



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**Implementación de Modelos de Arco
Eléctrico para Simulación de Interruptores
de Potencia en el EMTP**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA

P R E S E N T A:

JAHHEL HERNANDEZ ANGELES



MÉXICO, D. F.

DICIEMBRE, 2006



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 27 del mes de Noviembre de 2006 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

“IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE ARCO ELÉCTRICO PARA SIMULACIÓN DE INTERRUPTORES DE POTENCIA EN EL EMTF”

Presentada por el alumno:

HERNÁNDEZ

Apellido paterno

ANGELES

materno

JAHEL

nombre(s)

Con registro:

A	0	4	0	5	0	1
---	---	---	---	---	---	---

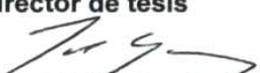
aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

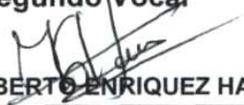
Director de tesis


DR. PABLO GÓMEZ ZAMORANO

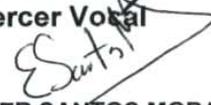
Presidente


DR. DANIEL OLGUÍN SALINAS

Segundo Vocal


M. EN C. GILBERTO ENRIQUEZ HARPER

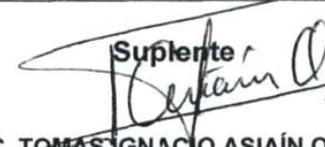
Tercer Vocal


DR. ELMER SANTOS MORA

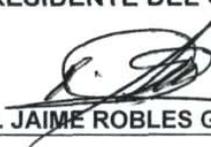
Secretario


DR. RICARDO OCTAVIO MOTA PALOMINO

Suplente


M. EN C. TOMAS IGNACIO ASIAÍN OLIVARES

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


DR. JAIME ROBLES GARCÍA





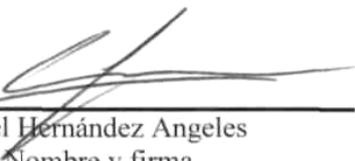
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
COORDINACIÓN GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

CARTA SESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día **29** del mes **Noviembre** del año **2006**, el (la) que suscribe **Jahel Hernández Angeles** alumno(a) del Programa de **Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica** con número de registro **A040501**, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la **ESIME Unidad Zacatenco**, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Pablo Gómez Zamorano** y el **M. en C. Gilberto Enriquez Harper** cede los derechos del trabajo intitulado: "**Implementación de Modelos de Arco Eléctrico Para Simulación de Interruptores de Potencia en el EMTP**", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: angeles_jahel@hotmail.com, angeles_jahel@yahoo.com.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Jahel Hernández Angeles
Nombre y firma

RESUMEN

En la operación y protección de los sistemas eléctricos de potencia es indispensable el empleo del interruptor de potencia, el cual está diseñado para trabajar en condiciones nominales de operación así como soportar grandes corrientes relacionadas con fallas eléctricas de diferente índole.

La maniobra de apertura del interruptor genera condiciones transitorias severas que pueden ocasionar daño en los equipo del sistema de potencia. Se hacen en la actualidad estudios para determinar estas condiciones mediante programas de simulación especializados en el análisis de transitorios, tales como el ATP/EMTP, EMTDC o Microtran, entre los más comunes.

Los programas de simulación en general no consideran el efecto del arco eléctrico en la operación del interruptor, dejando a la incertidumbre el como interactúa dicho arco con el resto del sistema.

En este trabajo de tesis se analiza el comportamiento transitorio de interruptores de potencia incluyendo el efecto del arco eléctrico. Para ello se aplican y se implementan los modelos de tipo “caja negra” de Mayr y Cassie, un modelo combinado de ambos y un modelo más completo llamado “modelo general” utilizando el programa de uso comercial ATP/EMTP y su interfaz gráfica ATPDraw. Las ecuaciones que definen la dinámica del arco se resuelven empleando dispositivos de control conocidos como TACS (Systems Control Analisis Transient). Finalmente, se obtienen componentes de propósito general para simular fenómenos en los cuales la inclusión del arco eléctrico sea de importancia.

ABSTRACT

The use of the power circuit breaker is mandatory within the operation and protection of Electric Power Systems. It is designed to work in nominal operating conditions and to withstand high currents related to different kind of failures (ground short circuit, line to line failures, etc).

The circuit breaker maneuver generates severe transient conditions that may damage the power system equipments. Nowadays, some studies are carried out to determine such conditions using specialized simulation software of transient analysis such as ATP/EMTP, EMTDC or Microtran, among others.

In general, the simulation software does not consider the electric arc effect in the circuit breaker; therefore, uncertainty about the interaction of such arc with the rest of the system arises.

Transient behavior of power circuit breakers including the electric arc effect is analyzed carried on in this thesis. “Black box” type models of Mayr and Cassie, a combined model of them, and a more complete model called “general model” are applied and implemented. The commercial software ATP/EMTP and its graphical interface are used. The equations that define the arc dynamics are solved using control devices known as TACS. Finally, general purpose components are obtained to simulate phenomena in which the inclusion of the electric arc is of importance.

DEDICATORIAS

A *Dios* por permitirme lograr objetivos, por brindarme su amor y lo mejor de esta vida.

A mis **padres** por estar pendiente siempre de sus hijos, por todo su apoyo, cariño, los más sinceros consejos, la confianza, por guiarme por el buen camino, por la paciencia que me han tenido y por muchas cosas más.

A mis **hermanos** *Ivan* y *Eliasib* por tanto afecto, respeto, confianza que siempre nos hemos tenido, por todos los gratos momentos a lo largo de nuestras vidas.

A ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A mis tíos por su confianza, estímulo y consejos, el gran apoyo y porque han estado conmigo en todo momento: German, Tomas, Fernando, Virginia, Willy.

A mis compañeros y amigos: Manuel T., Manuel A., Carlos U., Jonathan G., Lety, Toño, Pili, Jhon, Quique, Emilio y a todos aquellos que hicieron una estancia amena en mis estudios de posgrado.

No olvido a mis amigos que sin importar la distancia seguimos cultivando una valiosa amistad: Leonardo y Urso Angel.

Al Dr. Pablo Gómez Zamorano por su gran ayuda, por su actitud, las ganas de trabajar y dedicación que hizo posible este trabajo.

Mi más sincero agradecimiento: al M en C Gilberto Enríquez Harper por su disposición, apoyo y ser el autor intelectual de este proyecto.

Al M. en C. Tomas I. Asiaín Olivares por su apoyo, por todos los consejos, a todos los profesores que fueron parte de mi formación académica, que hicieron que despertara el interés por seguir preparándome, mi más sincero agradecimiento: Dr. David Sebastián, Dr. Daniel Olguin, Dr. Jaime Robles, Dr. David Romero.

Y una enorme gratitud al Instituto Politécnico Nacional columna vertebral del desarrollo tecnológico y semillero de profesionistas en nuestro país. En nuestras manos esta el poner en alto el nombre de nuestra Alma Mater.

CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
CAPÍTULO 1	1
Introducción	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Planteamiento del Problema	2
1.3 Objetivos.....	3
1.4 Justificación	4
1.5 Estado del Arte	5
1.6 Estructura de la Tesis.....	7
CAPÍTULO 2	9
Transitorios electromagnéticos debidos a la interrupción de corriente	9
2.1 Introducción.....	9
2.2 Maniobra de Interruptores	10
2.3 Desconexión de Líneas en Vacío.....	11
2.4 Desconexión de Bancos de Capacitores	12
2.5 Desconexión de Corrientes Anormales	13
2.6 Desconexión de Corrientes en Fallas kilométricas.....	14
CAPÍTULO 3	16
Aspectos generales de los interruptores de potencia	16
3.1 Introducción.....	16
3.2 Interruptores de Aceite	17
3.3 Interruptores de Aire Comprimido	19
3.4 Interruptores de Vacío	21
3.5 Interruptores de SF ₆	23
3.5.1 Propiedades químicas del SF ₆	24
3.5.2 Propiedades físicas del SF ₆	25
3.5.3 Propiedades eléctricas y térmicas del SF ₆	25

3.6	Física de Arco en Interruptores	26
3.6.1	Columna del arco.....	29
3.6.2	El cátodo	30
3.6.3	El ánodo.....	31
3.6.4	Ionización de arcos	32
3.6.5	Características del arco.....	32
3.6.6	Características estáticas	33
3.7	El Proceso de Interrupción	34
CAPÍTULO 4.....		36
Metodología para el modelado de interruptores		36
4.1	Introducción.....	36
4.2	Interruptor Ideal.....	37
4.3	Modelado del Arco Eléctrico.....	38
4.4	Modelo de Cassie	39
4.4.1	Modelo de Cassie implementado en TACS.....	42
4.5	Modelo de Mayr	44
4.5.1	Modelo matemático de Mayr implementado en TACS.....	45
4.6	Modelo Combinado de Cassie-Mayr.....	47
4.7	Otros Modelos.	49
4.7.1	Modelo de Hochrainer	49
4.7.2	Modelo de Kopplin.....	50
4.7.3	Modelo de KEMA	50
4.8	Modelo General de Arco Eléctrico.....	51
4.8.1	Modelo General Implementado en TACS del ATP/EMTP.....	52
CAPÍTULO 5.....		56
Aplicaciones y casos de prueba		56
5.1	Introducción.....	56
5.2	Desconexión de una Falla Trifásica en el Conjunto Línea-Generador.....	56
5.3	Falla kilométrica	64
5.4	Falla kilométrica Empleando el Modelo General de Arco Eléctrico.....	70
5.5	Notas Finales	76
CAPÍTULO 6.....		77
Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.....		77
6.1	Conclusiones.....	77
6.2	Aportaciones de la Tesis.....	78
6.3	Sugerencias y Recomendaciones para Trabajos Futuros.....	78
REFERENCIAS		80
APÉNDICE		84
EL EMTP/ATP		84
A.1	Introducción.....	84

A.2	Bloques de Control en el EMTP/ATP (TACS)	87
-----	--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Rango de frecuencias de los fenómenos transitorios.	10
Figura 2.2	Interrupción de corrientes capacitivas (bancos de capacitores, líneas de transmisión y cables de potencia en vacío).	13
Figura 2.3	Desconexión de pequeñas corrientes inductivas (transformador en vacío).	14
Figura 2.4	Falla kilométrica o falla en línea corta.	15
Figura 3.1	Interruptor de potencia [27].	16
Figura 3.2	Proceso de interrupción en aceite.	18
Figura 3.3	Interruptores de aire, 23 kV [29].	20
Figura 3.4.	Diagrama esquemático de un interruptor de aire.	20
Figura 3.5	Corte transversal de un interruptor en vacío.	22
Figura 3.6	Interruptores monopolares en SF ₆ [28].	24
Figura 3.7	Curva de conductividad térmica del SF ₆	26
Figura 3.8	Curva característica Voltaje-Corriente del proceso de ruptura.	27
Figura 3.9	Diagrama esquemático que muestra las diferentes regiones en una columna de arco uniforme.	28
Figura 3.10	Distribución de potencial en el arco.	28
Figura 3.11	Grafica que describe la ecuación de Saha para el oxígeno y nitrógeno.	30
Figura. 3.12	Características estáticas Volt-Ampere de la columna de arco.	33
Figura 4.1	Interruptor ideal.	38
Figura 4.2	Columna de arco eléctrico de acuerdo a Cassie.	40

Figura 4.3 Diagrama de bloques del modelo de Cassie.....	42
Figura 4.4 Modelo de Cassie implementado en TACS.	42
Figura 4.5 Icono y ventana de ajuste de parámetros del interruptor de potencia implementado en el ATP/EMTP (Cassie).	43
Figura 4.6 Columna de arco de acuerdo a Mayr.....	44
Figura 4.7 Diagrama de Bloques de la ecuación de Mayr.....	46
Figura 4.8 Modelo de Mayr implementado en TACS.....	46
Figura 4.9 Icono y ventana de ajuste de parámetros del interruptor de potencia implementado en el ATP/EMTP (Mayr).	47
Figura 4.10 Diagrama de bloques del modelo combinado de Mayr - Cassie.....	48
Figura 4.11 Modelo Combinado de Mayr y Cassie Implementado en TACS.....	48
Figura 4.12 Icono y ventana de ajuste de parámetros del interruptor de potencia implementado en el ATP/EMTP (Mayr-Cassie).	49
Figura 4.13 Evaluación de periodos en el modelo general para el caso de la ecuación de Mayr.	52
Figura 4.14 Bloques de lógica de control del modelo general.	53
Figura 4.15 Modelo general Implementado en TACS.	53
Figura 4.16 Resistencia no lineal de arco obtenida con el modelo general de arco eléctrico.	54
Figura 4.17 Icono y ventana de ajuste de parámetros del interruptor de potencia implementado en el ATP/EMTP (modelo general).	54
Figura 5.1 Corriente de corto circuito en el momento de la falla.....	57
Figura 5.2 Sistema de prueba máquina línea.....	58
Figura 5.3 Implementación del conjunto línea-generador en el ATP/EMTP (sin modelo de Arco).....	58

Figura 5.4 Implementación del conjunto línea-generador en el ATPDraw incluyendo modelo de arco eléctrico (Cassie).....	59
Figura 5.5 Corrientes de falla sostenida.	60
Figura 5.6 Liberación de la corriente de falla sin modelo de arco eléctrico.....	60
Figura 5.7 Interrupción de la corriente de falla incluyendo el modelo de arco eléctrico en el interruptor de potencia (Cassie).....	62
Figura 5.8 Corriente de falla sostenida caso critico.....	62
Figura 5.9 Liberación de la corriente de falla sin incluir modelo de arco eléctrico (caso critico).....	63
Figura 5.10 Liberación de la corriente de falla incluyendo modelo de arco eléctrico (caso critico).....	64
Figura 5.11 Sistema de prueba para análisis de falla kilométrica.	65
Figura 5.12 Sistema de Prueba para modelar una falla kilométrica implementado en ATP/EMTP.....	65
Figura 5.13 Voltaje transitorio de recuperación en los polos del interruptor (modelo ideal).....	66
Figura 5.14 Simulación de falla en línea a 1.5 km de la fuente.....	67
Figura 5.15 Corriente de arco eléctrico.	67
Figura 5.16 Voltaje transitorio de recuperación a diferentes longitudes de falla.	68
Figura 5.17 Voltaje de pre-encendido de arco simulado con el modelo combinado cuando la falla se encuentra a 0.1 km de la fuente.....	69
Figura 5.18 Corriente de falla a 0.1 km de los polos del interruptor modelo combinado. ...	70
Figura. 5.19 Sistema de prueba (modelo general).....	71
Figura 5.20 Modelo general implementado en ATPDraw para simular una falla kilométrica.	71
Figura 5.21 Falla a 1.5 km de los polos del interruptor (ideal).	72

Figura 5.22 Falla a 1.5 km de los polos del interruptor (Mayr).	73
Figura 5.24 Voltaje transitorio de recuperación, falla a 0.1 km de los polos del interruptor. modelo general.	75
Figura 5.25 Voltaje entre polos del interruptor para una falla a 0.1 km ecuación de Mayr.	75
Figura.5.26 Corriente de reestablecimiento de falla kilométrica a 0.1 km de la fuente.	76
Figura A.1 Relación entre TACS y el sistema de potencia.	88
Figura A.2 Interfaz entre la red y TACS.	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Tabla de aplicaciones de los modelos de arco eléctrico.	55
--	----

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

En la actualidad el continuo crecimiento del consumo de energía eléctrica y el necesario cumplimiento de las exigencias propias del mercado obligan a las compañías prestadoras del servicio eléctrico a mejorar día con día la calidad de la energía entregada y a un paulatino incremento del área definida de servicio, trayendo consigo un continuo aumento de la longitud de las líneas de transmisión, incremento de unidades generadoras y su necesaria interconexión para asegurar un óptimo abastecimiento de la demanda.

Existe un elemento que es común a todos los sistemas eléctricos, el cual es empleado como elemento de protección, operación o de interconexión: *un interruptor de potencia*, el cual es un dispositivo mecánico capaz de establecer, conducir e interrumpir corrientes bajo condiciones normales del circuito, así como establecer y conducir, por un tiempo específico, e interrumpir corrientes bajo condiciones anormales tal como puede ser en corto circuito [1]. Este cambio de estado se puede efectuar bajo carga, para liberar una falla, o bien por razones de servicio para conectar o desconectar cualquier tipo de equipo eléctrico o líneas de transmisión que en mucho depende del lugar en donde vaya a operar.

El comportamiento de los interruptores en un sistema de potencia, independientemente del tipo del que se trate, es de suma importancia ya que la corriente que suelen conducir puede ser de naturaleza capacitiva (línea en vacío, maniobras con bancos de capacitores), resistiva o inductiva (como lo son la mayoría de las cargas), por lo cual debe de contar con ciertas características especiales, como son nivel de aislamiento, capacidad interruptiva de corrientes de falla, corriente nominal de operación, nivel nominal de tensión de operación, tiempos y ciclos de operación, entre las más importantes.

Hacer una clasificación específica de los interruptores de potencia es una labor difícil. Sin embargo, una manera acertada de lograrlo es a través del medio de extinción del arco, tales como, interruptores en SF₆ (Hexafloruro de azufre), aceite (pequeño y gran volumen), aire, vacío, sople de aire (air blast) y sople magnético, entre los más comunes. Existen clasificaciones por su mecanismo de interrupción (hidráulico, neumático, resortes, etc.), por el tipo de cámaras de extinción, tensión de operación, etc.

1.2 Planteamiento del Problema

Actualmente, la simulación digital juega un papel fundamental en la planificación, operación y mantenimiento de los sistemas eléctricos de potencia. No obstante, para que la simulación sea correcta, los elementos del sistema deben modelarse de tal forma que describan de manera suficientemente precisa el fenómeno en estudio. En general, el grado de complejidad requerido en el modelado depende del tipo de análisis en particular.

Para el caso de un interruptor de potencia, es necesario considerar que a partir de una señal de apertura, la separación de los contactos genera un arco eléctrico. El estudio de este fenómeno es muy complejo, teniéndose numerosos modelos matemáticos que lo describen con distintos niveles de detalle.

A la fecha, las distintas versiones comerciales del programa de simulación de transitorios electromagnéticos (EMTP, por sus siglas en inglés) tales como el ATP y el EMTDC, incluyen en sus librerías de componentes únicamente interruptores ideales, de tipo simple (realizan sólo una maniobra de cierre y otra de apertura en la simulación) o estadísticos (realizan un conjunto de maniobras consecutivas para estudios estadísticos) [2].

Empleando un modelo de interruptor ideal, una apertura ocurre en el primer cruce por cero posterior a la señal de inicio del evento, despreciando la interacción entre el arco eléctrico generado en el interruptor y la red a la que está conectado. Sin embargo, este tipo de

modelos puede ser insuficiente, provocando que la respuesta real del sistema difiera en gran medida con lo obtenido en simulaciones [3].

En las últimas dos décadas, a raíz del gran avance en los procesadores de cómputo, varios autores han logrado implementaciones de distintos modelos de arco en programas de tipo EMTP. No obstante, la mayoría de estos modelos se han desarrollado para casos específicos, por ejemplo, desconexión de generadores, liberación de fallas kilométricas o desconexión de líneas con compensación capacitiva, por mencionar algunos. En trabajos más recientes se ha llegado a implementaciones más generales, particularmente para el ATP/EMTP, para lo cual se han utilizado herramientas de dicho simulador como bloques de control (TACS) o el lenguaje MODELS para resolver las ecuaciones diferenciales que definen al arco de una manera simplificada [3,18]. Aún así, la incorporación de distintos modelos de interruptores con inclusión de arco eléctrico, de manera que puedan ser aplicados por el usuario del simulador de manera directa no se ha conseguido, por lo que sería un complemento de gran importancia.

Otro problema en el modelado del arco eléctrico para interruptores de potencia es la representación completa del proceso de interrupción, ya que la mayoría de los modelos existentes representan únicamente las etapas de pre-cero y cruce por cero del arco, de manera que la etapa de post-cero, fundamental para definir si la extinción del arco es exitosa, se desprecia. En trabajos de los últimos años se ha atacado este problema con resultados satisfactorios para casos particulares [4,18]; sin embargo, aún es necesario incorporar modelos de ese tipo como componentes en programas de tipo ATP/EMTP, particularmente para analizar el comportamiento interno del interruptor.

1.3 Objetivos

De acuerdo con lo anterior, los objetivos fundamentales de este trabajo de tesis son los siguientes:

- Implementar distintos modelos de interruptor de potencia incluyendo el efecto del arco eléctrico, empleando el programa de simulación ATP/EMTP y su interfaz gráfica ATPDraw, logrando incorporarlos como componentes que puedan ser empleados directamente por cualquier usuario del simulador.
- Implementar un modelo que considere todas las etapas del arco eléctrico: preencendido, encendido y extinción, de manera que represente de manera más realista el fenómeno e incorporarlo también como componente de uso general en el ATP/EMTP.
- Validar los modelos mediante su aplicación en casos de estudio para los cuales la inclusión del efecto del arco eléctrico sea fundamental para la obtención de resultados satisfactorios en la simulación.

1.4 Justificación

La simulación como herramienta en el análisis del desempeño interno de los interruptores de potencia, así como para estudiar su interacción con el resto del sistema, es de suma importancia en las etapas de diseño, puesta en servicio y operación de los interruptores, por tal motivo es necesario contar con modelos de simulación lo más cercanos a la realidad para poder tener resultados con el mayor grado de confiabilidad y certeza.

Se han desarrollado a través del tiempo numerosos modelos del arco eléctrico que son empleados en la simulación de la operación de los interruptores considerando los diferentes medios de extinción (aire, vacío, SF₆) [1, 5-9]. No obstante, no se ha consolidado la implementación de estos modelos en ninguno de los simuladores de uso comercial.

Por lo antes mencionado se tiene la necesidad de elaborar herramientas de simulación con el fin de que sean de uso general, en las que el usuario no necesariamente tenga que ser un experto en el análisis de la física de arco eléctrico para elegir el modelo y los parámetros necesarios en las simulaciones.

1.5 Estado del Arte

Un interruptor de potencia debe ser capaz de interrumpir corrientes tanto en condiciones normales de operación como en condiciones anormales, tales como un corto circuito. Relacionados con estas maniobras pueden presentarse transitorios electromagnéticos severos, de manera que la correcta simulación de estos fenómenos es muy importante para su prevención y entendimiento.

A lo largo del tiempo, los interruptores de SF₆ han sido considerados como los interruptores más eficientes y confiables de su tipo. Esta técnica fue introducida por GEC, ALSTHOM, T y D (entonces DELL ALSTHOM) a finales de 1950 para equipos de media tensión y se extendieron en 1960 a interruptores de alta tensión [9].

Los primeros intentos por investigar el comportamiento del arco en el medio de extinción fueron realizados por T. E. Browne Jr. en 1954 [10]. A partir de este trabajo un mayor interés se presentó por simular el funcionamiento de un interruptor de potencia de una manera aproximada y experimental. De este tipo de trabajos resultaron modelos matemáticos y determinación de parámetros, así como circuitos equivalentes (circuitos sintéticos) derivados de pruebas experimentales en los cuales se incluye el efecto del arco eléctrico como resistencia variable en el tiempo y cuyas regulaciones fueron marcadas tanto por el IEC en 1973 [3] como por IEE en 1981 [5]. En el año 1988 se emplean los TACS del programa de simulación EMTP para calcular la resistencia de post-arco en los interruptores de potencia, basándose principalmente en mediciones de corriente de post-arco empleando el modelo modificado de Mayr, con el objetivo de predecir fallas durante el periodo térmico de recuperación en interruptores de SF₆, siendo ésta una nueva técnica prometedora en la asistencia del desarrollo de interruptores [6,7]. En 1990 se obtienen comparaciones entre los circuitos sintéticos y cálculos numéricos con modelos matemáticos de arco eléctrico [11].

En 1992 se describe la clasificación de modelos de “caja negra” y modelos “físicos”, siendo estos últimos los más difíciles de emplear por la necesidad de una costosa infraestructura con la que cuentan pocos laboratorios de prueba en alta tensión en el mundo [12].

En 1993, contando con algunos datos obtenidos de forma experimental, se realizan trabajos acerca del desempeño interno de interruptores de potencia en fallas kilométricas, empleando parámetros de arco constantes [13-16, 20]. Teniendo la necesidad de obtener resultados en un rango más amplio de corriente de arco eléctrico para determinar la capacidad de interrupción de corriente del interruptor, en el año 1995 se presentan trabajos empleando modelos combinados de arco eléctrico Mayr-Cassie con parámetros constantes para determinar el desempeño del interruptor, obteniendo resultados bastante aceptables [4, 8, 12, 13, 17-20].

En el 2000 se desarrolló un trabajo de investigación basado en la incorporación de distintos modelos de tipo “caja negra” en el ATP, con el objetivo de comparar las características transitorias entre estos modelos y proporcionar criterios de aplicación para cada uno de ellos [21]. Sin embargo, las implementaciones se realizaron en las tarjetas de datos con que cuenta dicho programa (archivos ATP), las cuales son de difícil creación y modificación por lo cual, a raíz del desarrollo de la interfaz gráfica ATPDraw, están obsoletas. Esto limitó la obtención de modelos de uso más general.

Recientemente (2004) se publicó un trabajo desarrollado en el ATP/EMTP en el cual se propone un modelo del interruptor para el cual se consideran cuatro etapas (interruptor cerrado, encendido del arco, fase de corriente en el cruce por cero y circuito abierto) las cuales son parte del ciclo de trabajo del interruptor (apertura), logrando buenos resultados, además de su fácil implementación por medio de herramientas como TACS o MODELS [18]. Entre los trabajos de investigación más recientes está el desarrollo de un modelo nombrado “modelo universal” del interruptor de potencia, publicado en abril del 2005, el cual se implementó mediante lógica de TACS y puede emplear cualquier ecuación básica que represente la dinámica del arco, además de contemplar la posibilidad incluir los parámetros (P_0 , E_0 , θ_C , θ_M) como variantes en el tiempo [16]. El modelo evalúa en una

primera etapa (pre-cero hasta el cruce por cero) la conductancia del arco, teniendo como variable de entrada la corriente de arco. En una segunda etapa (post-cero) se evalúa la resistencia del arco (no necesariamente con la misma ecuación) teniendo como variable de entrada al voltaje de arco. De esta manera se simula de una mejor forma el ciclo de trabajo del interruptor de potencia.

1.6 Estructura de la Tesis

Enseguida se da una breve descripción del contenido de cada uno de los capítulos de este trabajo de tesis:

- En el **Capítulo 1** se da una introducción general al tema de la tesis, describiendo el objetivo general, planteando el problema que se aborda y la justificación del trabajo de tesis. En este mismo capítulo, se describe brevemente el estado del arte referente al modelado de arco eléctrico para interruptores de potencia.
- En el **Capítulo 2** se trata el tema de los transitorios electromagnéticos por maniobra generados por la acción de los interruptores, así como el desempeño de los interruptores durante el periodo en que se presenta el transitorio.
- En el **Capítulo 3** se tratan los aspectos generales del interruptor de potencia, como son las diferentes clasificaciones (medio de extinción, capacidades interruptivas, configuraciones, etc.). Se describe la física de arco como una parte esencial para entender el principio de operación de los interruptores.
- En el **Capítulo 4** se presenta la formulación matemática de los diferentes modelos de arco eléctrico y su implementación en el programa de simulación ATP/EMTP mediante su interfaz gráfica ATPDraw. Además, se detalla la forma en que se obtienen finalmente los componentes de uso general.

- En el **Capítulo 5** se realizan simulaciones con diferentes casos de estudio incluyendo los modelos y comparando los resultados con los que se obtendrían con interruptores ideales.
- Finalmente, en el **Capítulo 6** se establecen las conclusiones generales del trabajo de tesis, así como recomendaciones para trabajos futuros en el tema.

CAPÍTULO 2

TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS DEBIDOS A LA INTERRUPCIÓN DE CORRIENTE

2.1 Introducción

Un fenómeno transitorio se manifiesta como un cambio repentino en las condiciones normales de operación de un circuito eléctrico, tales como maniobra de interruptores, descargas atmosféricas, variaciones en la demanda de energía, condiciones de falla, etc. [22, 23].

De acuerdo al fenómeno físico, los procesos transitorios en sistemas eléctricos de potencia se pueden clasificar de la siguiente forma:

- *Electromecánicos*: se deben a la interacción entre la energía mecánica almacenada en las máquinas rotatorias y la energía eléctrica almacenada en los circuitos del sistema.
- *Electromagnéticos*: se deben a la interacción entre la energía magnética almacenada en los elementos inductivos y la energía eléctrica almacenada en los elementos capacitivos.

La mayoría de los fenómenos transitorios son de naturaleza oscilatoria y por lo tanto pueden clasificarse de acuerdo con la frecuencia de sus oscilaciones, como se muestra en la figura 2.1. El interés de esta tesis se centra en los transitorios de tipo electromagnético, cuyas consecuencias son fundamentalmente voltajes anormales (sobrevoltajes) y corrientes anormales (sobrecorrientes). Los sobrevoltajes pueden ocasionar descargas disruptivas (descargas eléctricas a través del aire), daños en aislamiento o dispositivos del sistema y un eventual deterioro de la confiabilidad del mismo. Por otra parte, las sobrecorrientes pueden provocar daño en el equipo debido a una excesiva disipación de calor. Por lo tanto, un

conocimiento profundo de este tipo de disturbios en la etapa de diseño de los sistemas de transmisión es fundamental.

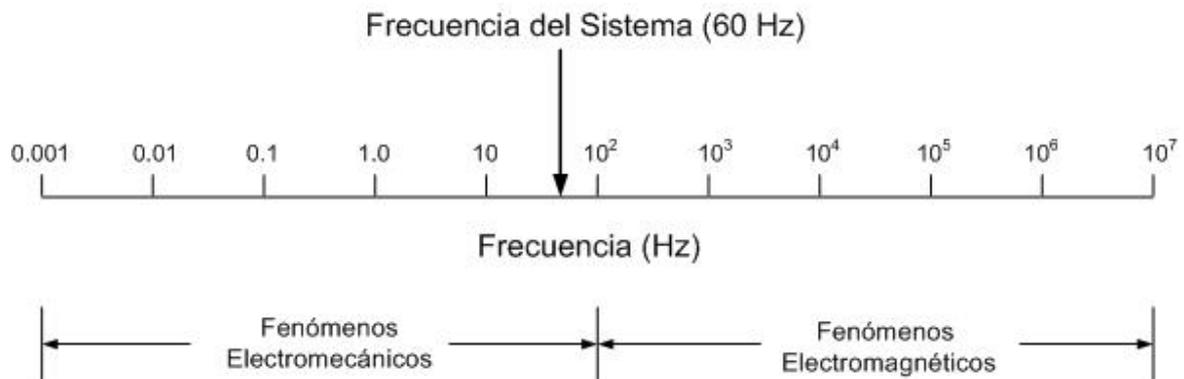


Figura 2.1 Rango de frecuencias de los fenómenos transitorios.

2.2 Maniobra de Interruptores

Cualquier operación de apertura o cierre de interruptores se conoce como una maniobra. Las maniobras pueden ocurrir por acciones programadas o bien como resultado de algún disturbio en la red. Por ejemplo, la entrada o salida de líneas de transmisión asociadas a centrales generadoras y que tienen como objetivo controlar el flujo de potencia de acuerdo a la demanda, representan una acción controlada cuya magnitud de sobretensión se puede evaluar sin problema. La salida o mantenimiento de transformadores de potencia y reactores en alta tensión requiere también de una desconexión programada, como una acción de control cuya magnitud de sobretensión se puede determinar para una situación dada [22, 24].

En cambio, cuando abre un interruptor por acción del disparo de un relevador como resultado de una falla, la desconexión no es controlada y las condiciones en que ocurre son totalmente aleatorias, por lo que determinar para un caso dado la sobretensión de maniobra puede resultar no representativo. Es decir, cualquier condición de apertura o cierre de interruptores bajo condiciones de falla en la red o por la acción de una maniobra errónea

conduce a transitorios que se deben analizar de manera que no se tenga un caso en particular, sino una serie de casos cuyas sobretensiones sean representativas.

Otros casos se dan en líneas de transmisión en las cuales, por razones de estabilidad transitoria, deben realizarse cierres tripolares o monopolares; cuando ocurre una falla, suponiendo que la mayoría de estas son transitorias, se permite que abra el interruptor (en forma tripolar) o sólo la fase fallada, considerando que el mayor porcentaje de fallas son de fase a tierra. Después de un tiempo abierto, medido en milisegundos, se manda una señal de cierre, ya sea de acción tripolar o monopolar. Si la falla persiste, el transitorio de cierre puede ser más severo que el de apertura y en estas condiciones las sobretensiones pueden superar los niveles de aislamiento por maniobra [24, 26].

2.3 Desconexión de Líneas en Vacío

La corriente capacitiva de una línea operando en vacío puede, en función de su longitud, alcanzar valores considerables. En vista del inevitable defasamiento existente entre la corriente capacitiva y la tensión de la línea, se observa que al interrumpir la corriente la línea queda energizada y sometida a una tensión. En el lado del suministro la tensión obedece a la variación dada por el generador. Medio ciclo después de la desconexión puede que se manifieste un incremento de tensión apreciable en los bornes del interruptor, el cual, en el peor de los casos, puede llegar a ser dos o tres veces superior a la tensión de régimen permanente. La consecuencia de este incremento puede ser un reencendido en el arco del interruptor de potencia. La línea se descarga entonces a través del interruptor y su tensión trata de superponerse en forma oscilatoria a la tensión del generador. Si se logra desconectar la oscilación en referencia en su primer paso por cero, la línea de nuevo permanecerá cargada. Transcurrido medio ciclo, la tensión en las terminales del interruptor será mayor que antes, teniendo lugar un nuevo reencendido y así sucesivamente. De esta forma pueden generarse ondas viajeras peligrosas y de elevado poder destructivo [24-26].

En vista de que los sistemas de extra alta y ultra alta tensión denotan longitudes apreciables, se exige al interruptor de potencia diseñado para ellos que esté en condiciones de operar libre de reencendidos hasta tensiones correspondientes al 130 % de su tensión nominal. Afortunadamente el arco eléctrico se reenciende en el primer cuarto de ciclo (reignición), lo cual no conduce a sobretensiones peligrosas. Sólo en casos extremos el reencendido del arco ocurre más tarde, originándose sobretensiones muy peligrosas para el sistema [24, 25].

2.4 Desconexión de Bancos de Capacitores

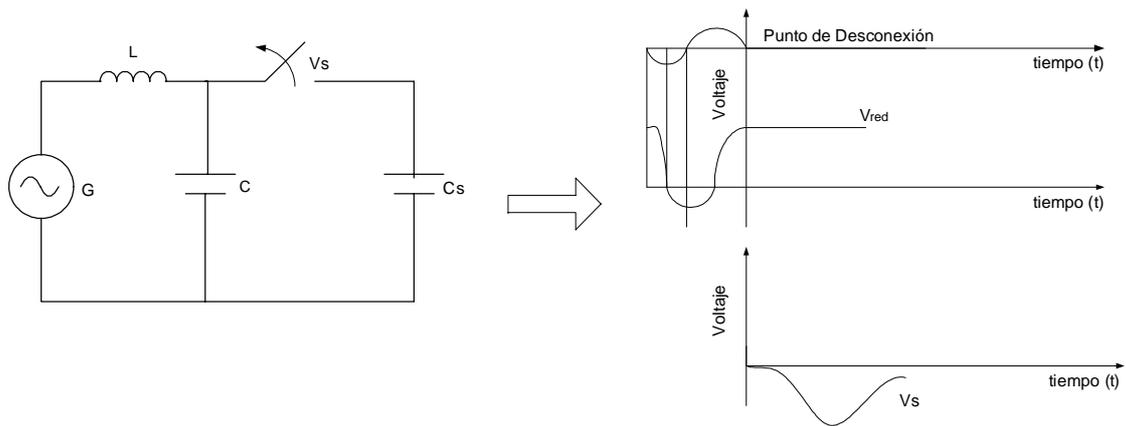
Los efectos de las maniobras con bancos de capacitores en los sistemas eléctricos dependerán de la localización del banco, del tipo de maniobra, de la potencia reactiva del banco y de las condiciones de operación de la red. Una maniobra de desconexión puede dar lugar a oscilaciones cuyo valor pico sea varias veces el valor de la tensión de operación en la red, mientras que una maniobra de desconexión no tendrá efectos importantes de no tenerse un cebado (fallo) en el interruptor que se encarga de la desconexión.

Si se dan las condiciones propicias, las sobretensiones pueden ser importantes tanto en un punto donde se realiza la maniobra como en otros puntos de la red. La figura 2.2 presenta un diagrama simplificado de una red en la que se puede originar este tipo de fenómeno.

Considerando la interrupción en circuitos capacitivos, es importante tener definidos los términos *reencendido* y *reignición*. En general, si las condiciones son desfavorables puede ocurrir un rompimiento del dieléctrico en cualquier tiempo después de la extinción del arco. Una *reignición* ocurre cuando en la interrupción de un circuito capacitivo el rompimiento del dieléctrico se mantiene 0.25 ciclos después de que se inició la extinción del arco. Para cualquier tiempo después de este periodo el fenómeno es llamado *reencendido* [24-26].

Muchos interruptores requieren interrumpir corrientes de carga o de falla en el primer cruce por cero de la corriente; sin embargo, de no ser así, esto se debe a la inadecuada rigidez dieléctrica del interruptor en ese instante. En la interrupción de capacitancias la envolvente de la corriente es pequeña y el voltaje de transitorio de recuperación es relativamente bajo

en el cruce por cero. Esta condición se debe a la carga atrapada en el capacitor, por consiguiente existe una alta probabilidad de que el interruptor tenga la capacidad de desconectar al capacitor en el primer cruce por cero. Aunque si esto sucede tan pronto se separen los contactos aparecerá un voltaje de recuperación de 2 p.u. en una distancia muy pequeña. Por consiguiente hay una alta probabilidad de interrumpir un reencendido.



L = Reactancia equivalente del sistema.

C =Capacitancia.

C_s =Capacitancia equivalente del sistema.

V_s =Voltaje del interruptor.

G = Fuente

Forma de onda de desconexión de un circuito capacitivo.

(a) Circuito típico.

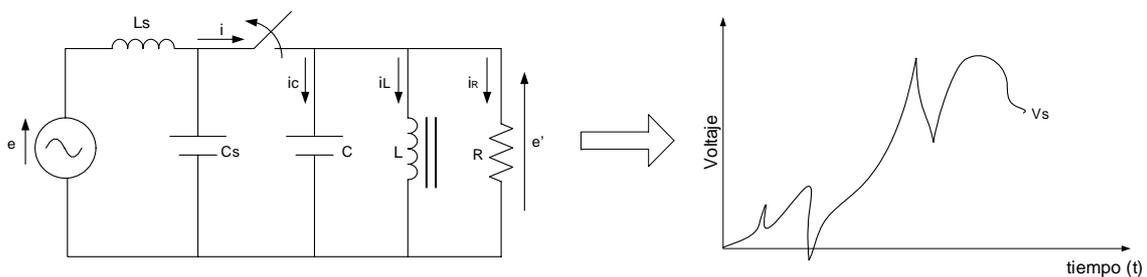
(b) Forma de onda respectiva.

Figura 2.2 Interrupción de corrientes capacitivas.

2.5 Desconexión de Corrientes Anormales

Se supone una operación correcta del interruptor cuando opera o interrumpe una corriente en el cruce natural por cero, sin un reencendido de arco. Ya que generalmente el arco en el interruptor se encuentra sometido a intensas fuerzas extintoras, el arco puede ser disipado antes del cruce natural por cero. Este fenómeno es conocido como corte de corriente (current chopping) y puede ocasionar voltajes transitorios de recuperación muy severos. Este fenómeno fue investigado en forma extensa en el año 1953 por Young y Greenwood (1960) [24-26].

En la figura 2.3 se muestra la interrupción de un circuito de transformador sin carga o reactor en derivación. Después del corte, la corriente fluye en el interruptor principalmente a través de la inductancia de magnetización L , capacitancia C , una pequeña componente de resistencia en los devanados R y pérdidas por corrientes de E_{d1} en el núcleo del material [17]. Cuando la corriente a través del interruptor cesa no puede cambiar abruptamente y continúa fluyendo en la capacitancia C causando un incremento de voltaje en C y en L .



L = Reactancia equivalente del sistema
 L_s =Reactancia equivalente de la fuente
 C =Capacitancia equivalente del sistema
 C_s =Capacitancia del transformador
 V_s =Voltaje del interruptor
 e =Voltaje de la fuente

Forma de onda de desconexión de pequeñas corrientes inductivas.

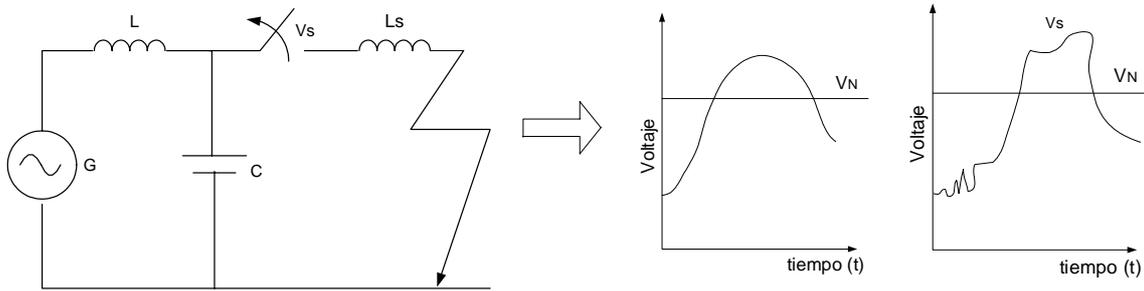
(a) Circuito típico.

(b) Forma de onda respectiva.

Figura 2.3 Desconexión de pequeñas corrientes inductivas (transformador en vacío).

2.6 Desconexión de Corrientes en Fallas kilométricas

Una falla puede ocurrir en cualquier parte de la línea o cable de transmisión. Si la incidencia de la misma se encuentra a menos de 5 km del interruptor, se habla de una falla en línea corta ó falla kilométrica. El interruptor de potencia sometido a esta condición contempla dos tensiones oscilatorias diferentes en sus contactos: una corresponde al extremo de transmisión de la línea (lado de la fuente) y la otra al extremo receptor (lado de la carga) [15, 16, 20, 37-39].



L= Reactancia equivalente del sistema.

Ls= Inductancia de la línea a 1 km con respecto a la fuente

C= Capacitancia equivalente del sistema.

Vs= Voltaje del interruptor.

(a) Circuito típico.

V_N= Voltaje nominal.

Vs= Voltaje del interruptor.

(b) forma de onda respectiva.

Figura 2.4 Falla kilométrica o falla en línea corta.

El voltaje del interruptor de lado de la línea es igual a la caída de tensión en el segmento de línea fallado. El voltaje máximo y la frecuencia de oscilación transitoria de lado de la línea está en función de la distancia de la falla y de las terminales del interruptor. La tasa o factor de recuperación de voltaje es considerablemente grande para el caso en que la falla se da en las terminales del interruptor, aunque el voltaje máximo del transitorio es relativamente bajo. Sin embargo, es de mayor consideración la inyección de potencia al interruptor durante el periodo transitorio de corriente post-arco del lado de la línea.

El coeficiente de recuperación del voltaje transitorio de lado de la línea es igual al producto de la impedancia natural (Z_n) de la línea y del coeficiente de cambio de la corriente en el momento de la apertura, esto es:

$$\frac{dv}{dt} = Z_n \frac{di}{dt}$$

Por lo tanto, la severidad del voltaje transitorio de recuperación depende del lugar en donde se encuentre la falla, ya que esto determinará las magnitudes de la tasa de crecimiento corriente de falla di/dt y el valor máximo de la forma de onda diente de sierra, debido a que esta es proporcional al tiempo de reflexión de la falla [24-26].

CAPÍTULO 3

ASPECTOS GENERALES DE LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA

3.1 Introducción

Un interruptor de potencia (Figura 3.1) es un dispositivo cuya función consiste en interrumpir y restablecer la conducción de la corriente en un sistema eléctrico. El margen de aplicación de los interruptores de potencia es hoy en día más amplio, debido fundamentalmente a las elevadas tensiones de transmisión de energía, las cuales llegan a 800 kV, mientras que a nivel experimental las tensiones respectivas sobrepasan los 1200 kV. Las intensidades de corto circuito de los sistemas densamente mallados han sobrepasado los 50 kA debido a las elevadas densidades de carga de las ciudades modernas y centros industriales de gran capacidad de producción [27].

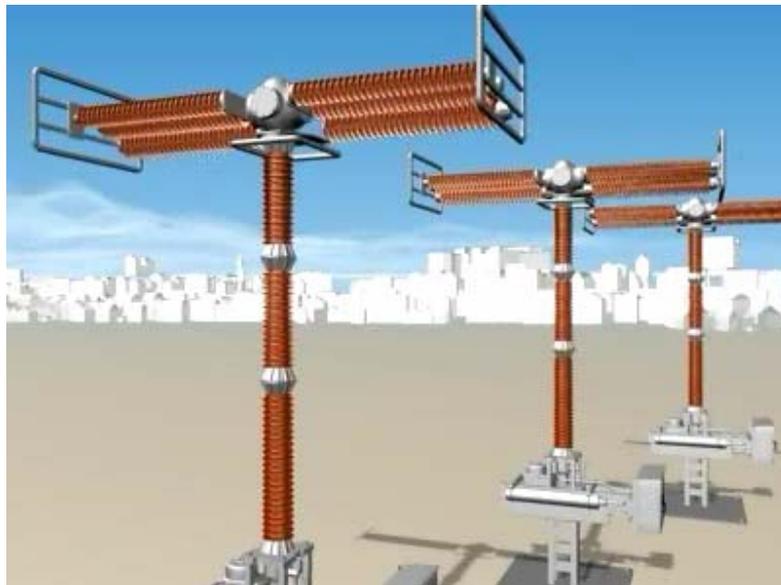


Figura 3.1 Interruptor de potencia [28].

El rumbo que ha tomado la evolución de los interruptores de potencia en cuanto a medios de extinción ha sido determinado por los descubrimientos en líquidos y gases dieléctricos, por lo que los primeros interruptores utilizaban como medio de extinción el aire, cuyas propiedades hacían su utilización muy sencilla. Posteriormente, al incrementar las capacidades interruptivas se recurrió a líquidos que demostraron ser altamente aislantes como el aceite.

