasionando una descarga eléctrica brusca y su posterior colapso.

Tabla N°2-1: Tipos de reignición del arco eléctrico.

Ambos tipos de reignición ocurren dentro de los primeros microsegundos luego del paso por cero de la corriente; si el renacimiento del arco ocurre luego de un tiempo superior al cuarto de ciclo se llama reencendido del arco.

A partir del momento en que se apaga totalmente el arco, da comienzo una “carrera” entre la Tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR) que es la tensión que el circuito impone entre los contactos del interruptor y la rapidez por la cual el medio aislante trata de impedir el posterior restablecimiento del arco y que tiene el nombre de Recuperación Dieléctrica del medio. La extinción total del arco será posible solamente si a partir de un paso natural por cero de la corriente, la tensión que reaparece entre los contactos (TTR) es siempre menor que la tensión que soporta el aislante sin colapsarse.

2.2.- HERRAMIENTAS DISPONIBLES PARA EL ESTUDIO DE INTERRUPTORES

Las herramientas más comunes con las que se cuenta en la actualidad para el estudio del funcionamiento de interruptores de potencia, se pueden juntar en 3 grupos [4-6]:

- ▷ Modelos llamados “Caja Negra:” (CN) que consideran al arco eléctrico como un bipolo y determinan una función de transferencia usando una fórmula matemática escogida previamente, aproximando el resto de

CAPÍTULO 2:

Representación del Interruptor de Potencia

2.1.- EL ARCO ELÉCTRICO

El estudio del proceso de operación de un interruptor de potencia se puede resumir en investigar la conducta del arco eléctrico que se crea dentro del mismo, en condiciones determinadas por varios factores como ser: el tipo de maniobra que está realizando, las características de la red asociada, el tipo de medio aislante, la magnitud de la corriente, etc. Es decir, la interrupción de corriente en un interruptor consiste en la transformación del plasma conductor o *arco eléctrico* con altísimas temperaturas, en un medio aislante capaz de soportar la tensión impuesta por el circuito asociado, en el menor tiempo posible [1-3].

La interrupción de una corriente alterna y por lo tanto, la formación del arco eléctrico dentro de la cámara de interrupción del interruptor, puede ser descrita como sigue: cuando el interruptor se encuentra en la posición cerrada o de conducción los polos del interruptor se tocan y sobre ellos se ejerce una presión determinada por un sistema mecánico, neumático, hidráulico, etc. asociado al mismo. Al llegar la “orden” de apertura, la presión ejercida sobre los contactos comienza a disminuir y con ello también lo hace la superficie de contacto que a su vez, es la de paso de la corriente, lo que trae como consecuencia un notable crecimiento de la densidad de corriente en el punto de contacto; esto provoca un fuerte incremento de la temperatura en la zona provocada por efecto Joule. Como resultado, tiene inicio un proceso de ionización térmica del gas en contacto con esta zona además de otra ionización provocada por los choques entre iones, acelerados por el campo eléctrico entre los contactos, y las moléculas y átomos del gas aislante.

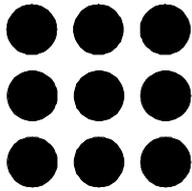
Cuando los contactos se han separado físicamente una ligera capa de aislante (aire, SF6, aceite, etc.) intenta interponerse entre estos y a consecuencia de la elevada ionización de la región se crea una columna cilíndrica de gas ionizado o plasma, que llamamos *arco eléctrico*, cuya temperatura que puede variar entre 4000 y 35000 [°K] dependiendo de las condiciones del medio y de la corriente que circula por él. Si se mantienen las condiciones en las que fue establecido, es decir, las condiciones existentes en la región favorecen la descarga de iones y electrones necesarios para la circulación de corriente, por sobre la velocidad de recombinación de éstos con el gas aislante, dicho arco se puede llegar a transformar en autosostenido y permanecerá en equilibrio estable ya que la ionización del medio está garantizada por su propio calor generado. Además, este equilibrio también es mantenido en la medida en que el calor cedido al arco por efecto Joule por el circuito consiga igualar el calor retenido en la columna central del arco más el calor que es cedido al medio aislante que, para este caso, también actúa como medio refrigerante.

Evidentemente, si la corriente que da origen al arco eléctrico es de naturaleza alterna, con su paso natural por cero dicho arco cesará si es que los contactos están suficientemente

RESUMEN

El segundo Capítulo describe el arco eléctrico que se forma entre los contactos del interruptor de potencia durante la operación de apertura o cierre y las técnicas más habituales para su representación. Tales técnicas son la representación del arco mediante “Black Box” o cajas negras (CN) donde no interesan los procesos físicos involucrados pero sí su respuesta a distintas situaciones. Otra posibilidad es la utilización de modelos físicos del arco en donde las ecuaciones de balance de energía toman un papel dominante y también se describe la técnica basada en la utilización de diagramas obtenidos de ensayos donde se relacionan características propias del arco eléctrico con el circuito asociado al interruptor.

Dentro de la técnica de simulación mediante el empleo de cajas negras, se describe el principio de funcionamiento del Alternative Transients Program y las distintas posibilidades que posee, mediante el uso de algunos ejemplos.



Universitat Politècnica de Catalunya
Departament d'Enginyeria Elèctrica

CAPITULO 2:

REPRESENTACIÓN DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA