



- [25] CIGRE, Working group 13.01: “Applications of black box modelling to circuit breakers”. ELECTRA-CIGRE, N°149, August 1993, pp. 40-71.
- [26] 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.
- [27] K. Ragaller, Current Interruption in High-Voltage networks, Plenum Press, 1977.
- [28] W. Gimenez, O. Hevia, E. Vaillard, “Modelo de arco eléctrico con parámetros dependientes de la conductancia”. V<sup>tas</sup> Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica, Tomo I, pág. 531-538. 3 al 5 de Julio de 1997, Salamanca, España.
- [29] W. Gimenez, O. Hevia, “Discusión sobre la representatividad de los modelos de arco más comunes”. III Seminario Argentino de usuarios del EMTP, 26 y 27 de Noviembre de 1998, Buenos Aires, Argentina.
- [30] V. Phaniraj, A. Phadke, “Modelling of circuit breakers in the electromagnetic transients program”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, N°2, May 1988, pp. 799-805.

## 1.6.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CORRESPONDIENTES AL CAPÍTULO 1

- [1] B.M. Weedy, Electric Power Systems, John Wiley & Sons, Third Edition, 1984.
- [2] H.M. Ryan & G.R. Jones, SF6 Switchgear, Peter Peregrinus Ltd, First Edition, 1989.
- [3] M. Cortes Cherta, Curso de Aparamenta Eléctrica, Curso 90-91, Merlin Gerin, 1990.
- [4] C.H. Flurscheim, Power circuit breakers theory and design, Peter Peregrinus Ltd, Second Edition, 1982.
- [5] A.C. Cavalcanti de Carvalho, C.M. Portela, J.S. Teixeira, R. Colombo, Disjuntores e Chaves Aplicação em Sistemas de Potência, Editora da Universidade Federal Fluminense, CIGRÉ Comité Nacional Brasileiro-FURNAS, 1995
- [6] L.A. Siegert, Alta Tensión y Sistemas de Transmisión, Editorial Limusa S.A., 1988.
- [7] K. Nakanishi, Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers, Marcel Dekker Inc, 1991.
- [8] R. Hoerauf, D. Shipp, "Characteristic and applications of various arc interrupting methods". Conference Record of the 1991 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, June 1991, pp. 151-163. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, N°5, September-October 1991, pp. 849-858.
- [9] A. Greenwood, Electrical Transients in Power Systems, John Wiley & Sons Inc, Second Edition.
- [10] K.J. Cornick, Transmission and Distribution Plant, Switching Conditions, Module 102, UMIST, England.
- [11] CIGRE Working Group 13.02, Interruption of Small Inductive Currents, Edited by S. Berneryd, 1995.
- [12] M. Kizilcay, T. Pniok, "Digital simulation of fault arcs in power systems". European Transactions on Electrical Power Engineering/ETEP, vol.1, N°1, January-February 1991, pp. 55-60.
- [13] 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
- [14] J. Martinez Velazco, "Representación Avanzada de Interruptores mediante el EMTP". Department D'Enginyeria Eléctrica. E.T.S.E.I.B.-U.P.C. Barcelona. Diagonal 647. 08028 Barcelona.
- [15] L. Van Der Sluis, "A network independent computer program for the computation of electrical transients". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-2, N°3, July 1987. Pp. 779-784.
- [16] M. Narui, F. Dawson, "A SPICE model for simulating arc discharge loads". 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, September-October 1991, pp. 1476-1482.
- [17] P. Lehn, J. Rittger, B. Kulicke, "Comparison of the ATP version of the EMTP and the NETOMAC program for simulation of HDVC systems". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, N°4, October 1995. Pp. 2048-2053.
- [18] H.W. Dommel, T. Liu, EMTP User Group, EMTP Rule Book, Vol. 1 y 2, 1995.
- [19] H.W. Dommel, CanAm EMTP User Group, EMTP Theory Book, BPA, 1987.
- [20] Grupo de Investigación de Sistemas Eléctricos de Potencia GISEP-CAUE, Introducción al uso del EMTP, Universidad Tecnológica Nacional Fac. Reg. Santa Fe, 1997.
- [21] R. Bianchi Lastra, Manual de uso del ATP, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería, Octubre 1991.
- [22] Department of Engineering Professional Development, College of Engineering, Introduction to the Electromagnetic Transients Program, University of Wisconsin-Madison/Extension, 1997.
- [23] J. Sousa, D. Santos, M.T. Correia de Barros, "Fault arc modeling in EMTP". International Conference on Power Systems Transients, Lisboa Portugal, September 1995, pp. 475-480.
- [24] 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.