La producción del SF₆ y la utilización del vacío como medios interruptores marcaron una revolución en la industria al reducir los dispositivos y hacerlos más confiables. Considerando que los interruptores de aire y de aceite tienen aproximadamente 100 años, los interruptores de SF₆ son relativamente recientes, pero poco a poco han ido dominando el terreno de las altas tensiones. Casi sin excepción alguna se usan los interruptores de SF₆ en cualquier sistema de voltaje en un rango de 72.5 kV a 800 kV, dejando a las demás tecnologías (aire y aceite) prácticamente obsoletas [25, 26].

3.2 Interruptores de Aceite

Los interruptores de aceite fueron los primeros en emplearse para interrumpir intensidades elevadas de corriente a tensiones igualmente elevadas. Constructivamente constan de un recipiente de acero lleno de aceite en el cual se encuentran emplazados dos contactos en serie, como se muestra en la figura 3.2. El aceite sirve al mismo tiempo como medio aislante y medio de extinción de todo el dispositivo. El funcionamiento básico de este interruptor se puede resumir de la siguiente manera:

- Al separarse los contactos se forman arcos eléctricos con incrementos locales de temperatura de 4000 a 8000° K. Dichas temperaturas conducen a una descomposición y gasificación del medio, formándose principalmente hidrógeno.
- La energía necesaria para este proceso se sustrae del mismo arco eléctrico, el cual se refrigera, aumentando su propia tensión y creando, al mismo tiempo, condiciones favorables para su extinción.

- La gasificación que se forma dentro del contenedor, en la proximidad de los contactos, crea una turbulencia en el aceite, la cual contribuye a desionizar al espacio interelectródico.

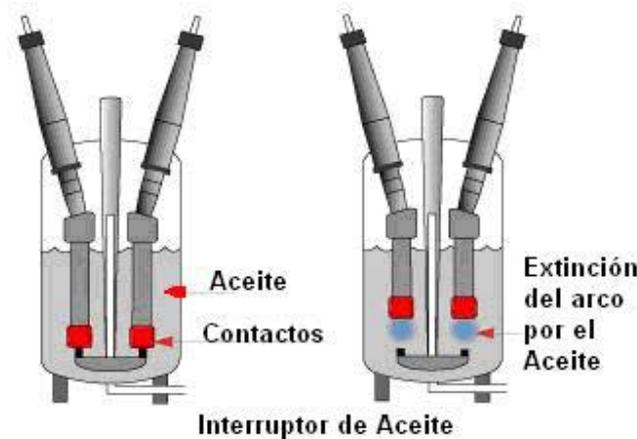


Figura 3.2 Proceso de interrupción en aceite.

En el proceso de gasificación, por lo general, se forma hidrógeno (70 %), acetileno (C_2H_2 , 20 %), al igual que metano y otros gases.

Las principales ventajas del interruptor de aceite se pueden resumir de la siguiente manera [20]:

1. Funcionamiento sencillo, simplificándose la operación y el mantenimiento.
2. La presencia del aceite como medio agente extintor obliga a arcos eléctricos de reducidas dimensiones y por consiguiente, también menos espacio para la cámara de interrupción.
3. Los países anglosajones, en particular Estados Unidos, tienen una amplia experiencia con este tipo de interruptor, es decir, ya ha sido sumamente probado en la práctica.

Entre las desventajas del interruptor de aceite resaltan las siguientes:

1. En los interruptores de gran volumen de aceite se requiere de gran cantidad de aceite para el funcionamiento nominal (50,000 L para 230 kV) [25, 27], el cual se

tiene que renovar o regenerar después de haberse efectuado un número determinado de operaciones.

2. El aceite es combustible, lo cual, en conjunto con las elevadas presiones que se pueden presentar dentro del recipiente, podría con llevar a una eventual explosión. Lo mismo podría resultar con los productos de la descomposición del aceite al entrar en contacto con el aire.
3. La carbonización del aceite, ocasionada fundamentalmente por el arco eléctrico, disminuye en el transcurso del tiempo sus propiedades dieléctricas. La acumulación de las sustancias producto de la carbonización implica la adopción de medidas preventivas como limpieza periódica de la cuba y así como la regeneración o renovación del aceite.

3.3 Interruptores de Aire Comprimido

La meta de este tipo de interruptores es “refrigerar el arco”, extenderlo dentro y fuera del espacio interelectrónico, para así permitir la recuperación de la rigidez dieléctrica del espacio en cuestión. En este caso se habla entonces de desconexión o despeje satisfactoria de la corriente de falla. En la figura 3.3 se presentan interruptores de aire para un nivel de tensión de 23 kV.

Es importante resaltar que el aire, en contraste con otros medios, no denota propiedades extintoras especiales, de allí que se tenga que recurrir en los interruptores de potencia a elevadas presiones de soplado. Los interruptores neumáticos o de aire comprimido en su principio de funcionamiento emplean un chorro de aire que es forzado a pasar entre los contactos en el momento de la apertura, para estirar y enfriar al arco eléctrico, como se muestra en la figura 3.4. Es frecuente utilizar también mecanismos neumáticos para el accionamiento de las cuchillas o seccionadores de la subestación. Sin embargo, este tipo de mecanismo es costoso, en vista de lo cual el interruptor de aire comprimido se ha visto desplazado por otros interruptores, como el de SF₆ [25-27].

Como se ha explicado, la extinción del arco en este interruptor no depende de la intensidad de corriente, pudiéndose tener además tiempos de interrupción de hasta medio ciclo que requieren algunos sistemas debido a problemas de estabilidad.

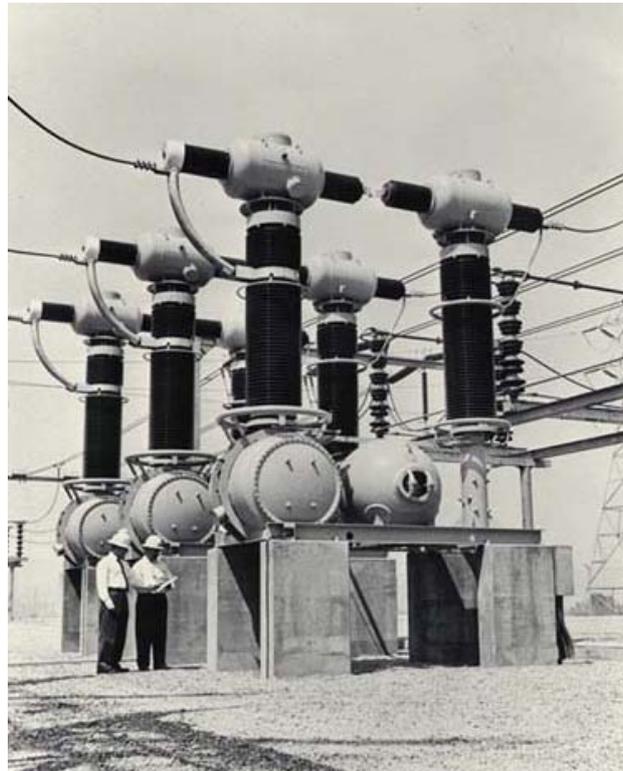


Figura 3.3 Interruptores de aire, 23 kV [29].

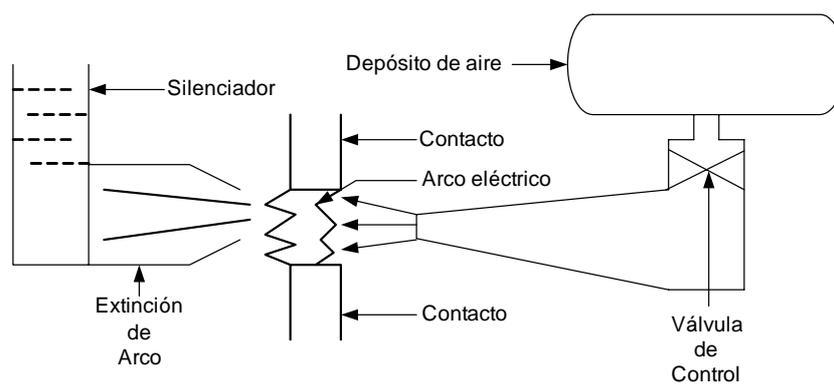


Figura 3.4 Diagrama esquemático de un interruptor de aire.

El interruptor de aire comprimido permite, en forma sencilla, la aplicación de resistencias de preinserción o maniobra al igual que la interrupción múltiple con regulación capacitiva. En la actualidad existen interruptores de doble soplado de fabricación italiana (Magrini) [29]. Este tipo de interruptor, a pesar de su costo relativamente alto, ha mantenido el liderazgo en los sistemas de extra y ultra alta tensión. Actualmente es el único interruptor que opera satisfactoriamente a 800 kV, aun que los interruptores de SF₆ están ganando terreno rápidamente para tener este privilegio. La desconexión de elevadas corrientes de corto circuito de hasta 70 kA, la desconexión de transformadores en vacío, de bancos de capacitores, etc., no ofrece a este interruptor mayores inconvenientes.

Al igual que en otros tipos de interruptores, es factible conectar varias cámaras de extinción en serie como se muestra en la figura 3.3. En la práctica se pueden tener hasta un total de 14 cámaras en los sistemas de 800 kV. La distribución equitativa del potencial corre a cargo de la regulación capacitiva (capacitores en paralelo con cada una de las cámaras).

Algunas de las desventajas de los interruptores de aire son:

1. Elevado costo de las instalaciones neumáticas, de las cuales existe una gran variedad de configuraciones, como tanque principal, tanque de satélite, etc.
2. Estruendo al desconectar un corto circuito, razón por la cual se evita emplearlo en áreas pobladas.

3.4 Interruptores de Vacío

La alta rigidez dieléctrica que presenta el vacío ofrece una excelente alternativa para apagar en forma efectiva el arco [26, 27]. Cuando un circuito en corriente alterna se desenergiza separando un juego de contactos ubicados en una cámara en vacío, la corriente se corta al primer cruce por cero ó antes, con la ventaja de que la rigidez dieléctrica entre los contactos aumenta en razón de miles de veces más que la de un interruptor convencional (1 kV/ μ s para 100 A en comparación con 50 V/ μ s para el aire). Esto hace que el arco no vuelva a

encenderse. Estas propiedades hacen que el interruptor en vacío sea eficiente, liviano y económico. En la figura 3.5 se presenta una construcción típica de interruptor de vacío.

La presencia del arco en los primeros instantes después de producirse la apertura de los contactos se debe principalmente a emisión termoiónica y a emisión por efecto de campo eléctrico. En otras palabras, los iones apartados del arco provienen de los contactos principales del interruptor. Cabe destacar que en ciertas aplicaciones se hace necesario mantener el arco entre los contactos hasta que la corriente cruce por cero. De esta forma se evitan sobretensiones en el sistema producto de elevados valores de di/dt . La estabilidad del arco depende del material del cual estén hechos los contactos y de los parámetros del sistema eléctrico de potencia (voltaje, corriente, inductancia y capacitancia).

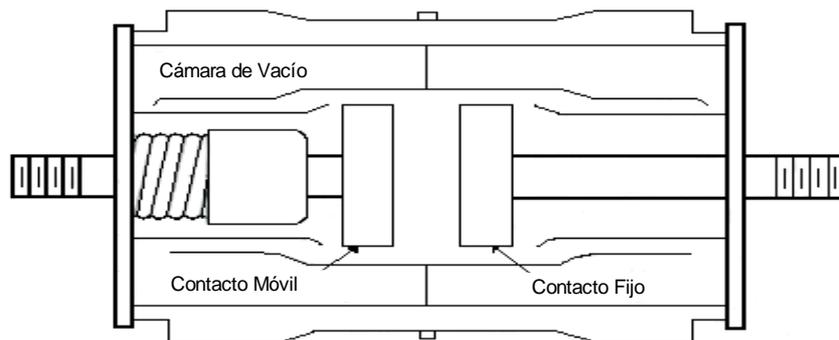


Figura 3.5 Corte transversal de un interruptor en vacío.

Algunas de las ventajas de los interruptores de aire son:

1. Tiempo de operación muy pequeño.
2. La corriente se extingue en el primer cruce por cero.
3. La rigidez dieléctrica entre contactos se restablece rápidamente impidiendo la reignición del arco.
4. Son más baratos y livianos.
5. Prácticamente no requieren de mantenimiento y tienen una vida útil mucho mayor que la de los interruptores convencionales.

Algunas de las desventajas de los interruptores de aire son:

1. Baja capacidad de ruptura (de entre 60 a 100 MVA).
2. La posibilidad de generar sobretensiones debido al elevado di/dt .
3. Dificultad para mantener la condición de vacío.
4. Capacidad de interrupción limitada.

3.5 Interruptores de SF₆

El hexafluoruro de azufre (SF₆) fue obtenido de manera sintética en el año 1900 por Henry Moissan y comercializado hasta 1947. Este gas ha alcanzado una gran popularidad debido a sus excepcionales características físicas, propiedades químicas, dieléctricas y extintoras, para ser empleado en equipos de extra alta y ultra alta tensión. En la figura 3.6 se observan interruptores monopolares de SF₆ [25, 27, 30].

Al ocurrir la apertura en presencia de SF₆, la tensión del arco se mantiene en un valor bajo, razón por la cual la energía disipada no alcanza valores muy elevados. La rigidez dieléctrica de este gas es 2.5 veces superior a la del aire (a presión atmosférica). Esta rigidez depende de la forma del campo eléctrico entre los contactos, el que a su vez depende de la forma y composición de los electrodos. Si se logra establecer un campo magnético no uniforme entre los contactos, la rigidez dieléctrica del SF₆ puede alcanzar valores cercanos a 5 veces la del aire. Son unidades trifásicas selladas herméticamente que pueden operar por largo tiempo sin mantenimiento, debido a que el gas prácticamente no se descompone, además de no ser abrasivo.

Las principales desventajas de este tipo de interruptores son las siguientes:

1. No puede operarse a temperaturas muy bajas (inferior a 10° C), para evitar que el gas se licue, lo que obliga a utilizar calefactores cuando se emplea en exteriores.
2. Su alto costo en comparación con los otros interruptores.



Figura 3.6 Interruptores monopolares en SF₆ [28].

A continuación se describen las características más importantes del SF₆, con el fin de comprender su intervención en el fenómeno del arco eléctrico, interacción con los circuitos eléctricos y los fenómenos transitorios, así como mostrar sus ventajas y desventajas al usarlo como gas extintor en interruptores de potencia.

3.5.1 Propiedades químicas del SF₆

El SF₆ es químicamente estable hasta los 150° C, condición bajo la cual no reacciona con metales, plásticos u otros materiales, normalmente utilizados en la construcción de interruptores. A temperaturas mayores de 150° C, el agua (humedad) o ciertos metales, como el acero al silicio, descomponen al SF₆. El hexafluoruro de azufre no es corrosivo para los metales a temperatura ambiente. Combinadas las propiedades eléctricas, físicas y térmicas del SF₆ ofrecen muchas ventajas cuando es utilizado en equipo eléctrico. Algunas de estas son: seguridad, reducción de tamaño y peso, diseño óptimo, operación confiable y silenciosa, fácil instalación y manejo así como mantenimiento mínimo. A pesar de que el gas SF₆ presenta muchas más ventajas que los otros medios de extinción, también tiene grandes inconvenientes entre los cuales se citan los siguientes:

- Este gas es un peligro potencial por causar el efecto invernadero y por permanecer en la atmósfera en un periodo de tiempo muy prolongado (entre 800 y 3200 años).

- En grandes concentraciones puede ser mortal al ser inhalado.
- El producto resultante de la descomposición (fluorita) por el arco eléctrico al contacto con el agua es sumamente peligroso.

3.5.2 Propiedades físicas del SF₆

El SF₆ se comporta como aislante en estado gaseoso a temperatura y presión ambiente (20° C y 760 mmHg) y tiene una densidad de 6.139 Kg/m³ (alrededor de 5 veces más denso que el aire). Su masa molecular es de 146.06 y su temperatura crítica es de 45.6° C.

3.5.3 Propiedades eléctricas y térmicas del SF₆

La molécula del SF₆ es electronegativa (tiende a capturar electrones libres), por lo que tiene una rigidez dieléctrica más alta que el aire (alrededor de 2.5 veces) a presión atmosférica.

El calor específico del SF₆ en relación con la unidad de volumen es 3.7 veces más grande que el del aire, en razón de que su masa específica representa alrededor de 5.19 veces la del aire. Esto trae consecuencias muy importantes, debido a la reducción del calentamiento del equipo eléctrico. La conductividad térmica del SF₆ es inferior a la del aire, pero su coeficiente global de transferencia de calor, tomando en cuenta en particular la convección, es excelente, parecida a la de los gases como el hidrógeno o helio, y es más grande que la del aire [25, 27].

En la figura 3.7 se observa la curva de conductividad térmica del SF₆ contra la temperatura, comparada con la del nitrógeno, haciendo sobresalir las cualidades excepcionales de este gas para extinguir el arco eléctrico por enfriamiento térmico.

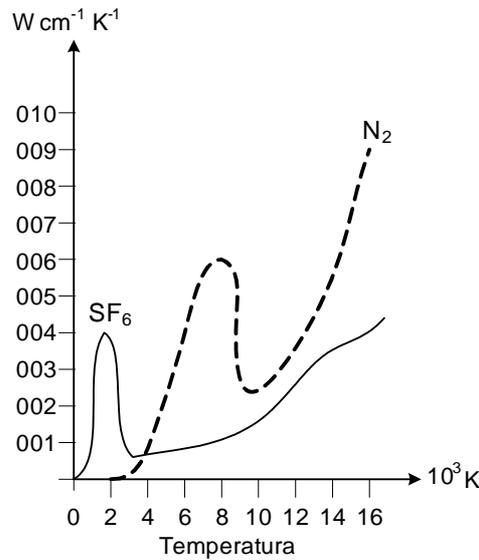


Figura 3.7 Curva de conductividad térmica del SF_6

3.6 Física de Arco en Interruptores

Una vez expuestos los diferentes tipos de interruptores, es conveniente analizar el comportamiento del arco eléctrico entre los contactos de estos dispositivos. La generación o creación de un arco eléctrico puede dar inicio por un arqueo (*flashover*) entre dos electrodos o por la separación de los contactos del interruptor [25, 30, 32].

El arco eléctrico inicia como un proceso de ionización acumulativa en los iones y electrones de una primera generación que al ser colisionados generan un número mayor de iones y electrones en las generaciones subsecuentes que van del cátodo al ánodo en forma de avalancha (*Townsend avalanche*). Una vez que el canal conductivo se ha establecido entre los electrodos la corriente sigue incrementándose debido al suministro de energía proveniente de la red. El voltaje empieza a caer y la chispa se convierte en un arco. Esta transición se lleva a cabo para un valor del orden de 0.1 A, como se muestra en la figura 3.8.

Cuando los contactos del interruptor se separan, la corriente a través de los contactos continúa fluyendo, conducida por la energía magnética almacenada en las inductancias del

sistema eléctrico de potencia. En el último momento, justo antes de que los contactos se separen, sólo está en contacto una pequeña área. El resultado de la densidad de altas corrientes es seguido por un intenso calor, evaporación y derretimiento del material de los contactos [25, 32].

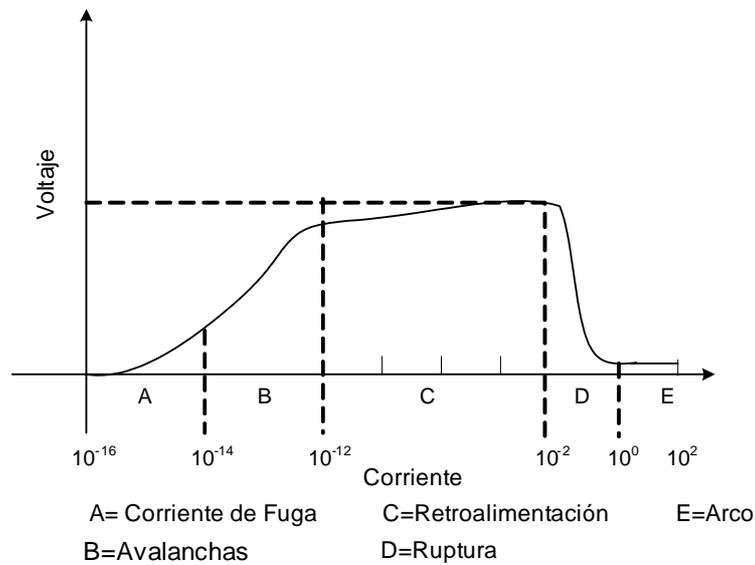


Figura 3.8 Curva característica Voltaje-Corriente del proceso de ruptura.

El arco eléctrico generalmente puede ser dividido en tres regiones: la columna, la región anódica y la región catódica, como se indica en la figura 3.9. Las variables medibles de cada región son el campo eléctrico y la distribución de la temperatura a lo largo de la columna del arco. En la figura 3.10 se muestra la distribución del potencial a lo largo del arco eléctrico. El gradiente de potencial depende de la corriente de arco y del intercambio de energía entre el arco y sus alrededores (tipo de medio aislante, velocidad, presión, partes sólidas cercanas) [25, 24].

Las regiones electrodoicas tienen la función de permitir la transición de un conductor gaseoso de conductividad variable, a una columna de arco y a un conductor sólido de conductividad constante, además de proporcionar portadores a la columna. Mientras que en el primer caso su función se considera pasiva, en el segundo caso su participación es activa, ya que depende del material electrodoico. El cátodo es siempre activo, ya que provee

electrones del material, los cuales son acelerados a través de una región de alto campo, hasta que tienen la suficiente energía para ionizar partículas neutras.

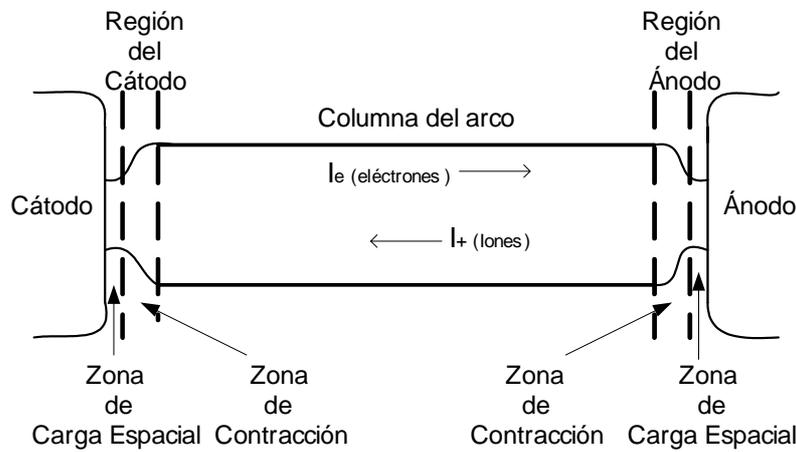


Figura 3.9 Diagrama esquemático de las diferentes regiones en una columna de arco uniforme.