- ▷ “Análisis de la sensibilidad de la forma de onda de tensión a la variación de los parámetros del arco eléctrico”. III Jornadas Latinoamericanas de Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico, ALTAE’97, 28 al 31 de Octubre de 1997, Caracas, Venezuela.
  
- ▷ “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.
  
- ▷ “Discusión sobre la representatividad de los modelos de arco más comunes”. III Seminario Argentino de usuarios del EMTP, 26 y 27 de Noviembre de 1998, Buenos Aires, Argentina.
  
- ▷ “Method to Determine the Parameters of the Electric ARC from Test Data”. 3<sup>rd</sup> International Conference on Power Systems Transients, IPST’99, June 20-24, 1999, Budapest, Hungría.
  
- ▷ “Análisis de los parámetros de un modelo de arco para ser aplicado a interruptores de B.T.”. 6<sup>tas</sup> Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, 7 al 9 de Julio de 1999, Lisboa, Portugal.

Además el artículo “Modelo de arco eléctrico con parámetros dependientes de la conductancia para el EMTP/ATP”, fue publicado en la Revista Electrotecnia de la Asociación Electrotécnica Argentina, volumen LXXXIV, mayo-junio 1998, N°3, pp 85-90.

▷ Capítulo 5: “*Simulación de un Interruptor de SF6 en Alta Tensión*”. A partir de oscilogramas obtenidos de ensayos en laboratorio se calculan los parámetros de los modelos de arco y se realizan diversas simulaciones para cuantificar la calidad en la representación de reigniciones y de aperturas de arcos eléctricos, siempre en Alta Tensión. Además se analizan por comparación distintas aplicaciones posibles de los resultados alcanzados.

▷ Capítulo 6: “*Simulación de un Interruptor de Aire en Baja Tensión*”. Aquí se muestran diversos ensayos realizados en interruptores de Baja Tensión y se investiga la aplicación de la metodología desarrollada, realizándose simulaciones de las pruebas y comprobándose los resultados obtenidos. También se brinda una aplicación práctica de los resultados obtenidos.

▷ Capítulo 7: “*Simulación de un Interruptor de Vacío en Media Tensión*”. Para lograr extender la metodología a todos los interruptores más comunes, aquí se aplica a ensayos sobre interruptores de vacío y se muestran las particularidades de estos ensayos.

▷ Capítulo 8: “*Conclusiones, Aportes y Futuras Líneas de Investigación*”. Presenta con detalle las conclusiones a las cuales se fueron arribando, destacando los aportes realizados y se detallan aquellas futuras líneas de investigación que se han descubierto con el desarrollo del trabajo.

Además, todo el trabajo anterior se complementa con tres anexos:

▷ Anexo I: “*Metodología Desarrollada para la Obtención de los Parámetros*”. Contiene un detalle del proceso seguido para la elaboración de la metodología de cálculo, junto con una descripción de los programas de cálculo y la manera de utilizarlos e interpretar los resultados gráficos.

▷ Anexo II: “*Análisis y Generalización de Resultados para  $\pm 4$  [ $\mu s$ ]*”. En donde se realiza un proceso de generalización de valores de los parámetros y un análisis de su grado de dispersión, sólo para los oscilogramas de SF6.

▷ Anexo III: “*Artículos Publicados en Congresos Internacionales*”. Aquí se presentan copias de los artículos que resultaran de la elaboración de este trabajo.

## **1.5.- PUBLICACIONES EN CONGRESOS**

Simultáneamente con el desarrollo del trabajo se han presentado en distintas reuniones científicas internacionales, los progresos en el avance hacia la concreción de los objetivos propuestos. Estas publicaciones resumen algunos aportes y conclusiones parciales a las cuales se han ido arribando. Estas presentaciones son las cuales se detallan a continuación y pueden observarse en el Anexo III.

▷ “*Modelo de arco eléctrico con parámetros dependientes de la conductancia*”. V<sup>tas</sup> Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica, Tomo I, pág. 531-538. 3 al 5 de Julio de 1997, Salamanca, España.

Estas etapas en forma general son coincidentes con la estructura general de la tesis dividida en ocho capítulos, que tratan a cada una de ellas de forma separada y se complementan con los tres anexos.