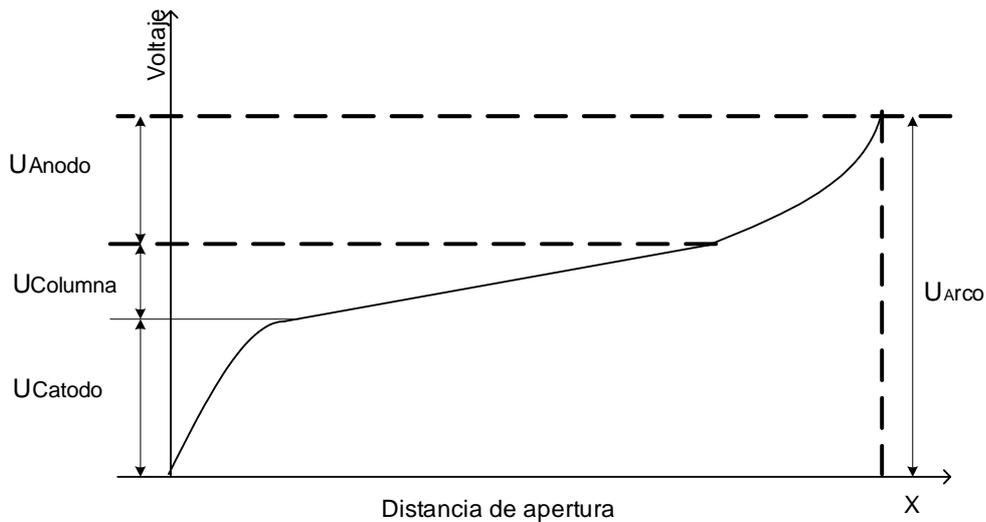


Figura 3.10 Distribución de potencial en el arco.

La caída de potencial en la región catódica es primeramente función del material del cátodo y puede dividirse entre la caída de tensión en el cátodo y una sección en la frontera adyacente al mismo. La caída de tensión en el cátodo es típicamente entre 10 a 20 V y se extiende sobre una región de 10^{-3} a 10^{-2} mm, mientras que en la frontera, la misma es de solo unos milímetros de grueso. La caída de potencial en la región anódica es función de la

geometría y por tanto varía ampliamente. Nuevamente ésta se divide en una caída de potencial anódica de 0 a 5 V, sobre una región de aproximadamente 10^{-3} mm y una sección en la frontera adyacente al mismo. Esta sección de frontera adyacente se forma debido a la pérdida de energía axial de la columna de arco al ánodo frío y ésta es nuevamente de pocos milímetros.

3.6.1 Columna del arco

La columna del arco en gases a alta presión es una región cilíndrica en la cual los gases ionizados dan casi exactamente igual número de densidad de cargas positivas y negativas, por lo que las densidades de corrientes muy altas pueden ser soportadas con campos eléctricos axiales relativamente bajos. La temperatura en la columna del arco es muy alta, alrededor de 7000 K a 25000 K, tan alta que las moléculas del gas pueden ser desasociadas en átomos libres. La fracción de átomos libres puede ser calculada por la ecuación de Saha [21, 25]:

$$\frac{f^2}{1-f^2} P = 3.16 \times 10^{-7} T^{5/2} \cdot \exp(-eV_i/kT)$$

En la expresión anterior se tiene:

$e = 1.6 \times 10^{-19}$ Carga del electrón

V_i = Potencial de ionización en un medio gaseoso

$K = 1.38 \times 10^{-23}$ constante de Boltzmann

P = Presión del gas en bar

T = Temperatura en k

En la figura 3.11 se muestra una gráfica de la ecuación de Saha para el oxígeno y el nitrógeno. En esta figura se observa la ionización térmica que puede usarse para cambiar de un estado de conducción (f cerca de 1) o no conducción (f cerca de cero). Debido a la pendiente relativamente pronunciada entre la temperatura y el grado de ionización, la reducción de la temperatura del arco por medio del gas frío es una manera eficaz de llevar a la columna de arco de un estado de conducción a uno de no-conducción. Este principio es comúnmente empleado en los interruptores.

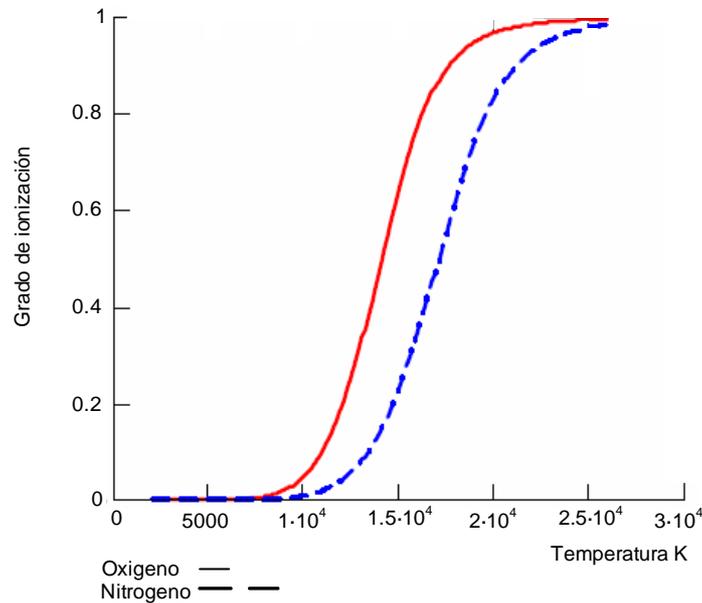


Figura 3.11 Gráfica que describe la ecuación de Saha para oxígeno y nitrógeno.

Aunque la columna de arco se ioniza fuertemente, lo que se tiene es un equilibrio entre cargas de electrones y de iones positivos, en el cual los electrones tienen una mayor movilidad que los iones positivos. Por consiguiente casi el flujo completo es debido a los electrones. Debido a la fuerte ionización y a la alta corriente de arco, el plasma es relativamente un buen conductor. Un valor típico de conductividad del plasma de arco es 10-100 S/cm, que es comparable con la conductividad del carbón.

El voltaje total del arco y también el voltaje del gradiente a lo largo del arco dependen de la magnitud, tipo y presión del gas. Debido al balance térmico, la columna del arco se ajusta de tal manera que proporciona potencia a la columna hasta obtener un valor mínimo de voltaje [25].

3.6.2 El cátodo

La función del cátodo es proporcionar electrones libres a la columna del arco. Generalmente el cátodo se caracteriza por los diferentes mecanismos mediante los cuales

son liberados los electrones. Los materiales refractarios con un punto de ebullición alto, tales como el tungsteno, carbón, molibdeno o circonio, emiten electrones cuando son calentados a temperaturas menores a la evaporación (emisión termiónica). Típicamente existe un punto estacionario con una temperatura arriba de los 3500 K, el cual es calentado principalmente por bombardeo de iones acelerados en la región del cátodo.

En el momento de la interrupción de la corriente alterna, el enfriamiento del punto caliente es lento comparado con la escala de tiempo asociada al rango de elevación de la tensión de recuperación. Por otra parte, los materiales termoiónicos mezclados con un buen conductor como el cobre o la plata muestran poca erosión al paso de una corriente grande y por lo tanto son adecuados para su uso en los contactos de interruptores de potencia.

La densidad de corriente en el cátodo usualmente es de al menos dos órdenes de magnitud más grande que la de la columna de arco. El resultado es un gradiente de presión magnética debido al cambio del campo magnético propio, el cual acelera al gas alejándolo del cátodo. Como resultado, el gas frío entrante proveniente de las áreas adyacentes lleva a la formación de una frontera enfrente del cátodo en la cual el frío es calentado a la temperatura del plasma de la columna de arco [25].

3.6.3 El ánodo

El ánodo puede ser activo o pasivo. En el modo pasivo, solo sirve para recolectar la corriente electrónica de la columna del arco a la superficie. En el modo activo, la evaporación del material en el ánodo puede ser ionizado para proporcionar iones al plasma.

En general las densidades de corriente en el punto caliente formado en el ánodo son más pequeñas que las formadas en el cátodo. Sin embargo, los efectos magnéticos no pueden ser ignorados debido a un efecto de reforzamiento.

Existe un flujo que se aleja del ánodo debido a un gradiente de presión magnética que resulta de la succión de aire frío a la región anódica, la cual enfría el arco y ocasiona una

fuerte extinción del mismo. Esto resulta en un incremento en la propulsión del gas, hasta que las pérdidas de calor en aumento, en la región de la extinción estabilizan al arco [25].

3.6.4 Ionización de arcos

La ionización en columnas de arco toma lugar cuando ocurre un proceso en el cual se aplica la suficiente energía a partículas neutras para arrancar uno o varios electrones. Esta energía puede ser proporcionada por el impacto directo de electrones, átomos neutros, iones positivos o fotones. No siendo necesario que la ionización se dé durante el primer impacto, una partícula puede ser excitada en un primer impacto e ionizada en un segundo.

El proceso de ionización en un interruptor de potencia es primordialmente térmico en el periodo de conducción debido a la agitación de las partículas a muy alta temperatura y por impacto en el campo eléctrico de la descarga, momentos antes del cruce por cero de la corriente [25].

3.6.5 Características del arco

Durante una operación de apertura, el resultado total de la conservación de los flujos asociados es que la corriente que fluye en el sistema de inductancias antes de la maniobra continúa fluyendo, siguiendo la trayectoria de los contactos.

El último punto de contacto en los electrodos tiene una densidad de corriente extremadamente elevada y la superficie de contacto literalmente *estalla*, originando la etapa de conducción gaseosa en el arco. Como un elemento de circuito, el arco se comporta como un resistor no lineal con la tensión del arco en fase con la corriente de arco. La tensión de arco puede ser considerada como una función de la corriente de arco, pero su forma exacta y su valor también dependen de los efectos de enfriamiento y de los métodos de deionización que se utilicen para la extinción del arco. Entre otros factores que afectan la tensión de arco se incluyen su longitud y las propiedades del medio circundante, especialmente sus características de transferencia de calor.

3.6.6 Características estáticas

La relación entre la tensión y la corriente del arco es conocida como característica del arco, la cual se denomina estática cuando los cambios en la corriente de arco toman lugar muy lentamente y dinámica cuando estos cambios son muy rápidos. La figura 3.12 muestra la relación de características estáticas.

A pequeñas corrientes, (del orden de 10 A), el arco tiene características volt-ampere de decaimiento, tendiendo más adelante a requerimientos de potencia constantes. El concepto importante a notar es que la tensión de arco no es una función de la tensión del sistema, sino que es determinada por la potencia de entrada requerida para sostener el arco [25-27].

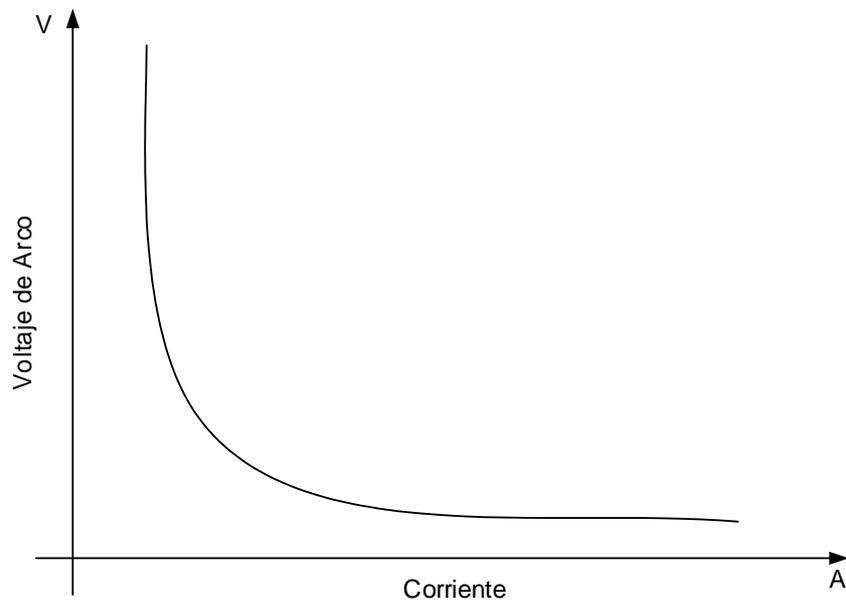


Figura 3.12 Características estáticas Volt-Ampere de la columna de arco.

3.7 El Proceso de Interrupción

La principal función de los interruptores es pasar rápidamente de un dispositivo conductor de corriente a un aislante de corriente. Para que la apertura del interruptor sea exitosa, deben de satisfacerse dos condiciones:

1. El arco debe “enfriarse” a un estado de no conducción en el momento del cruce por cero.
2. Después del cruce por cero, el interruptor debe de ser capaz de soportar la tensión transitoria de recuperación (TTR) que aparece entre sus polos.

Entonces, la posibilidad de una apertura exitosa está relacionada con la tasa de disminución de la corriente a cero, di/dt , y con la tasa de incremento del voltaje de recuperación después del cruce por cero, dv/dt . En la figura 3.13 se muestra lo que pasaría si el interruptor no alcanza las condiciones para extinguir de manera eficiente el arco en el primer cruce por cero posterior al inicio de la separación de los contactos, originándose un restablecimiento del arco. 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 [23]. De esta forma, el restablecimiento del arco puede clasificarse en:

- Térmico: 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
- Dieléctrico: cuando la tensión que soportan entre sí los contactos es superior a la que puede soportar la capa aislante ocasionando una descarga brusca y su posterior colapso.

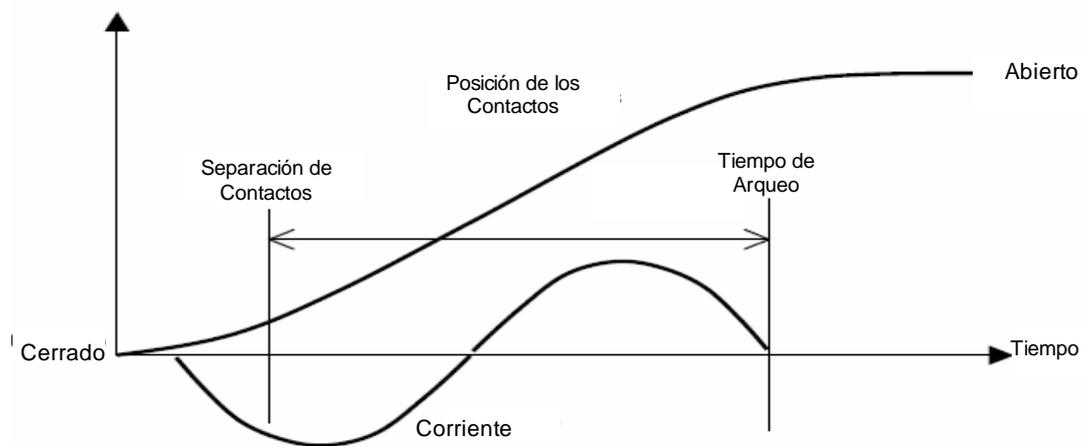


Figura 3.13 Separación de contactos e interrupción del arco eléctrico en el interruptor.

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

A partir del momento en que se apaga totalmente el arco, da comienzo una “*carrera*” entre la tensión transitoria de recuperación (TTR), es decir, 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. La extinción 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 [25, 26].

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA PARA EL MODELADO DE INTERRUPTORES

4.1 Introducción

Bajo condiciones normales de operación, un interruptor de potencia se encuentra cerrado, de manera que cierta corriente fluye a través de sus contactos. En el momento en que el interruptor recibe una señal de apertura se inicia la separación de los contactos, provocando la generación del arco eléctrico, como se describió en el Capítulo 3.

Los objetivos que se persiguen con el modelado de interruptores de potencia son los siguientes:

- Desde el punto de vista del sistema, determinar los voltajes y corrientes que se producen como consecuencia de la acción de apertura.
- Desde el punto de vista del interruptor en sí, determinar si es capaz de operar exitosamente bajo condiciones particulares de operación.

Usualmente, los modelos de interruptores para análisis de transitorios electromagnéticos son ideales, no se considera en la apertura el fenómeno del arco, de manera que la corriente se disipa completamente en el primer cruce por cero posterior a la señal de apertura. Los interruptores ideales se aplican para estudios en los cuales la interacción entre el arco eléctrico y el sistema de potencia puede despreciarse. A la fecha, los programas comerciales de simulación de tipo EMTP (Electromagnetic Transients Program), tales como el ATP (Alternative Transients Program) y el EMTDC (Electromagnetic Transients for Direct Current) incluyen únicamente modelos ideales del interruptor [2, 31].

En ocasiones es necesario evaluar la capacidad interruptiva del interruptor de potencia, así como su influencia en el resto del sistema de una forma detallada [7]. Para este tipo de análisis el modelo de interruptor ideal puede ser insuficiente. Esto se debe fundamentalmente al fenómeno del arco eléctrico, el cual puede originar que la respuesta real del interruptor difiera en gran medida de lo obtenido en simulaciones.

En cuanto a los modelos de interruptor que incluyen el efecto del arco, la mayoría de ellos se han hecho de forma experimental, lo cual resulta técnica y económicamente costoso debido a la tecnología e infraestructura requerida en la investigación de la física de arco. Los modelos modernos de arco eléctrico dan buenos resultados; sin embargo, necesariamente deben ser reducidos y simplificados, de lo contrario la programación y solución de las ecuaciones diferenciales sería muy complicada [17]. Se han obtenido buenos resultados con modelos reducidos en diferentes trabajos enfocados a la física del arco, concluyendo que dichos modelos son una herramienta muy útil en el análisis del arco eléctrico y modelado de interruptores de potencia [8].

En este Capítulo se describen los modelos reducidos de arco eléctrico de tipo “caja negra”. Dichos modelos se implementan mediante TACS del programa ATP (ver Apéndice) y su interfaz gráfica ATPDraw, obteniendo finalmente componentes que puedan ser empleados por cualquier usuario del simulador. Además, se implementa un modelo denominado “general” el cual, a diferencia de los anteriores, es capaz de actuar en las diferentes etapas del arco (preencendido, encendido y extinción). El desempeño de los modelos implementados se valida mediante una serie de ejemplos presentados en el Capítulo 5.

4.2 Interruptor Ideal

En los programas de simulación de transitorios, la operación de un interruptor ideal puede representarse de 2 formas:

- Mediante la modificación del sistema nodal, generando nodos para simular la apertura del interruptor y colapsando nodos para simular el cierre. Esta es la forma en que opera el programa ATP.
- Utilizando resistencias para aproximar cierre o apertura, como se presenta en la figura 4.1. Se tiene una resistencia variable todo el tiempo entre los nodos k y m, la cual tiene un valor muy pequeño en el cierre y un valor muy grande en la apertura. Esta es la forma en que se modela el interruptor ideal en los programas comerciales de simulación EMTDC y PSpice, por ejemplo. La ventaja del uso de resistencias es que la estructura del circuito se mantiene todo el tiempo (se tiene el mismo número de nodos).

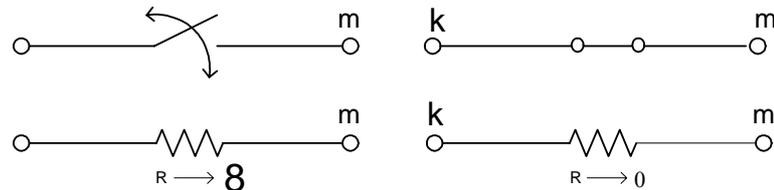


Figura 4.1 Interruptor ideal.

4.3 Modelado del Arco Eléctrico

Los modelos matemáticos de arco eléctrico pueden dividirse fundamentalmente en dos categorías:

- Modelos físicos
- Modelos de tipo caja negra

Los modelos físicos se basan en describir las características físicas del arco a partir de los principios de conservación de masa, momento y energía. Estos modelos consisten en conjuntos de ecuaciones diferenciales parciales las cuales sólo pueden ser manipuladas por computadoras de gran capacidad y velocidad. Además requieren datos experimentales de pruebas en interruptores como arranque. Por otra parte, los modelos de caja negra describen el comportamiento del arco mediante una ecuación diferencial simple, la cual relaciona la conductancia eléctrica del arco, el voltaje del arco y la corriente del arco con ciertos

parámetros físicos, pero de una manera muy simplificada. Mientras que los modelos físicos son aplicables al diseño estricto de interruptores, los modelos de caja negra se utilizan básicamente para simular la interacción arco-circuito en estudios de redes; en estos últimos modelos el aspecto más importante es el comportamiento externo del arco más que los procesos físicos internos [21, 23].

Los modelos de caja negra se basan en el concepto básico de la energía almacenada en el arco, Q , asociada con su conductancia eléctrica, G . Se puede decir que la conductancia es función de la energía almacenada dado que a un incremento en la energía almacenada corresponde un incremento en su conductancia. Se escribe entonces la conductancia de arco como:

$$G(Q) = \frac{i}{v} \quad (4.1)$$

donde, i y v son la corriente y el voltaje del arco, respectivamente (en valores instantáneos).

La derivada de la conductancia con respecto al tiempo puede escribirse como:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{dG}{dQ} \frac{dQ}{dt} = \frac{dG}{dQ} (P_{in} - P_{out}) \quad (4.2)$$

donde P_{in} es la potencia suministrada al arco y P_{out} es la potencia disipada por el arco.

4.4 Modelo de Cassie

A. M. Cassie asumió el canal de arco como un cilindro con gas altamente ionizado y de temperatura constante. De esta forma el contenido calórico (energía almacenada) por unidad de volumen permanece constante y de igual forma la conductancia por unidad de volumen. El diámetro del canal del arco varía cuando la corriente varíe. Se tiene que tanto la conductancia como la energía y la potencia de salida son proporcionales al área de la sección transversal del canal, como se observa en la figura 4.2. Los valores respectivos por unidad de longitud de acuerdo a Cassie son:

$$G = G_0 A \quad (4.3)$$

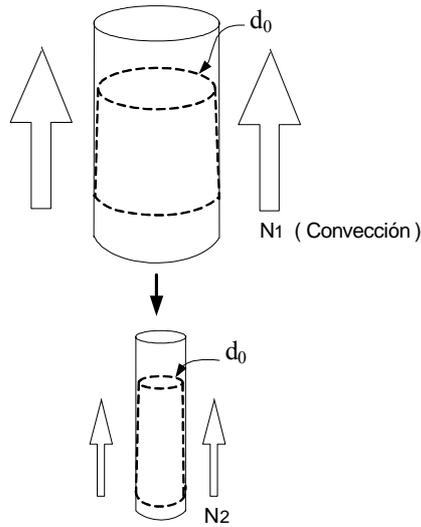


Figura 4.2 Columna de arco eléctrico de acuerdo a Cassie.

$$Q = Q_0 A \quad (4.4)$$

$$P_{out} = P_0 A \quad (4.5)$$

donde G , Q_0 y P_0 son conductancia, energía y potencia disipada, por unidad de volumen.

Se tiene también:

$$P_0 = G_0 V_0^2 \quad (4.6)$$

$$P_{in} = G V^2 \quad (4.7)$$

siendo V_0 el voltaje inicial del arco en estado estable. De (4.3) y (4.4) se tiene que

$$G = G_0 \frac{Q}{Q_0} \quad (4.8)$$

Derivando a (4.8) con respecto a Q , se tiene:

$$\frac{dG}{dQ} = \frac{G_0}{Q_0} \quad (4.9)$$

De (4.4) y (4.5)

$$P_{out} = P_0 \frac{Q}{Q_0} \quad (4.10)$$

Sustituyendo (4.9) y (4.10) en (4.2)

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G_0}{Q_0} \left(P_{in} - P_o \frac{Q}{Q_0} \right) \quad (4.11)$$

Ahora, sustituyendo (4.6) y (4.7) en (4.11)

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G_0}{Q_0} \left(GV^2 - G_0 V_0^2 \frac{Q}{Q_0} \right) \quad (4.12)$$

Sustituyendo (4.8) y (4.6) en (4.12)

$$\frac{dG}{dt} = \frac{P_0}{V_0^2 Q_0} (GV^2 - G_0 V_0^2) \quad (4.13)$$

Finalmente, se tiene:

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{V^2}{V_0^2} - 1 \right) \quad (4.14)$$

La ecuación (4.14) es la ecuación de Cassie, donde: $\lambda = \frac{Q_0}{P_0}$ se conoce como la constante de tiempo. La variable λ tiene unidades de tiempo e indica cuanto tarda la sección transversal del arco en adaptarse ante una variación en el voltaje del arco. Si se asume en la ecuación (4.14) que el voltaje del arco es cero, la ecuación se reduce a:

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = -\frac{1}{\lambda} \quad (4.15)$$

Una solución a (4.15) sería:

$$G = G_0 e^{-\frac{t}{\lambda}} \quad (4.16)$$

Se observa entonces que sin un voltaje de arco, la conductancia decae exponencialmente de su valor inicial G_0 con una constante de tiempo λ .

El modelo de Cassie es aplicable a la simulación del comportamiento del arco a corrientes relativamente altas (del orden de 100 A-100 KA) para las cuales la temperatura del plasma de arco es muy alta (en el orden de 8000° K o más). La ecuación de Cassie (4.14) puede escribirse en función de la corriente de arco que se obtiene despejando a i de la ecuación (4.1) y sustituyendo en (4.14):

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{i^2}{G^2 V_0^2} - 1 \right) \quad (4.17)$$

4.4.1 Modelo de Cassie implementado en TACS

El modelo de Cassie se implementa en el programa ATP/EMTP usando su interfaz gráfica ATPDraw por medio de bloques de control conocidos como TACS (Transient Analysis Control Systems). Para ello, se parte de la ecuación (4.17), la cual se transforma al dominio de Laplace y se resuelve para la conductancia, obteniéndose lo siguiente:

$$G^2 = \frac{I^2}{V_0^2} \left(\frac{1}{1 + \lambda s} \right) \quad (4.18)$$

La resistencia de arco, de acuerdo con (4.18), puede representarse mediante el diagrama de bloques mostrado en la figura 4.3. A partir de este diagrama se obtiene la implementación en TACS, como se observa en la figura 4.4.

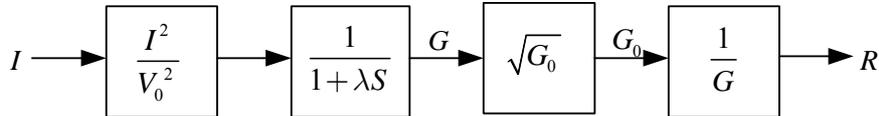


Figura 4.3 Diagrama de bloques del modelo de Cassie.

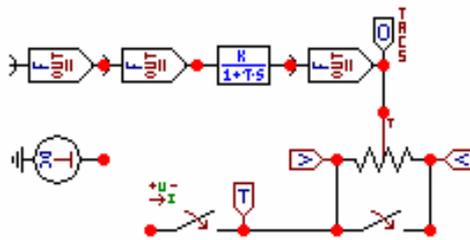
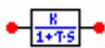


Figura 4.4 Modelo de Cassie implementado en TACS.

Durante la implementación se emplean los siguientes dispositivos:



Fortran Statement: Mediante estos dispositivos se ingresan de forma algebraica las operaciones a realizar.



Filtro pasa bajos: Se emplea para resolver la función de transferencia $1/(1 + \lambda s)$.



Fuente de CD de TACS: Se utiliza para ingresar el valor de voltaje inicial de arco.



Acoplador de Circuito: Se emplea para asignar variables de circuito como variables de TACS.



Lector de TACS: Se emplea para asignar variables de salida de TACS al graficador.



Lector de Voltaje: Se emplea para asignar una salida de voltaje al graficador.



Resistencia controlada por TACS: Mediante este dispositivo se integra al circuito la resistencia obtenida del modelo. Se conecta en paralelo a un interruptor ideal mediante el cual se inicia el proceso de apertura.

Como parte de la implementación, se creó un icono para identificar al interruptor con modelo de arco y una ventana de datos, en la cual se introducen las diferentes variables que se emplean en la simulación como se observa en la figura 4.5



Icono del interruptor con modelo de arco de Cassie

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
T-cl	1	From	1	
T-op	0	SWT	1	
I-mar	99999			
tau-CS	3E-6			
E0	300			

Figura 4.5 Icono y ventana de ajuste de parámetros del interruptor de potencia implementado en el ATP/EMTP (Cassie).

En la figura 4.5 se tiene:

- T-cl: Tiempo de cierre del interruptor
- T-op: Tiempo de apertura del interruptor
- Imar: Margen de corriente
- Tau-CS: Constante de tiempo de arco de Cassie
- E₀: Constante de pérdida de Voltaje del arco Cassie

4.5 Modelo de Mayr

El modelo de O. Mayr describe el comportamiento del arco eléctrico cercano al cruce por cero, donde la temperatura del arco es menor. Por este motivo su aplicación se limita a pequeñas corrientes de pre-arco de hasta 100 A. Al igual que Cassie, Mayr asumió que el canal del arco tiene una forma cilíndrica, pero en este caso el diámetro del cilindro es constante y la temperatura es variable (figura 4.6). Para el rango bajo en el que Mayr consideró la variación de temperatura, la conductividad del canal del arco puede asumirse con una variación aproximadamente exponencial con la temperatura (relación de Saha para ionización térmica) [25]:

$$G = K \exp\left(\frac{Q}{Q_0}\right) \quad (4.19)$$

Asumiendo también que la potencia disipada por el canal del arco es constante.

$$P_{out} = P_0 \quad (4.20)$$

y definiendo la potencia de entrada como

$$P_{in} = vi \quad (4.21)$$

se obtiene de (4.2) la ecuación de Mayr:

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{vi}{P_0} - 1 \right) \quad (4.22)$$

donde, al igual que en el modelo de Cassie, la constante de tiempo está dada por $\lambda = \frac{Q_0}{P_0}$.

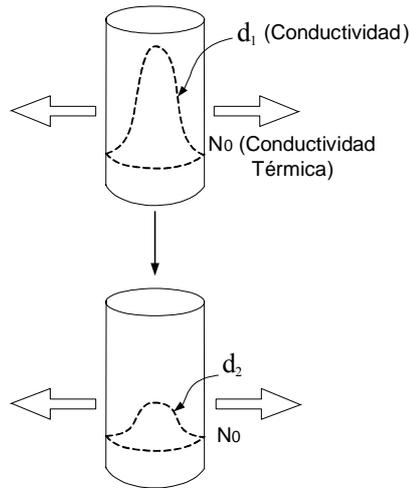


Figura 4.6 Columna de arco de acuerdo a Mayr [32].

Si la potencia de entrada es cero, $P_{in} = v_i = 0$, la ecuación (4.6) se reduce a

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = -\frac{1}{\lambda} \quad (4.23)$$

Es decir, el comportamiento del arco en este caso es similar al del modelo de Cassie, teniendo la misma solución:

$$G = G_0 e^{-\frac{t}{\lambda}} \quad (4.24)$$

Se observa que sin potencia de entrada, la conductancia del arco decae en forma exponencial de su valor G_0 con una constante de tiempo λ .

4.5.1 Modelo matemático de Mayr implementado en TACS

Partiendo de la ecuación (4.22) y reescribiendo en función de la corriente del arco eléctrico de acuerdo con (4.1) se tiene:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{i^2}{P_0} - G \right) \quad (4.25)$$

Transformando la ecuación (4.10) al dominio de Laplace:

$$G = \frac{I^2}{P_0} \left(\frac{1}{1 + \lambda S} \right) \quad (4.26)$$

A partir de (4.26), puede representarse la resistencia del arco mediante el diagrama de bloques mostrado en la figura 4.7. La implementación del modelo en TACS de ATP (figura 4.8) se realiza siguiendo una lógica similar y empleando los mismos dispositivos que en el modelo de Cassie [21].

De igual forma que en modelo anterior, se desarrolló un ícono y una ventana de datos para ajustar los parámetros del interruptor empleados en la simulación, como se muestra en la figura 4.9, en la cual:

- T-cl: Tiempo de cierre del interruptor
- T-op: Tiempo de apertura del interruptor
- Imar: Margen de corriente
- C-MY: Constante de tiempo de arco de Mayr
- N_0 : Constante de pérdida de potencia de Mayr

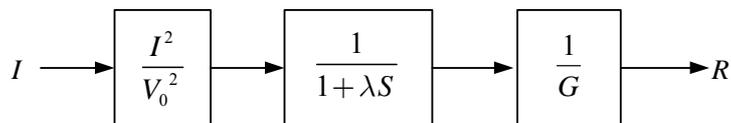


Figura 4.7 Diagrama de bloques de la ecuación de Mayr.

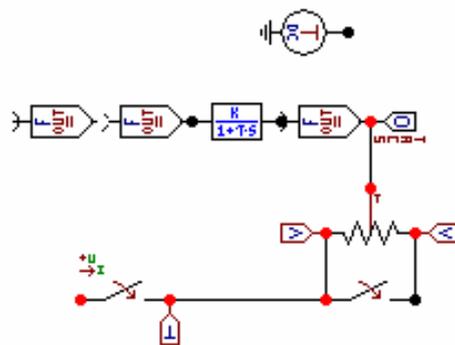


Figura 4.8 Modelo de Mayr implementado en TACS.



Icono del interruptor con modelo de arco de Mayr

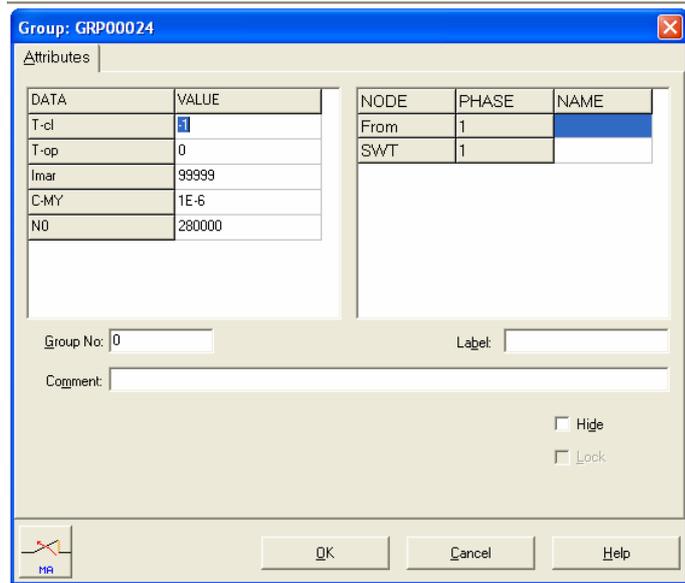


Figura 4.9 Icono y ventana de ajuste de parámetros del interruptor de potencia implementado en el ATP/EMTP (Mayr).

4.6 Modelo Combinado de Cassie-Mayr

Con el objetivo de representar una región más amplia de corriente, pueden emplearse de manera combinada los modelos de Cassie y Mayr conectando en serie las resistencias dadas por ambos modelos, como se ilustra en la figura 4.10. Se tiene:

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_C} + \frac{1}{G_M} \quad (4.27)$$

donde G_C representa la conductancia de arco dada por el modelo de Cassie y G_M el valor respectivo dado por el modelo de Mayr. En corrientes altas, el voltaje de arco lo proporciona fundamentalmente la ecuación de Cassie. Pero justo antes del cruce por cero, la contribución de la ecuación de Mayr se incrementa mientras que la parte de Cassie tiende a cero [34].

Para la implementación del modelo combinado mediante TACS simplemente se adicionan las salidas de las lógicas de los 2 modelos mediante un sumador, como se muestra en la figura 4.11.

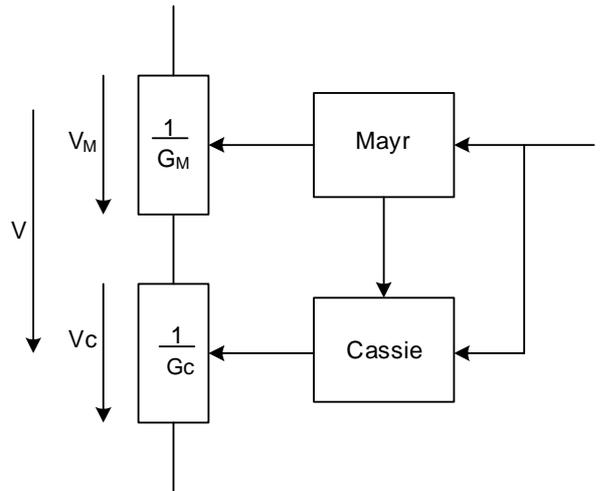


Figura 4.10 Diagrama de bloques del modelo combinado de Mayr - Cassie.

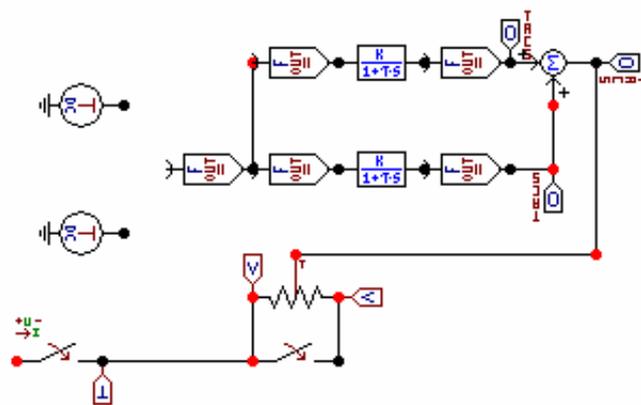
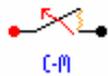


Figura 4.11 Modelo combinado de Mayr y Cassie implementado en TACS.

De igual forma que en los modelos de Mayr y Cassie, para el modelo combinado se realizó un icono y una ventana respectivamente para identificar y modificar los parámetros del interruptor, como se muestra en la figura 4.12, en la cual se tiene:

- T-cl: Tiempo de cierre del interruptor
- T-op: Tiempo de apertura del interruptor
- Imar: Margen de corriente
- tau-MY: Constante de tiempo de arco para Mayr
- tau-CS: Constante de tiempo de arco para Cassie
- P-MY: Constante de pérdida de potencia para Mayr
- E-CS: Constante de pérdida de voltaje para Cassie



Icono del interruptor con el modelo de arco de Cassie-Mayr implementado en el ATP/EMTP

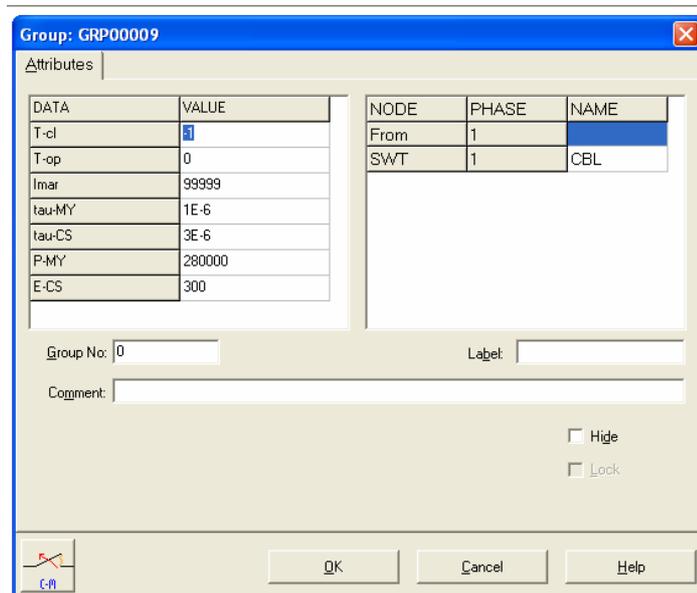


Figura 4.12 Icono y ventana de ajuste de parámetros del interruptor de potencia implementado en el ATP/EMTP (Mayr-Cassie).

4.7 Otros Modelos

Existen algunas variaciones de modelos de arco las cuales incluyen combinaciones de las relaciones encontradas por Cassie y Mayr. En general estos modelos se desarrollan para propósitos particulares, por ejemplo, fallas en generadores o interruptores de un medio de extinción específico. Algunos ejemplos son los de Mason y otro similar pero más complejo es el de Urbanek [21], el cual incluye régimen de ruptura dieléctrica. Otros modelos han sido basados más cercanamente a la física del arco en soplo de aire pero requieren el uso extensivo de computadoras modernas de gran capacidad. Estos modelos son todavía necesariamente aproximados y más difíciles para aplicaciones de ingeniería.

4.7.1 Modelo de Hochrainer

Una aproximación algo diferente y puramente empírica fue desarrollada por A. Hochrainer. A partir de la ecuación generalizada:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G^* - G}{\theta} \quad (4.28)$$

donde G^* es un valor en estado estable de conductancia de arco igual a i/v para la misma corriente en una característica estática supuesta de volt-amperes del arco. Esta ecuación deriva en la ecuación de Mayr si θ y las pérdidas de potencia N en el arco son constantes (lo cual sin embargo está lejos de ser cierto) y con otras suposiciones deriva en la ecuación de Cassie. Sin embargo en el uso de esta aproximación ha sido una práctica usual el emplear la ecuación de Mayr o alguna modificación de ésta para el período completo del arco, pero tomando a N y θ no como constantes si no como funciones empíricas del tiempo o la conductancia instantánea de arco G .

4.7.2 Modelo de Kopplin

Esta ecuación es una variante de la ecuación de Mayr en donde la constante de tiempo depende de la variable $\tau(G)$ y de una constante de pérdida de potencia $P(G)$, esto es:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G}{\tau(G)} \left(\frac{W}{P(G)} - 1 \right) \quad (4.29)$$

donde:

$\tau(G) = k_t (G + 0.0005)^{0.25}$ es una constante de tiempo

$P(G) = k_p (G + 0.0005)^{0.6}$ es una constante de pérdida de energía

mientras que k_p y k_t son parámetros del modelo. El modelo de Kopplin puede ser empleado con pasos de integración largos, al igual que algunos modelos similares como los desarrollados por Urbanek o Avdonin [6].

4.7.3 Modelo de KEMA

En los modelos de arco desarrollados por la empresa holandesa de pruebas eléctricas KEMA, la conductividad del arco es calculada del balance de energía con la ecuación modificada de Mayr, con tres parámetros solamente antes del cruce por cero. En los

regímenes térmicos y dieléctricos después del cruce por cero la conductividad se calcula de la concentración de partículas cargadas y de su variación de velocidad como función del tiempo después del destello. Cuando se presenta el voltaje transitorio de recuperación se acumulan en los contactos del interruptor fluctuaciones de electrones e iones que conducen a una corriente térmica post-arco o a un rompimiento dieléctrico. En ambos casos resulta en una falla de interruptor para liberar la corriente [33].

4.8 Modelo General de Arco Eléctrico

Los modelos anteriores se aplican generalmente para el análisis del comportamiento del interruptor entre el periodo pre-cero y el cruce por cero de la corriente. En realidad, la resistencia no lineal ($1/G$) debida al fenómeno del arco eléctrico aparece en una etapa transitoria en la cual se establece un preencendido, encendido y finalmente la extinción de arco eléctrico. Por ello, se implementó un modelo más general [24] mediante el cual la ecuación diferencial que define la característica del arco (Mayr, Cassie, Mayr/Cassie o algún otro modelo de propósito específico) es evaluada en dos periodos:

- En el primer periodo (pre-cero) el voltaje de arco es cero, ya que el interruptor no ha abierto, por lo tanto se utiliza la corriente como entrada y se calcula la conductancia definida por la ecuación respectiva, como se muestra en la figura 4.13(a).
- En el segundo periodo (post-cero) se evalúa la ecuación diferencial en función del voltaje y se calcula la resistencia respectiva, como se muestra en la Figura 4.13(b). En esta etapa el voltaje tiene un valor diferente de cero y la corriente tiende rápidamente a cero si se logra la extinción del arco, el interruptor abre exitosamente tomando un valor infinito de resistencia.

Para efectos de simulación el valor de resistencia final (apertura) es aproximadamente de 1×10^6 a $1 \times 10^{10} \Omega$ [4, 6, 18].

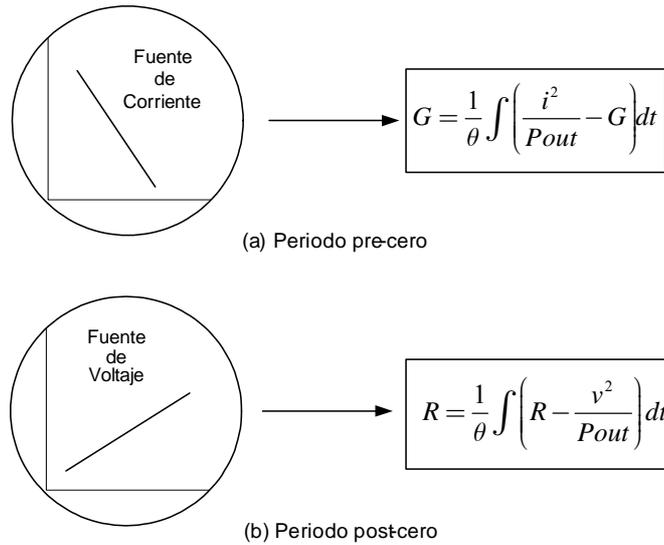


Figura 4.13 Evaluación de periodos en el modelo general para el caso de la ecuación de Mayr.

4.8.1 Modelo General Implementado en TACS del ATP/EMTP

Basándose en la Fig. 4.14, la secuencia a seguir para la implementación en TACS del modelo general, mostrada en la Fig. 4.15, es la siguiente:

1. Generar dos señales de control CTRA y CTRV con la ayuda de bloques lógicos de FORTRAN.
2. La señal de control CTRA es activada cuando la corriente se encuentra en un periodo anterior al cruce por cero de la corriente (pre-cero), mientras que la señal de control CTRV toma un valor igual a cero, es decir, se encuentra desactivada. De esta manera se calcula la conductancia de pre-cero.
3. En el instante en que la corriente cruza por cero la parte de control CTRA cambia de estado (se desactiva) e inmediatamente la parte de control CTRV se activa y la resistencia de post-cero es calculada, empleando el último valor de la etapa anterior como condición inicial.

En la figura 4.16 se observa la resistencia transitoria no lineal del modelo general del arco eléctrico. Se ha demostrado en publicaciones anteriores que este tipo de metodología de análisis es más efectiva que la aplicación de modelos simples [16]. Además, la implementación de otros modelos diferentes a los descritos puede realizarse directamente,

cambiando las ecuaciones de Mayr de la figura 4.14 por las ecuaciones que definan a algún otro modelo. Incluso puede resolverse con modelos distintos en los periodos de pre-cero y post-cero si se requiere.

En la figura 4.15 se muestra la implementación en TACS del modelo general de arco eléctrico. Al igual que en los modelos anteriores, se emplean herramientas existentes en el simulador.