### 1.3.1.- OBJETIVOS INTRÍNSECOS

Tal vez, el objetivo más importante el cual intenta alcanzar este trabajo es la desmitificación del arco eléctrico como hecho en sí, ya que es práctica común suponer que no existe, con lo irreal y erróneo que resulta cualquier estudio detallado en este sentido. Además, poner al alcance de quien lo desee una herramienta de uso habitual, cuya justificación práctica del uso, no impida el conocimiento o la negación de los procesos físicos intrínsecos involucrados.

Así se busca mejorar el conocimiento del arco eléctrico a través de un uso más extensivo, sustentado en una metodología capaz de aplicarse a cualquier interruptor, en la claridad del proceso de simulación y en la facilidad de su utilización.

La conjunción de las etapas generales con los objetivos prioritarios, intenta realizar aportes en el proceso de modelización de interruptores de potencia en el sentido general de la metodología que implique todo el proceso desde el oscilograma obtenido en un ensayo, hasta la validación del campo de aplicación del modelo, pasando por la determinación de los valores propios de cada modelo matemático usado en el proceso de simulación. Sin dejar de lado la diversidad de tipos de interruptores y situaciones a las cuales se los ve sometidos en una red de potencia.

### 1.4.- ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL

La concreción de los objetivos detallados anteriormente, han resultado en siete capítulos cuyo contenido resumido se detallan seguidamente:

- ▷ Capítulo 1: “*Introducción General*”. Donde se presenta el contexto general dentro del cual se desarrolló el trabajo, los objetivos perseguidos y la composición general de la tesis.
- ▷ Capítulo 2: “*Representación del Interruptor de Potencia*”. Aquí se detallan las opciones más habituales de representación del interruptor de potencia.
- ▷ Capítulo 3: “*Metodología para la Modelización de Interruptores*”. Se desarrolla una metodología a partir de ensayos reales de interruptores de potencia a fin de ser utilizada en la simulación por ordenador.
- ▷ Capítulo 4: “*Simulación del Interruptor de Potencia con el ATP*”. Utilizando el programa Alternative Transients Program (A.T.P.), aquí se describen e investigan los modelos matemáticos más usuales del arco eléctrico y se estudia una nueva forma de interpretar los parámetros eléctricos involucrados en la ecuación del modelo.

Todas ellas podrán ser investigadas en menor o mayor medida, ya que todas ellas son válidas dentro de ciertos límites de aplicación, pero lo que aquí se está buscando es poner luz al empleo de nuevas técnicas de simulación, más allá de la investigación física del hecho en sí; es decir, dejar de lado técnicas exclusivamente de grandes laboratorios que se guardan con sumo recelo y expandir su uso hacia otros ambientes de investigación y académicos ya que en ellos el desinterés económico potencia las aplicaciones que luego serán la base para analizar el funcionamiento de los SEP en las compañías eléctricas y en las casas de altos estudios.

### **1.3.- OBJETIVO GENERAL DEL TRABAJO**

Dentro de este marco, el objetivo general del trabajo es realizar aportes en el campo de la modelización del interruptor de potencia buscando reproducir lo más fielmente posible lo que ocurre en la realidad y desarrollar una técnica de aplicación que sea metódica para su empleo en otros tipos de interruptores y a otros niveles de tensión. Además debe brindar la capacidad de ser utilizado y comprendido por cada usuario de algún software de simulación y de aquellos profesionales encargados de gestionar el funcionamiento de un sistema de potencia.

De acuerdo a lo anterior el enfoque que se aplica para este trabajo es desarrollar una herramienta de análisis capaz de ser utilizada sólo en base a observaciones y mediciones exteriores al interruptor de potencia como única forma de evitar el conocimiento minucioso de los fenómenos físicos involucrados con el proceso de corte de la corriente. En este sentido, se elaboró todo el trabajo a partir de registros oscilográficos lo que permitió también independizar el análisis del comando del interruptor ya que éste es propio de cada tipo de interruptor.

Para satisfacer el objetivo general del trabajo se han tenido que cumplir una serie de etapas que se brindan a continuación:

- ▷ Etapa 1: Recopilación temática y bibliográfica para conocer el estado del arte al inicio del trabajo.
- ▷ Etapa 2: Investigación de cada una de las posibilidades más habituales de representación del interruptor encontradas en la literatura.
- ▷ Etapa 3: Desarrollo de una metodología capaz de ser aplicada de forma general a la simulación de interruptores en ordenadores personales a partir de datos de ensayos.
- ▷ Etapa 4: Comprobación y verificación de los modelos matemáticos existentes. Propuesta y desarrollo de una nueva forma de interpretar los parámetros eléctricos involucrados en ellos.
- ▷ Etapa 5: Extensión de la metodología hacia otros tipos de interruptores y otras tensiones nominales. Verificación del proceso mediante la realización de ensayos de laboratorio.
- ▷ Etapa 6: Mejoramiento final de todo el proceso de simulación.