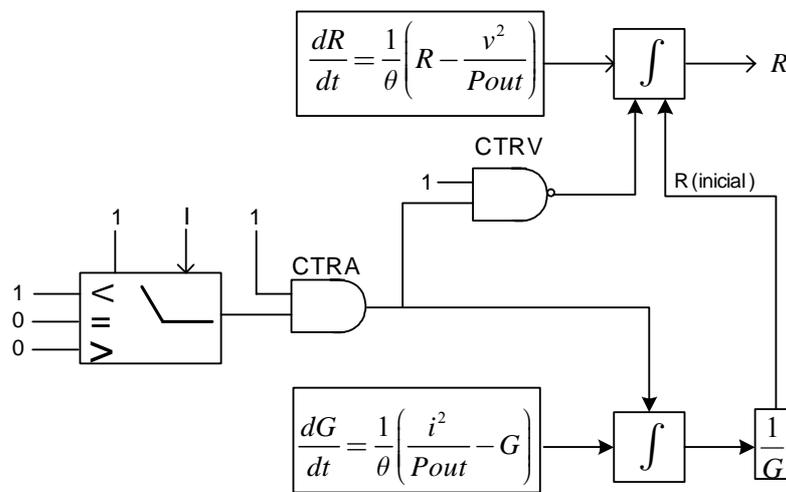


Figura 4.14 Bloques de lógica de control del modelo general.

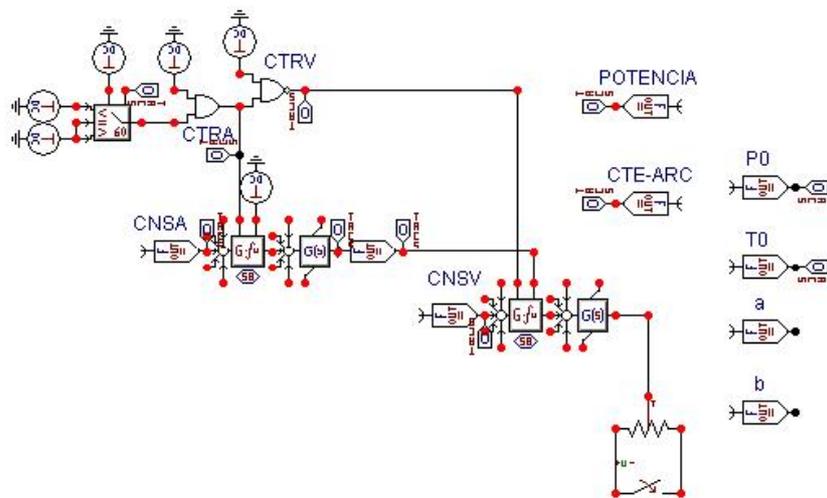


Figura 4.15 Modelo general implementado en TACS.

Se implementó un ícono del modelo general con una ventana de datos para ajustar los parámetros del interruptor empleados en la simulación, como se muestra en la figura 4.17, en la cual:

- T-cl: Tiempo de cierre del interruptor
- T-op: Tiempo de apertura del interruptor
- Imar: Margen de corriente del interruptor

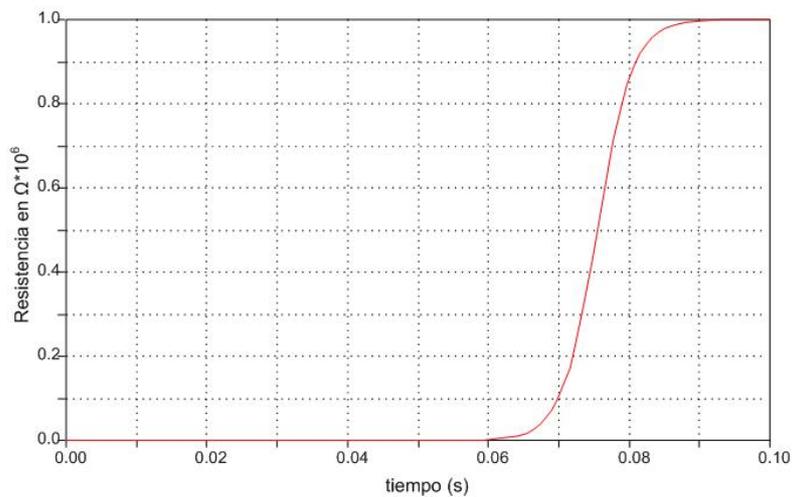


Figura 4.16 Resistencia no lineal de arco obtenida con el modelo general de arco eléctrico.



Icono del interruptor con el modelo general de arco

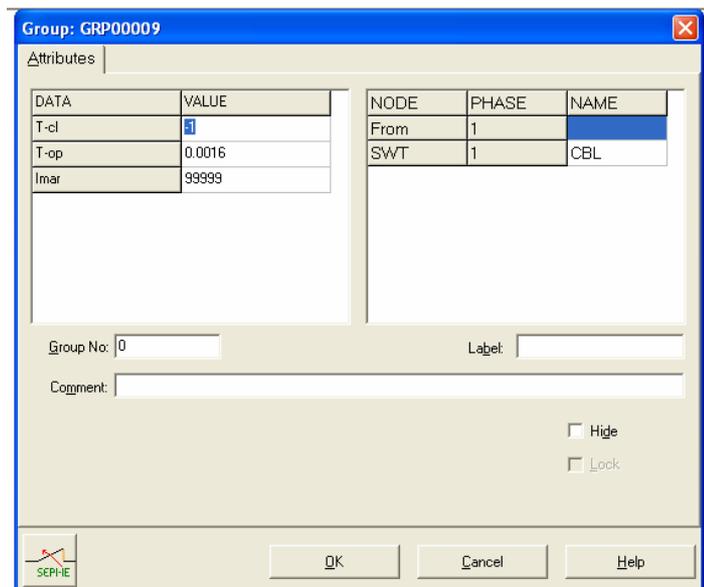


Figura 4.17 Icono y ventana de ajuste de parámetros del interruptor de potencia implementado en el ATP/EMTP (modelo general).

En la tabla 4.1 se muestra una tabla con las diferentes aplicaciones de los modelos de Mayr, Cassie y combinado de arco de acuerdo a los tipos de fallas más comunes.

Modelo de Arco	Tipo de Falla
Mayr	Desconexión de Transformadores en Vacío, Líneas en Vacío, en general fallas donde se tenga un baja magnitud de corriente < 100 A
Cassie	Desconexión de fallas monofásica, trifásicas, fallas donde se tenga una magnitud de corriente > 100 kA
Modelo Combinado	Fallas de baja y alta magnitud de corriente como las descritas anteriormente

Tabla 4.1 Tabla de aplicaciones de los modelos de arco eléctrico.

CAPÍTULO 5

APLICACIONES Y CASOS DE PRUEBA

5.1 Introducción

En general el análisis transitorio relacionado con la apertura de interruptores de potencia se realiza en los diferentes programas de simulación sin considerar el efecto del arco eléctrico, el cual se genera en el momento de la separación de los contactos del interruptor. Esto se debe a que dichos programas no cuentan en forma directa con interruptores que incluyan dicho efecto. Sin embargo, como se describió en el capítulo 4, la solución de las ecuaciones básicas que definen el arco eléctrico (Mayr y Cassie) es posible en el ATP/EMTP empleando bloques de control llamados TACS.

En este capítulo se evalúa la operación de interruptores de potencia incluyendo el efecto del arco eléctrico en la desconexión de una falla trifásica en el conjunto línea-generador y en dos casos de falla en línea kilométrica. Se realizan en primera instancia las simulaciones considerando interruptores ideales (sin efecto de arco eléctrico). Después se evalúan nuevamente los sistemas incluyendo el efecto del arco eléctrico en la operación de los interruptores.

Los parámetros que definen el tipo de medio de extinción son obtenidos de distintas referencias bibliográficas las cuales se basan en pruebas de laboratorio desarrolladas en su mayoría empleando circuitos de tipo sintético [11, 35, 36].

5.2 Desconexión de una Falla Trifásica en el Conjunto Línea-Generador

La interrupción de la corriente en un circuito de CA ocurre en el instante en que la corriente cruza por cero.

En un circuito que ha estado suministrando la corriente de carga (corriente nominal), las amplitudes de las componentes de *CD* de la componente de corto circuito pueden ser mas grandes que las componentes de *CA*. Esto se debe a que si un corto circuito se inicia en el tiempo del pico de la forma de onda de la corriente de carga, la forma de onda de la corriente de corto circuito inicia en la misma dirección del pico de la corriente de carga, como se observa en la figura 5.1. En el caso de que la corriente de carga sea más grande, la corriente del circuito será relativamente menor y el decremento de la componente de *CD* será más lento de manera que el primer cruce por cero de la corriente se retardará mucho más tiempo.

Es bien sabido que la impedancia de cortocircuito de los generadores síncronos varía en el tiempo. Si una cierta impedancia de generador es predominante en un circuito, el decremento de la componente de *CA* de la corriente de corto circuito es significativo. Por lo tanto, se introduce un retardo en el primer cruce por cero mucho mayor al esperado [34].

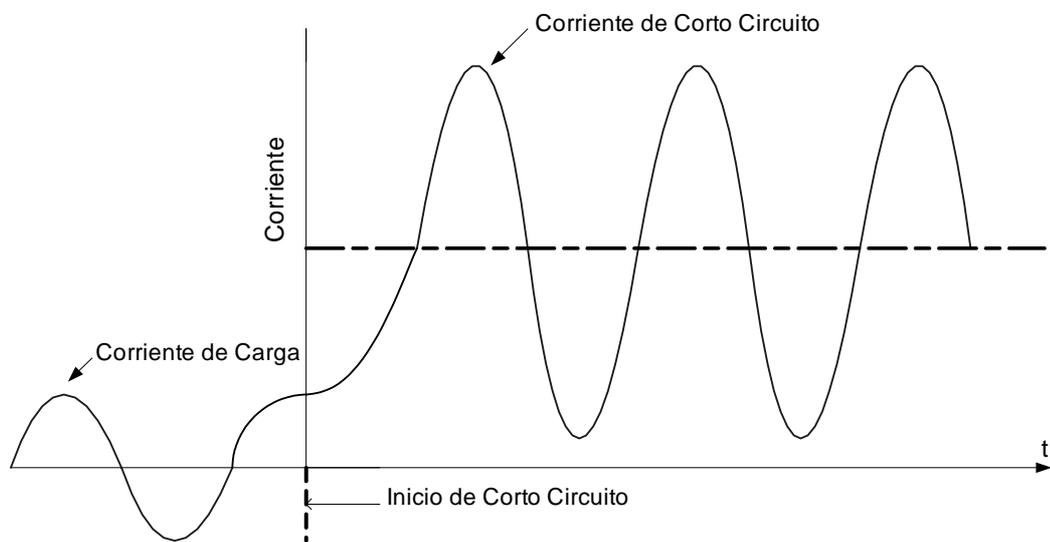


Figura 5.1 Corriente de corto circuito en el momento de la falla.

En el siguiente ejemplo se simula una falla trifásica en un sistema compuesto por un generador síncrono de 500 MVA, 12 kV, 3 Fases, 50 Hz y un transformador trifásico de 12 kV: 316 kV, conexión delta-estrella aterrizada conectado a dos líneas aéreas transpuestas de

1.5 km de longitud. El conjunto conecta por medio de interruptores de SF₆ una carga puramente resistiva, como se muestra en la figura 5.2. En la simulación se realizan pruebas con diferentes tiempos de inicio de la falla trifásica a tierra (sostenida), con la finalidad observar el comportamiento de las corrientes en el momento en que se presenta la falla.

Para poder simular el ejemplo en el ATP/EMTP (a través de su interfaz gráfica ATPDraw), se realizaron algunas adecuaciones tales como: emplear interruptores monofásicos para poder integrar el modelo de arco eléctrico en el momento de la apertura trifásica; los tiempos de apertura de cada interruptor monofásico se sincronizaron de tal manera que operan como un interruptor trifásico; se consideraron datos de simulación adecuados para poder considerar la *constante de tiempo del arco eléctrico* en la simulación, la cual es de apenas unos cuantos microsegundos.

Con los datos y parámetros de simulación se lleva a cabo la implementación en el ATPDraw, como se observa en la figura 5.3.

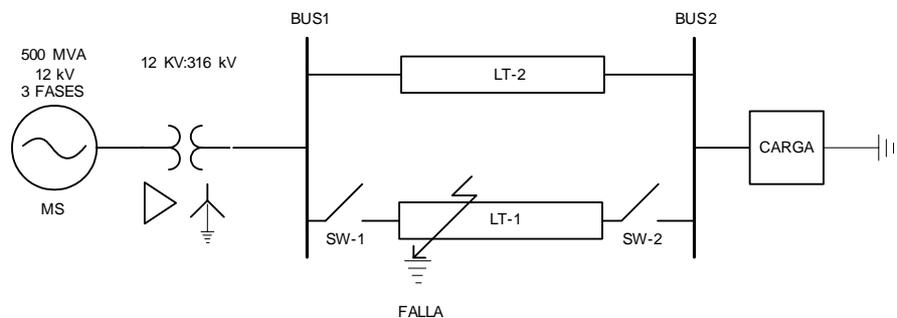


Figura 5.2 Sistema de prueba máquina línea.

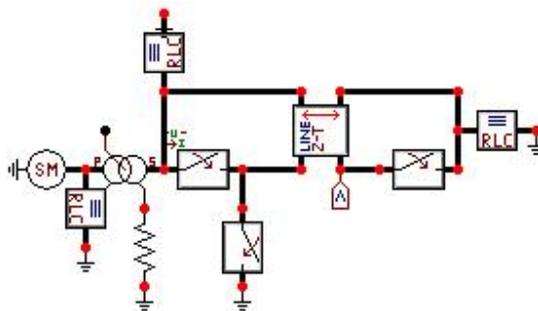


Figura 5.3 Implementación del conjunto línea-generador en el ATP/EMTP (sin modelo de Arco).

La incorporación del modelo de arco eléctrico en cada una de las fases del sistema se muestra en la figura 5.4. Para cada interruptor (F-A, F-B, F-C) se sigue la misma lógica de TACS; a cada uno se le pueden modificar los parámetros del medio de extinción y los tiempos de apertura si se requiere.

En la figura 5.5 se muestran las corrientes resultantes de la simulación de una falla trifásica sostenida a tierra. Se aprecia en las fases A y C un retardo de tiempo en el cruce por cero de varios ciclos (decaen suavemente). Como se explicó anteriormente, esto se debe a que se sobrepone la corriente de falla a la corriente de carga en un instante de tiempo en el cual la corriente de carga esta alcanzando el punto máximo de cresta. Los tiempos en los cuales se introduce la falla son de **0.015**, **0.008** y **0.008** segundos para las fases **A**, **B** y **C** respectivamente.

En la figura 5.6 se muestra la liberación de las corrientes de falla con interruptor ideal. Los tiempos en los que se le indica al interruptor que opere son: para la fase **A** y la fase **B** **0.035** s., para la fase **C** **0.03** s. El interruptor opera abriendo en los cruces por cero de las corrientes de falla. La fase **A** abre en un tiempo **0.1106** s. (5 ciclos aproximadamente), la Fase **B** **0.0369** s. (2 ciclos y medio aproximadamente) y finalmente la fase **C** abre en un tiempo **0.1253** s. (6 ciclos y medio aproximadamente).

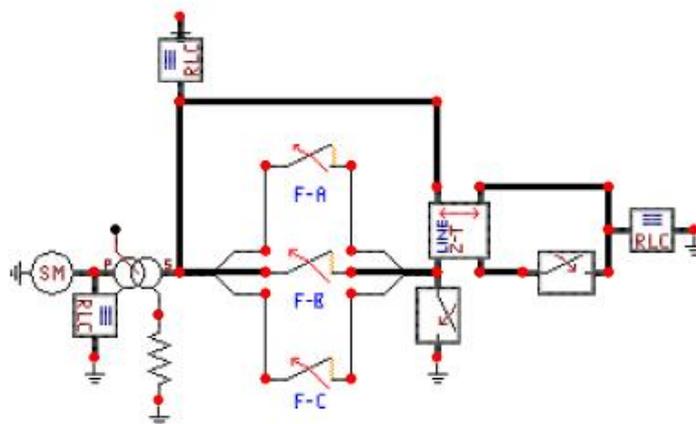


Figura 5.4 Implementación del conjunto línea-generador en el ATPDraw incluyendo modelo de arco eléctrico (Cassie).

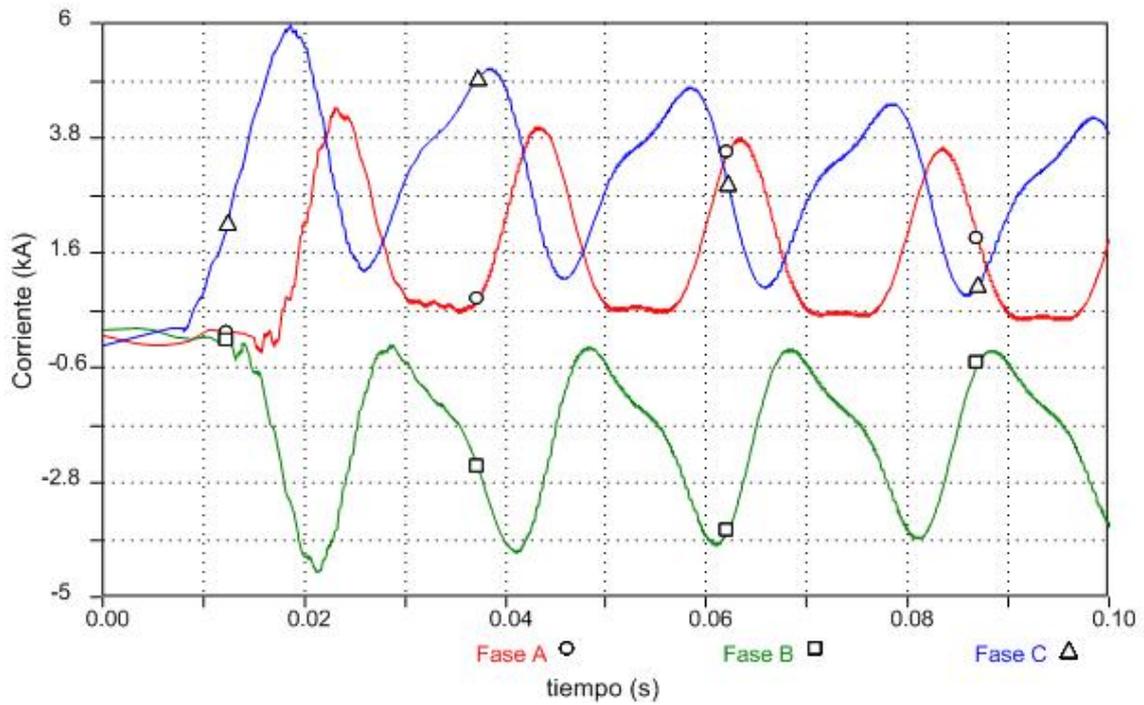


Figura 5.5 Corrientes de falla sostenida.

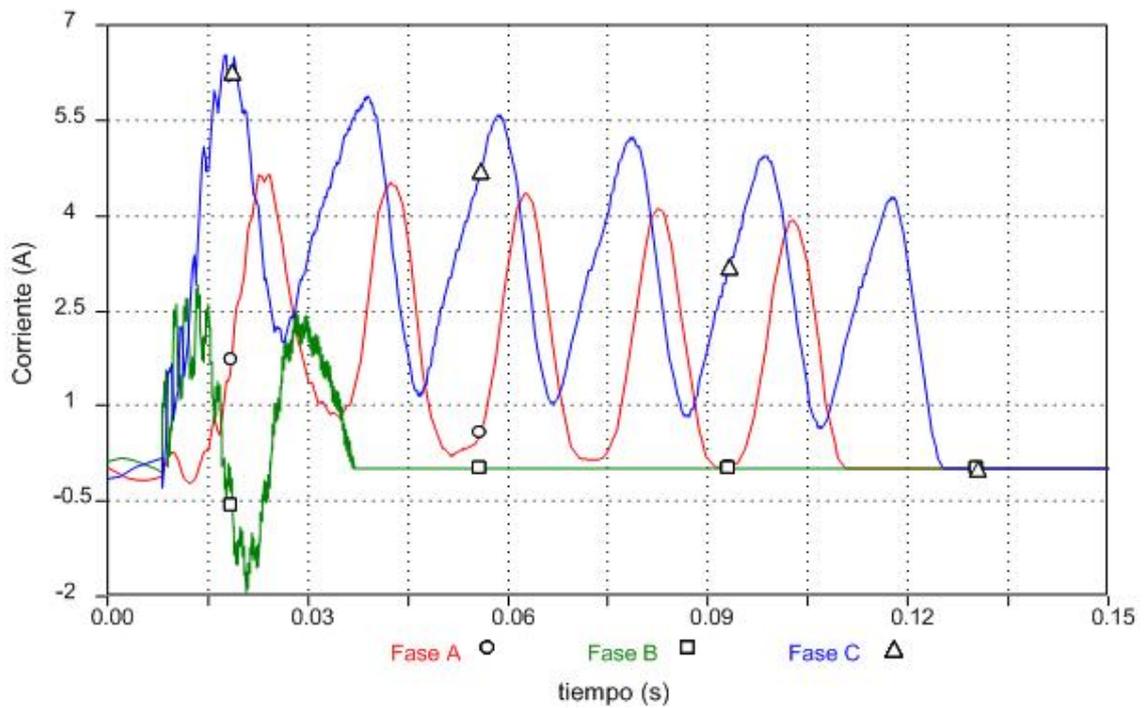


Figura 5.6 Liberación de la corriente de falla sin modelo de arco eléctrico.

El interruptor ideal predice tiempos de interrupción de la falla demasiado largos, pudiéndose concluir la posibilidad de problemas de estabilidad, fallas en aislamientos o hasta la destrucción misma de los interruptores y equipos auxiliares.

En la figura 5.7 se muestra el efecto de considerar el arco eléctrico, teniéndose los siguientes tiempos de apertura: la fase **A 0.0502 s.** (2 ciclos y medio aproximadamente), la Fase **B 0.0366 s.** (menos de 2 ciclos aproximadamente), y finalmente la fase **C 0.0581 s.** (3 ciclos). Estos tiempos son más aproximados a los tiempos reales de operación de un interruptor. El modelo de arco eléctrico de Cassie calcula un valor de resistencia no lineal a partir del voltaje y la corriente de arco en el momento de separación del contacto móvil del fijo. En realidad lo que se tiene es una corriente lo suficientemente pequeña como para ser extinta en el cruce por cero más próximo, como se muestra en la figura 5.7.

Al integrar el modelo de arco a este ejemplo se redujo el tiempo máximo de apertura de falla en las tres fases. Para el caso de la fase C (que fue el tiempo más largo) se redujo de **0.1253 s.** (6 ciclos y medio) a **0.0581 s.** (aproximadamente 3 ciclos).

En la figura 5.8 se muestra el caso más crítico. La falla se introduce en los puntos máximos de cresta de onda en las tres fases, correspondientes a **0.015 s.**, **0.0121 s.**, y **0.008s.** para las fases **A, B y C** respectivamente. En este caso en especial, ninguna de las tres fases cruza por cero, por lo menos en los 5 primeros ciclos, generando con ello que el interruptor ideal espere un tiempo demasiado largo para operar, cuando en realidad la corriente puede ser interrumpida ciclos antes al incluir el modelo de Cassie.