▷ Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>): es un gas pesado, incoloro y no tóxico, con una rigidez dieléctrica tres veces la del aire causada por los átomos extraordinariamente electronegativos del fluor. Bajo el efecto de la temperatura del arco el SF<sub>6</sub> se disocia en átomos de fluor y azufre. Estos capturan los electrones portadores de carga de la corriente hasta lograr el corte de la corriente y luego el gas se regenera por enfriamiento obteniéndose así el apagado del arco. Existen diferentes tipos llamados de simple o doble presión, de arco rotante, autosoplante; diferenciadas por el método empleado para mejorar la acción del SF<sub>6</sub> sobre el arco eléctrico.

## 1.2.- JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL TRABAJO

El campo de aplicación de cada tipo de interruptores se ve limitado en su mayoría por la tensión a la que pueden operar y hasta que se desarrollen nuevos tipos se puede decir que el interruptor en base al SF<sub>6</sub> está ganando la carrera en cuanto a ampliar su utilización y esta es una de las razones por la cual se ha escogido trabajar con este tipo de interruptores. Además, es actualmente aquel que está siendo sometido a estudio en diversas compañías, laboratorios y por último en distintas universidades [2-4].

A su vez, el papel que ha comenzado a jugar el ordenador para la planificación, operación y mantenimiento de grandes Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) con su principal ventaja de que en él nada se quema ni se rompe y que casi todo tiene solución, si es que el operador esta capacitado, potenciado esto por la aparición de numerosos programas de simulación [2,5,7,8,12-22] de utilidad indiscutible, han expandido el ámbito de estudio a otros estamentos no sólo a laboratorios y grandes empresas. Esto tiene su consecuencia en que el operador del sistema se encuentra en una encrucijada vital que es saber *...que pasa si...???*; y es ahí donde entra en juego la simulación por ordenador de los componentes del sistema de potencia. Para ello hay que contar con un conocimiento cabal del funcionamiento del SEP y de los modelos matemáticos que se utilicen para representar cada uno de sus componentes y por sobre todo, su campo de validez y las limitaciones propias de cada modelo de forma de no caer en situaciones erróneas [5,7,12-25].

Sumado a lo anterior, la rapidez del fenómeno del corte de corriente, aun más en interruptores de SF<sub>6</sub> - del orden de décimas de microsegundos -, y lo costoso de un ensayo real en condiciones de cortocircuito sobre el interruptor – varios miles de dólares estadounidenses por día de trabajo, aparte de la escasa cantidad de laboratorios de alta tensión con equipamiento disponible para estos ensayos, unos siete en todo el mundo y aún así hay limitaciones en la potencia necesaria para realizarlos -, trae consigo la necesidad de contar con una metodología capaz de verificar el funcionamiento en cada una de las innumerables posibilidades a la que se encuentra sometido un interruptor, de forma de poder predecir su eficacia al momento de despejar una falla o de maniobrar con un elemento del circuito [5,7,12,14,24-27].

Como se verá en el desarrollo de este trabajo, existen numerosas posibilidades para la representación de un interruptor de potencia originadas en el software utilizado, en el rango de tensión o en el grado de perfeccionamiento del modelo matemático que se desee emplear [12-14,18-23,28-30].

TENSIONES NOMINALES Y TIPO DE INTERRUPTORES									
TECNICA DE CORTE	TENSIONES EN [kV]								
	0	1	3	12	24	36	72,5	245	765
Aire	■	■	■	■	■				
Aceite			■	■	■	■	■	■	
Aire comprimido.			■	■	■	■	■	■	
SF6			■	■	■	■	■	■	■
Vacío		■	■	■	■				
Semiconductores.	FALTA DESARROLLO								
Ideal	NO EXISTE								

Figura N°1-1: Relación entre tensión nominal y tipo de interruptor.

Como se ha mencionado existen distintos tipos de interruptores de potencia [1-8], a saber:

▷ Aire libre: El proceso de interrupción del arco se basa en la desionización natural de los gases por la acción refrigerante del aire circundante que se encuentra a menor temperatura. Para facilitar el corte de corriente se somete al arco a un proceso de estiramiento con el fin de aumentar su resistencia y favorecer su enfriamiento. También se pueden emplean diversos métodos para facilitar el corte como son la división y la constricción del arco.