La finalidad de introducir las fallas en esos tiempos, es demostrar la importancia que tiene el incluir el efecto del arco eléctrico en las simulaciones de operación de interruptores y que tan erróneos pueden ser los resultados en las simulaciones cuando no es considerado dicho efecto.

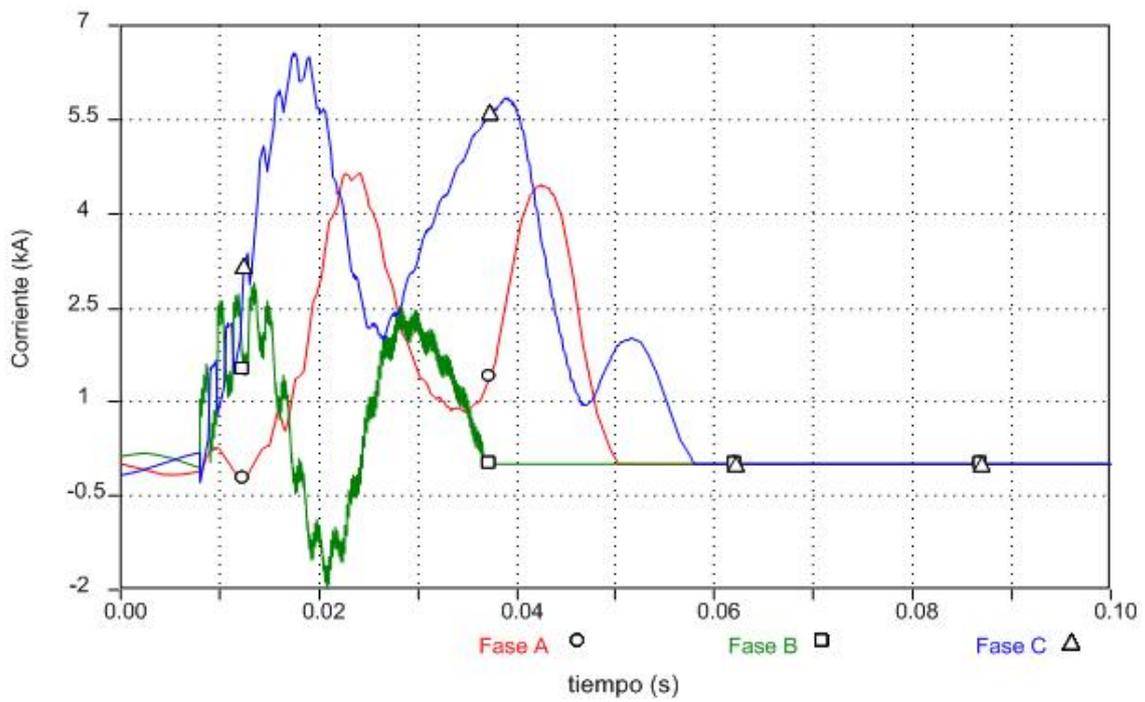


Figura 5.7 Interrupción de la corriente de falla incluyendo el modelo de arco eléctrico en el interruptor de potencia (Cassie).

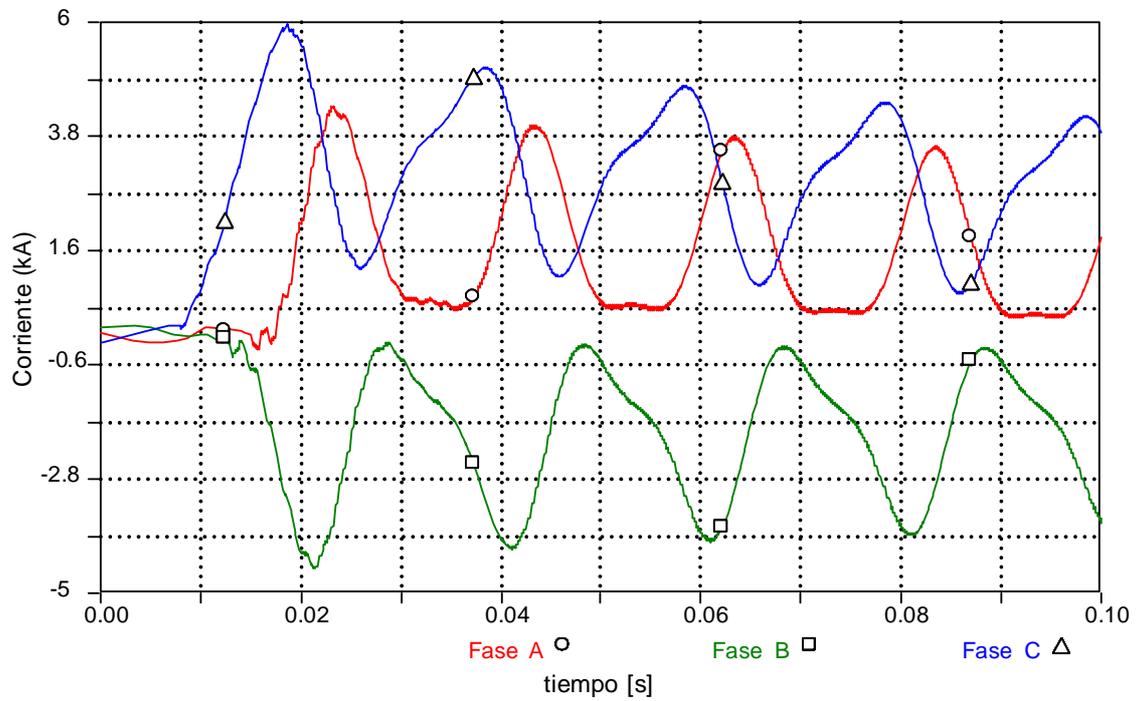


Figura 5.8 Corriente de falla sostenida caso crítico.

En la figura 5.9 se muestra la apertura de la falla empleando un interruptor ideal; se observa como las corrientes de falla van decayendo lentamente, hasta llegar al cruce por cero. El tiempo de apertura en la fase **A** es de **0.1912 s.** (9 ciclos y medio aproximadamente), en la fase **B** en un tiempo de **0.2891 s.** (14 ciclos), y en la fase **C** **0.2031 s.** (10 ciclos). De ser éste un estudio de coordinación de aislamiento, coordinación de protecciones o estabilidad se tendrían resultados poco confiables, pudiéndose llegar a ajustes incorrectos de protecciones y problemas de estabilidad.

Al ser considerado el efecto del arco eléctrico en las simulaciones, como se muestra en la figura 5.10, se tienen los siguientes tiempos de operación: la fase **A** **0.0502 s.**, la fase **B** en **0.0366 s.**, y la fase **C** en **0.0581 s.**

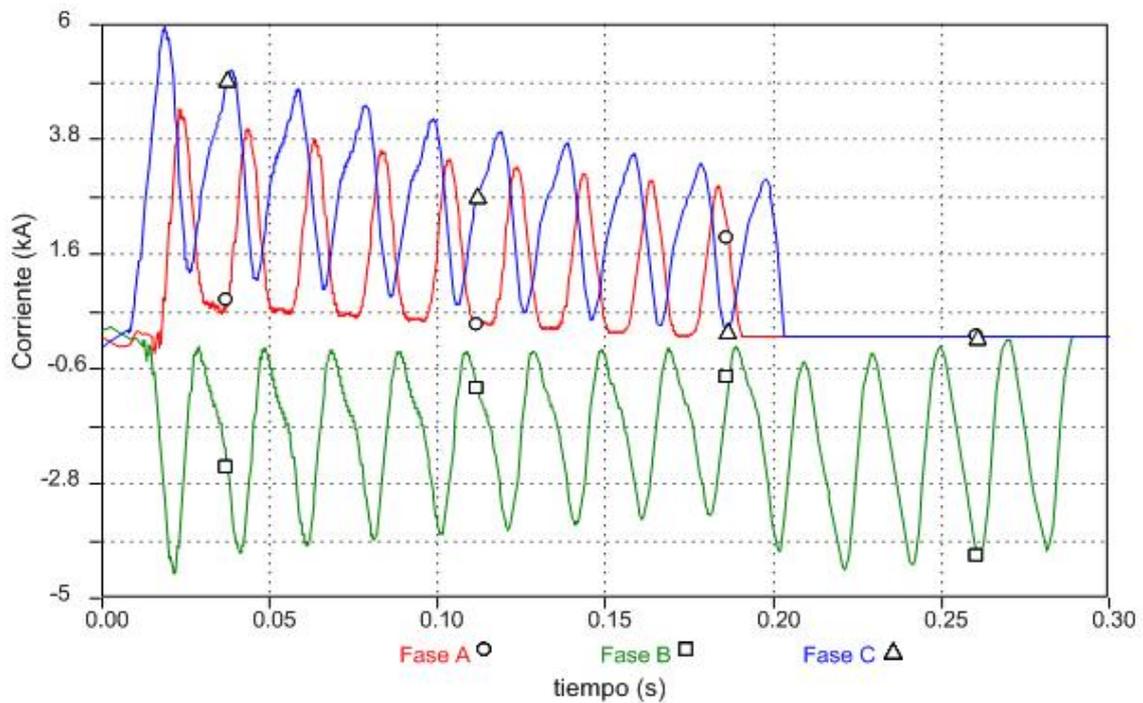


Figura 5.9 Liberación de la corriente de falla sin incluir modelo de arco eléctrico (caso crítico).

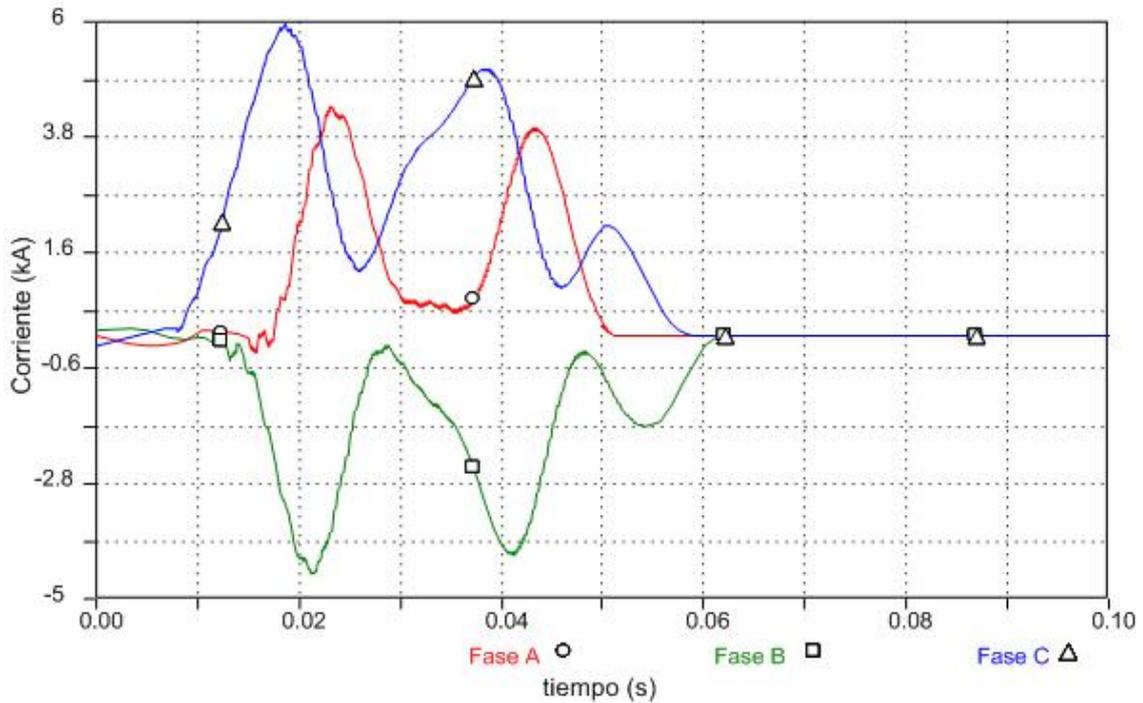


Figura 5.10 Liberación de la corriente de falla incluyendo modelo de arco eléctrico (caso crítico).

5.3 Falla kilométrica

Como una aplicación típica del modelo de arco de Mayr se presenta una falla en línea corta (FLC), también conocida como falla kilométrica. Para este caso, debido al alto rango de recuperación de voltaje transitorio (TRV por sus siglas en inglés), después de la interrupción de la corriente (corriente cero) existe una cierta conductividad entre los contactos del interruptor [34].

En la figura 5.11 se muestra el diagrama o circuito de prueba. Se considera una fuente simplificada, una línea con parámetros distribuidos con impedancia característica de $Z_L=460 \Omega$, velocidad de propagación de la onda de 290000 Km/s. y pérdidas en serie de 0.1 Ω /Km. Los parámetros eléctricos para los interruptores de SF₆ son los siguientes: constante de pérdida de potencia para el modelo de Mayr $N_0= 280 \text{ kW}$, constante de tiempo de arco para modelo de Mayr $\theta_M= 1 \mu\text{s}$.

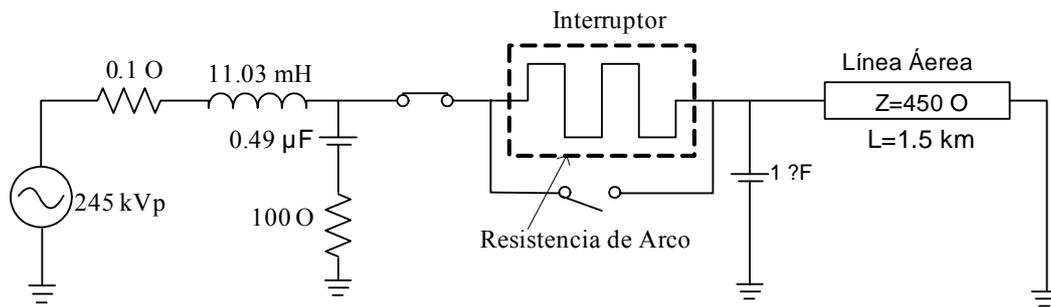


Figura 5.11 Sistema de prueba para análisis de falla kilométrica.

La simulación se lleva a cabo conectando solidamente a tierra el extremo receptor de la línea de transmisión a tierra, simulando que existe una falla a cierta longitud relacionada con la longitud dada a la línea. Con la finalidad de analizar una región más amplia de corriente en la falla en línea kilométrica y como una aplicación más general de los modelos de arco eléctrico se emplean adicionalmente los modelos de Mayr y Cassie en forma combinada, como se describe en el capítulo 4.

En la figura 5.13 se presenta la apertura de un interruptor ideal en el que aparece un voltaje transitorio de recuperación sin presentarse un voltaje de pre-arco. De acuerdo a la figura se tiene una operación exitosa del interruptor sin mayor problema.

Los modelos ideales de los simuladores no están diseñados para proporcionar datos del desempeño interno del interruptor o alguna otra información adicional.

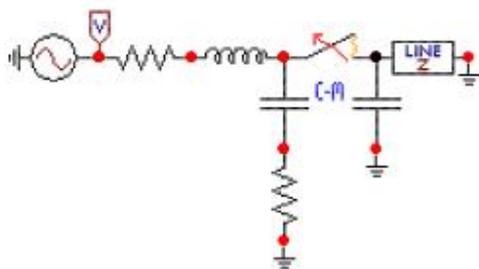


Figura 5.12 Sistema de Prueba para modelar una falla kilométrica implementado en ATP/EMTP.

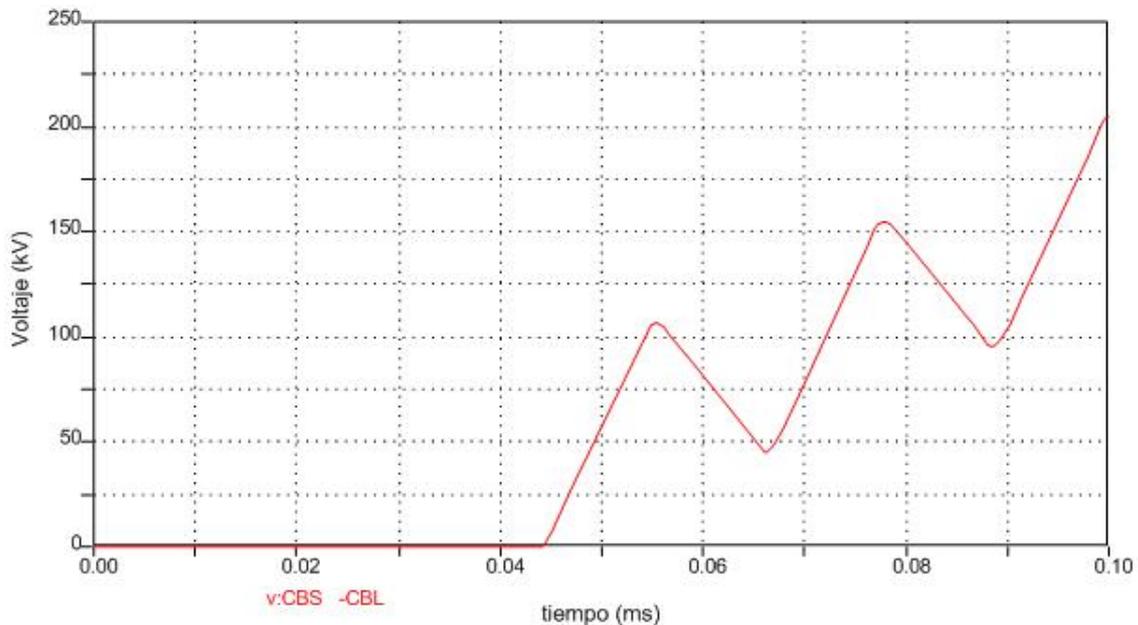


Figura 5.13 Voltaje transitorio de recuperación en los polos del interruptor (modelo ideal).

En la figura 5.14 se hace la comparación en el periodo de pre-arco entre el interruptor ideal y un interruptor que incluye el modelo de arco eléctrico de Mayr. Se puede observar que al incluir el modelo de arco aparece un pequeño voltaje justo antes de que los contactos se separen (se considera como la etapa de encendido del arco eléctrico en el momento del cruce por cero de la corriente antes de la apertura total de los contactos).

El voltaje de arco eléctrico depende de los parámetros de la red o sistema y del medio de extinción, que puede ser SF₆, aceite ó aire; para este caso en particular se emplearon parámetros de SF₆. El voltaje inicial de arco eléctrico es 300 V. El modelo de Mayr sólo describe el comportamiento interno del interruptor en el instante en que la corriente cruza por cero.

La magnitud y el tiempo de la corriente de post-arco es definida por los parámetros de la red y del medio de extinción (figura 5.15). El tiempo y magnitud de corriente es más corto cuando se emplean parámetros de arco para el SF₆.

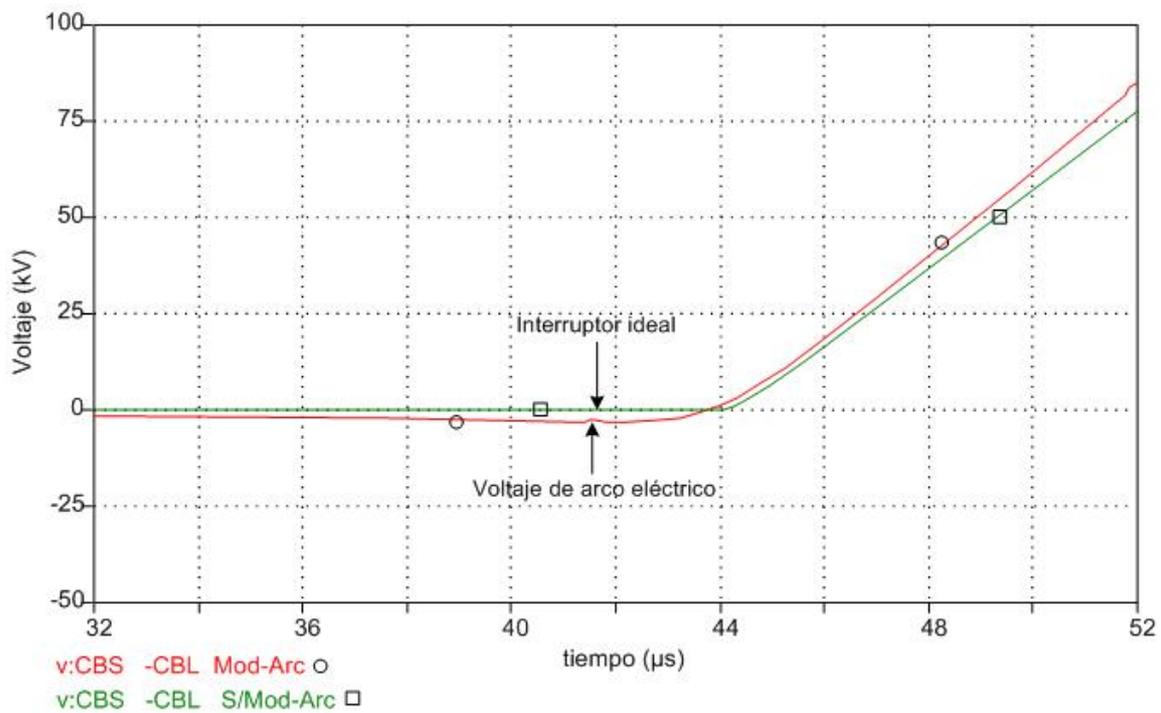


Figura 5.14 Simulación de falla en línea a 1.5 km de la fuente.

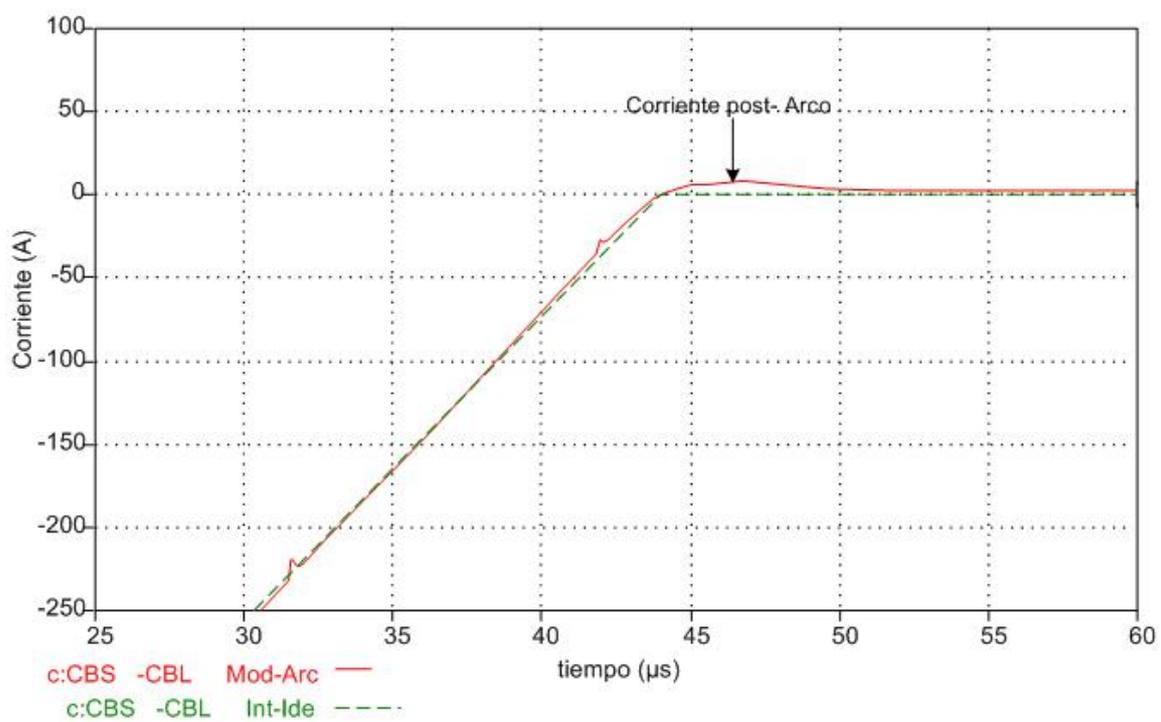


Figura 5.15 Corriente de arco eléctrico.