▷ Aceite: aquí se incluyen los interruptores de gran volumen como los de pequeño volumen ya que ambos tienen el mismo proceso de interrupción de la corriente: los contactos se encuentran inmersos en aceite y al comenzar a separarse, el arco eléctrico que se forma vaporiza el aceite y lo descompone en hidrógeno, metano y etileno; enfriando energéticamente la columna del arco, consiguiéndose así al apagado del arco.

▷ Aire comprimido: Estos interruptores basan su acción en soplar el arco que se forma entre los electrodos mediante la apertura de una válvula de aire comprimido que estira y enfría el arco. El sentido del flujo de aire los divide en de sople axial, radial o cruzado.

▷ Vacío: Estos interruptores poseen los contactos inmersos en una cápsula con alto vacío que es el encargado de apagar el arco eléctrico debido a la altísima rigidez dieléctrica que alcanza el aire a una presión de  $10^{-4}$  ó  $10^{-5}$  [Pa]. Existen combinaciones en serie de hasta cinco cámaras con lo cual se logra alcanzar tensiones de 132 [kV].

▷ Semiconductores: En teoría, el semiconductor se aproxima mucho más que el arco eléctrico, al paso por cero de la corriente y cambiar de sentido, al interruptor ideal. La resistencia eléctrica de un semiconductor es reducida cuando la corriente circula en sentido convencional (anodo-cátodo) y prácticamente infinita, dentro de ciertos límites, cuando circula en sentido contrario; éste hecho es el que alienta la investigación de interruptores de este tipo aunque solo se trate de teoría para interruptores de potencia.

# CAPÍTULO 1: Introducción General

## 1.1.- INTRODUCCIÓN

En la actualidad el continuo crecimiento del consumo de energía eléctrica [1-3] y el necesario cumplimiento de las exigencias propias del mercado y de los Entes Reguladores, obliga a las compañías prestadoras del servicio eléctrico a mejorar día a día la calidad de la energía entregada y a un paulatino incremento del área de servicio abarcada; trayendo consigo un continuo aumento de la longitud de las líneas de transmisión y su necesaria interconexión para asegurar un óptimo abastecimiento de la demanda.

Existe un elemento que es común a todos los sistemas de energía, renovables o no, en baja o en alta tensión, en corriente alterna o corriente continua, en la generación, transmisión o distribución; usado como elemento de protección o de interconexión: **un interruptor de potencia** es un dispositivo cuya función consiste en interrumpir y/o restablecer la conducción de corriente en un circuito eléctrico. Este cambio de estado se puede efectuar bajo carga, para despejar por ejemplo una falla; o bien por razones de servicio para conectar o desconectar cualquier tipo de equipo eléctrico o línea de transmisión [1-8].

El comportamiento de los interruptores en un sistema de potencia, independientemente del tipo del que se trate, es de suma importancia pues la corriente que los suele atravesar, puede ser de naturaleza capacitiva (líneas en vacío, maniobras con bancos de capacitores), resistiva o inductiva (como lo son la mayoría de las cargas) [5,9-11].

Por su capacidad, por su tensión de operación o por su clase, se pueden clasificar de distintas maneras, pero como regla general se agrupan según la tecnología empleada para apagar el arco eléctrico que se forma entre los contactos cuando comienza la operación de apertura o termina la operación de cierre. En otras palabras, se puede decir que existe una correlación entre tensión y tipo de interruptor que se muestra en la figura 1-1, y también entre el avance de la tecnología y la capacidad del interruptor tal como se muestra en [2-4,10].

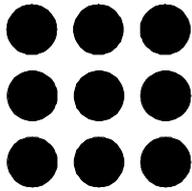


## RESUMEN

*En este primer Capítulo brinda una introducción general al contexto dentro del cual se desarrolló el trabajo, a través de una presentación resumida de los antecedentes genéricos vinculados al estudio de interruptores de potencia y a nuevas técnicas de simulación por ordenador. También se detalla la justificación de la importancia del trabajo desarrollado en capítulos posteriores.*

*Además incluye los objetivos perseguidos durante la evolución del trabajo, tanto generales como los particulares, detallándose la estructura general de la tesis y las publicaciones realizadas durante este trabajo.*





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

# **CAPITULO 1:**

# **INTRODUCCIÓN**

# **GENERAL**