En la figura 5.16 se muestra el desempeño interno del interruptor ubicando la falla a diferentes longitudes; se observa que cuando la falla se encuentra a 0.5 km de la fuente el modelo de Mayr no arroja resultados correctos. Esto se debe a que el modelo no está diseñado para calcular altas corrientes, como las que se presentan para tal ubicación de la falla. El retardo de tiempo entre cada forma de onda se debe al tiempo de viaje de la onda hasta el extremo fallado.

En la figura 5.17 se muestra el resultado de la apertura del interruptor a una distancia de 0.1 km. con el modelo combinado, observando el pre-encendido del arco eléctrico que se da en un instante de tiempo corto (antes de que se separe por completo el contacto móvil del fijo). En el caso de la falla a 0.1 km se tiene una alta corriente porque no existe una impedancia lo suficientemente grande que limite la corriente de falla entre el punto de falla y el interruptor, por tal motivo el modelo de Mayr no opera correctamente. En la figura 5.17 se muestra un acercamiento del voltaje de pre-encendido en los polos del interruptor.

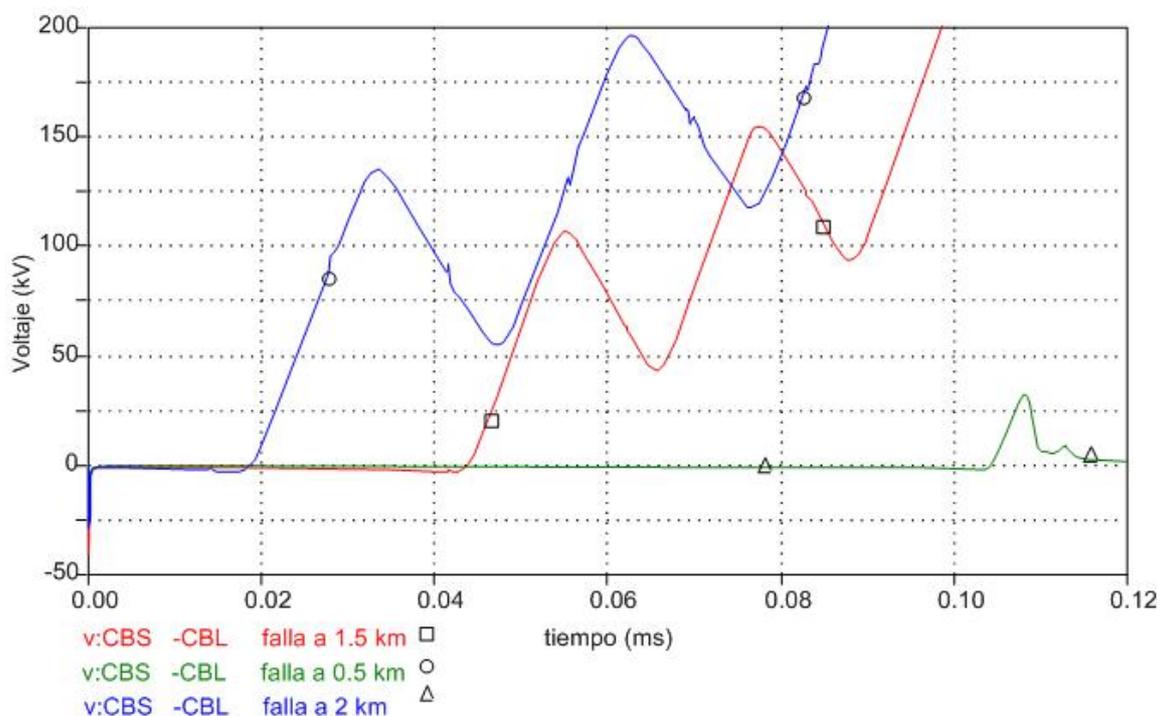


Figura 5.16 Voltaje transitorio de recuperación a diferentes longitudes de falla.

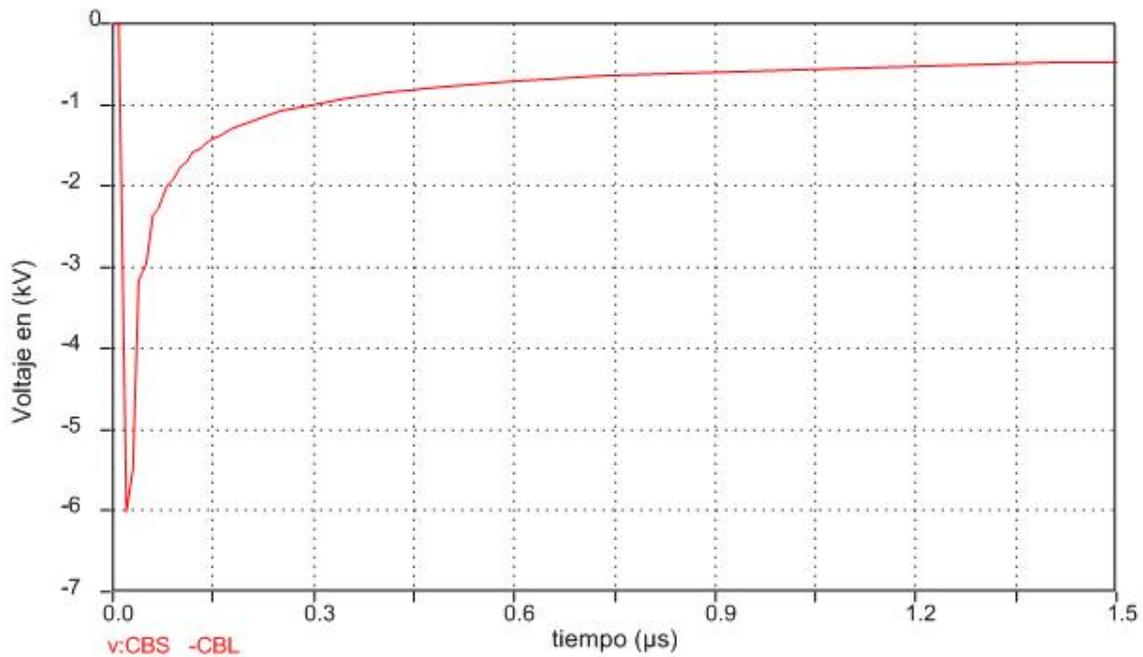


Figura 5.17 Voltaje de pre-encendido de arco simulado con el modelo combinado cuando la falla se encuentra a 0.1 km de la fuente.

Para abarcar una región más amplia de corriente en la simulación del interruptor, se emplea un modelo combinado entre Mayr y Cassie. Nuevamente se simula una falla a 0.1 km de la fuente, muy cerca de las terminales del interruptor. Con esta condición de falla se somete al interruptor en un inicio a una alta corriente; por lo tanto, la conductancia de arco es calculada por el modelo de Cassie como se muestra en la figura 5.18. La magnitud de corriente empieza a disminuir hasta cero, con lo cual se podría afirmar que el interruptor operó de manera exitosa (la magnitud de baja corriente calculada con el modelo de Mayr). Sin embargo, la corriente en un instante de tiempo vuelve a tomar un valor diferente de cero. Físicamente se puede explicar como que el medio de extinción no fue lo suficientemente capaz de extinguir la corriente de falla en un instante de tiempo muy corto, teniendo con ello un reestablecimiento de la corriente de falla.

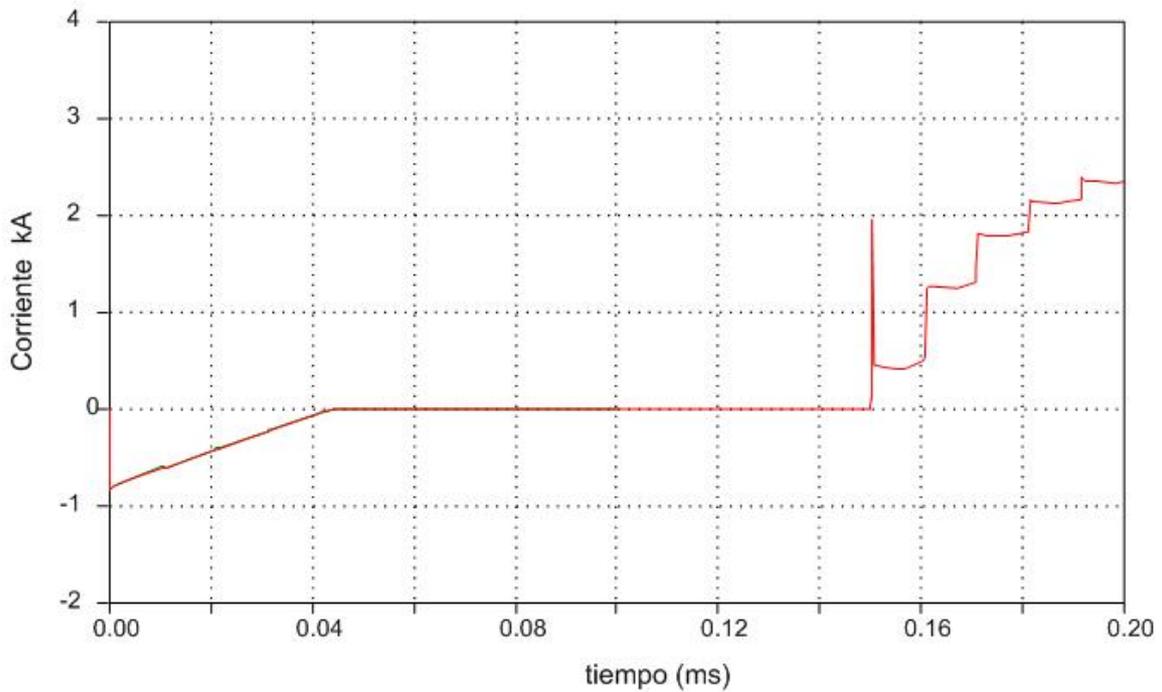


Figura 5.18 Corriente de falla a 0.1 km de los polos del interruptor modelo combinado.

5.4 Falla kilométrica Empleando el Modelo General de Arco Eléctrico

En este ejemplo se ilustra una prueba típica de laboratorio de una falla kilométrica en las terminales del interruptor. La resistencia, capacitancia e inductancia en el circuito son empleados para controlar el voltaje transitorio de restablecimiento y la fuente de corriente alterna provee la potencia de corto circuito. Los parámetros del circuito son obtenidos de pruebas de laboratorio (sintéticas) [11, 16].

En este ejemplo se comparan los modelo de Mayr y General (con la ecuación de Mayr), para determinar las ventajas y desventajas de un modelo con respecto al otro. En la figura 5.19 se muestra el circuito de prueba y los parámetros de simulación del circuito. En la figura 5.20 se muestra el circuito de simulación con modelo general del interruptor implementado en ATPDraw.

En la figura 5.21 se muestra la operación de un interruptor ideal sin modelo de arco eléctrico. En la simulación se aprecia una operación exitosa del interruptor sin mayor problema; no existe un voltaje de pre-encendido o re-ignición y se establece un voltaje transitorio de recuperación.

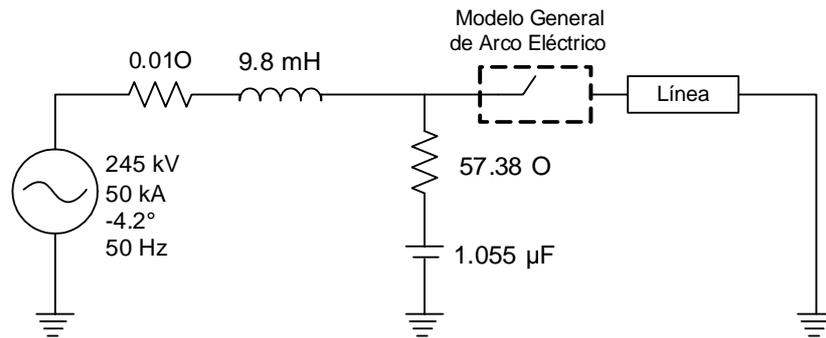


Fig. 5.19 Sistema de prueba (modelo general).

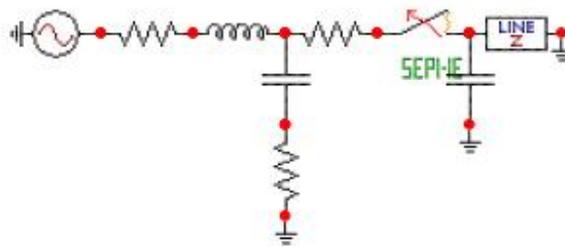


Fig. 5.20 Modelo general implementado en ATPDraw para simular una falla kilométrica.

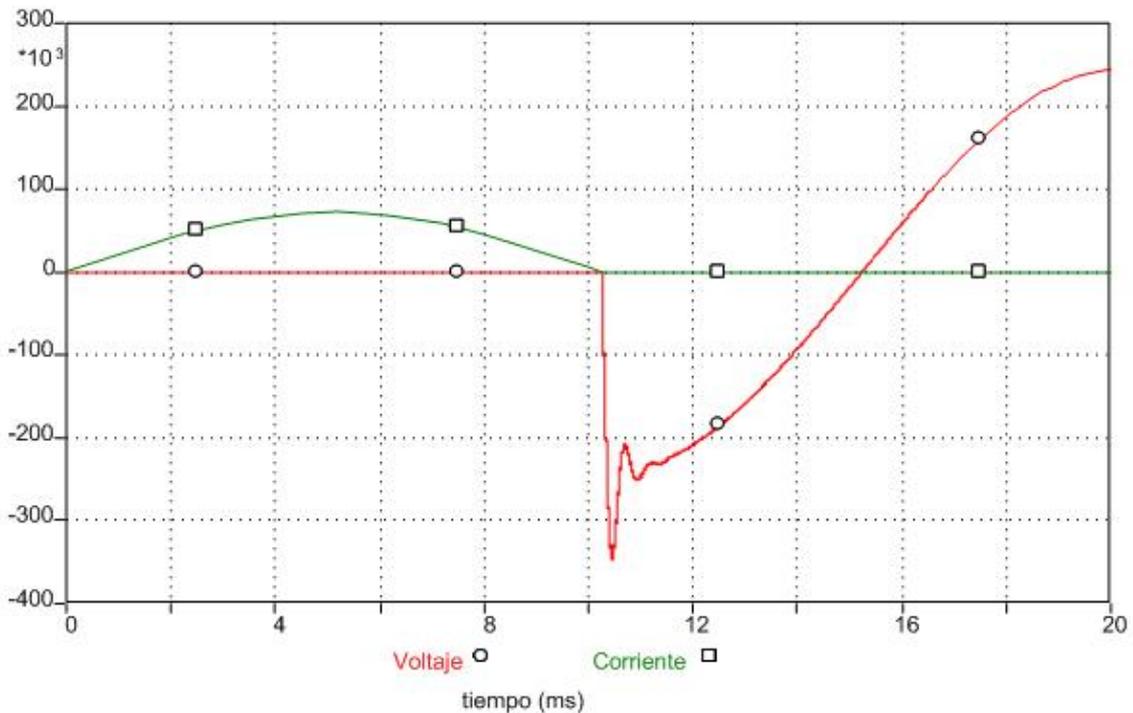


Figura 5.21 Falla a 1.5 km de los polos del interruptor (ideal).

En la figura 5.22 se muestra el voltaje de arco eléctrico y el voltaje transitorio de recuperación cuando se sitúa la falla a 1.5 km de los polos del interruptor empleando el modelo de Mayr. Se puede observar una parte del voltaje transitorio de recuperación entre los polos del interruptor, esto es porque el modelo sólo puede calcular la conductancia del arco en la vecindad del cruce por cero.

En la figura 5.23 se muestra la forma de operar del interruptor. En la zona punteada se lleva a cabo el cruce por cero de la corriente y se hace cero la corriente. En ese instante los contactos se empiezan a separar y aparece el voltaje transitorio de recuperación. Se puede observar que el modelo general se comporta aparentemente como un interruptor ideal del simulador ATP/EMTP.

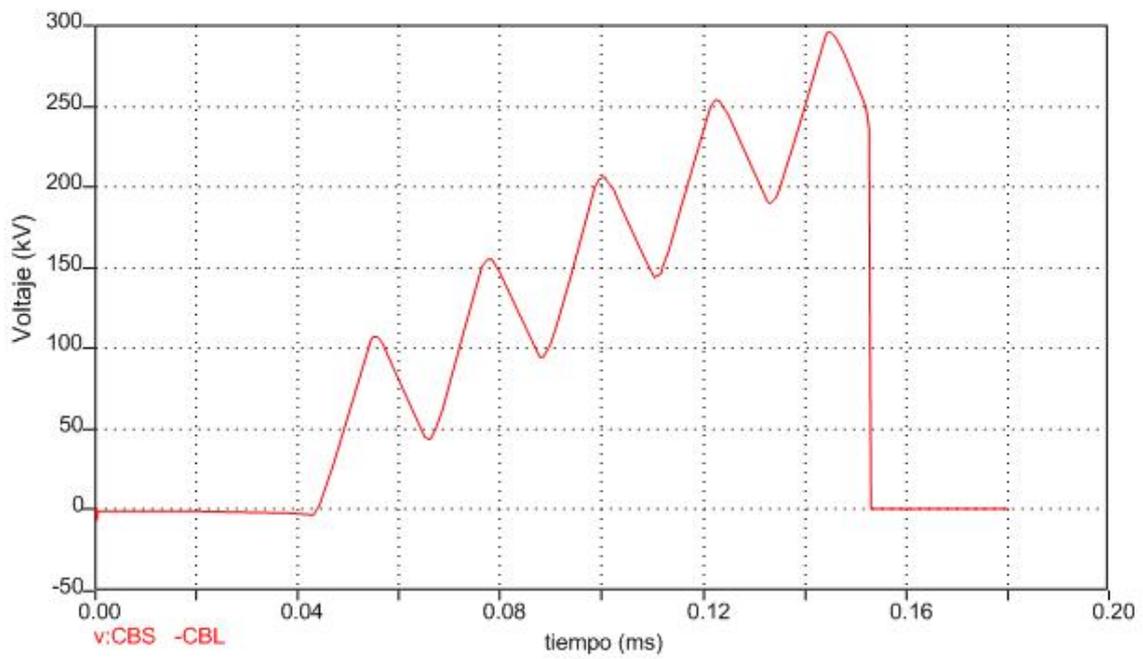


Figura 5.22 Falla a 1.5 km de los polos del interruptor (Mayr).

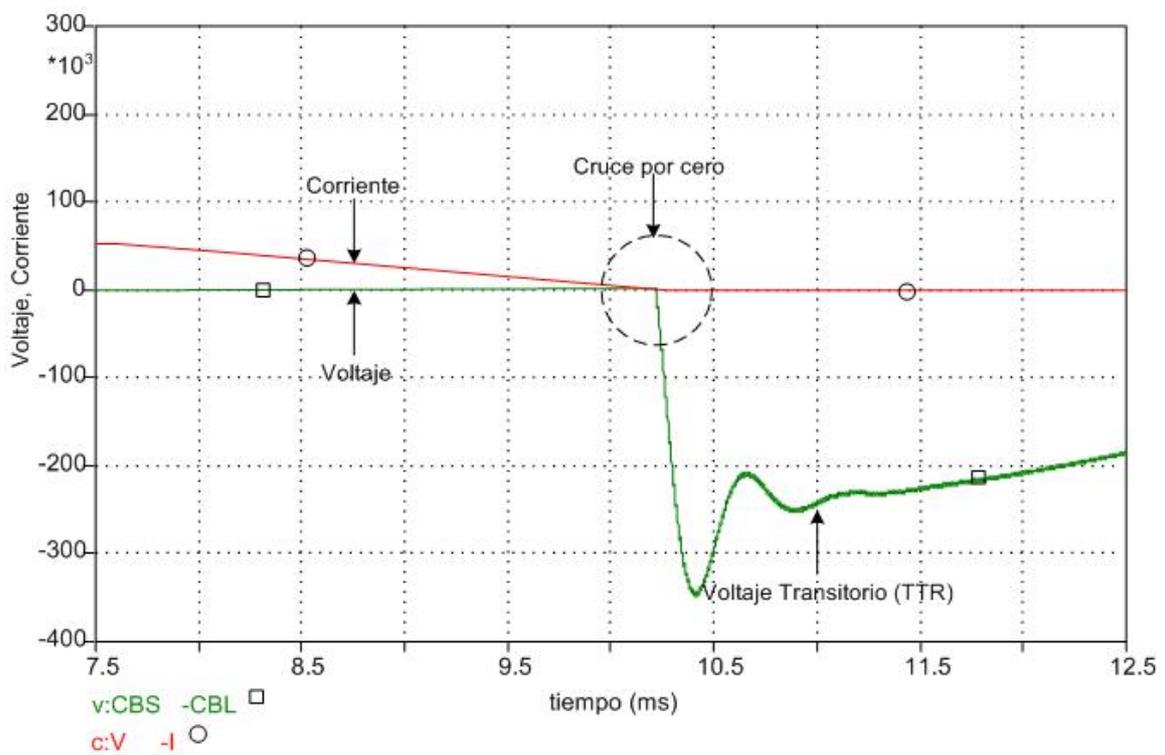


Figura 5.23 Operación del interruptor de potencia.

En la figura 5.24 se muestra la simulación de apertura de una falla kilométrica a 0.1 km de los polos del interruptor. Se introduce un tiempo de apertura al interruptor de 0.0016 s para liberar la falla en el cruce por cero más próximo. Dado que en la fuente de voltaje existe un defazamiento de -4.2° en la corriente, el cruce por cero se encuentra muy próximo y por lo tanto el interruptor intenta abrir en ese instante sin tener éxito, teniéndose entonces una reigñición.

En la figura 5.25 se muestra el voltaje entre los polos del interruptor cuando se emplea el modelo de Mayr para simular la falla kilométrica. Se observa como se trata de establecer un voltaje transitorio de recuperación entre los polos del interruptor en el instante que se hace la apertura (0.0016 ms.), lo cual no se consigue, intentándose nuevamente en el siguiente cruce nuevamente sin éxito.

En la figura 5.26 se muestra la corriente relativa a los dos intentos del interruptor por liberar la corriente de falla. A estos puntos de falla o interrupción no exitosa de la corriente en los cruces por cero se les conoce como rompimiento dieléctrico del medio aislante.

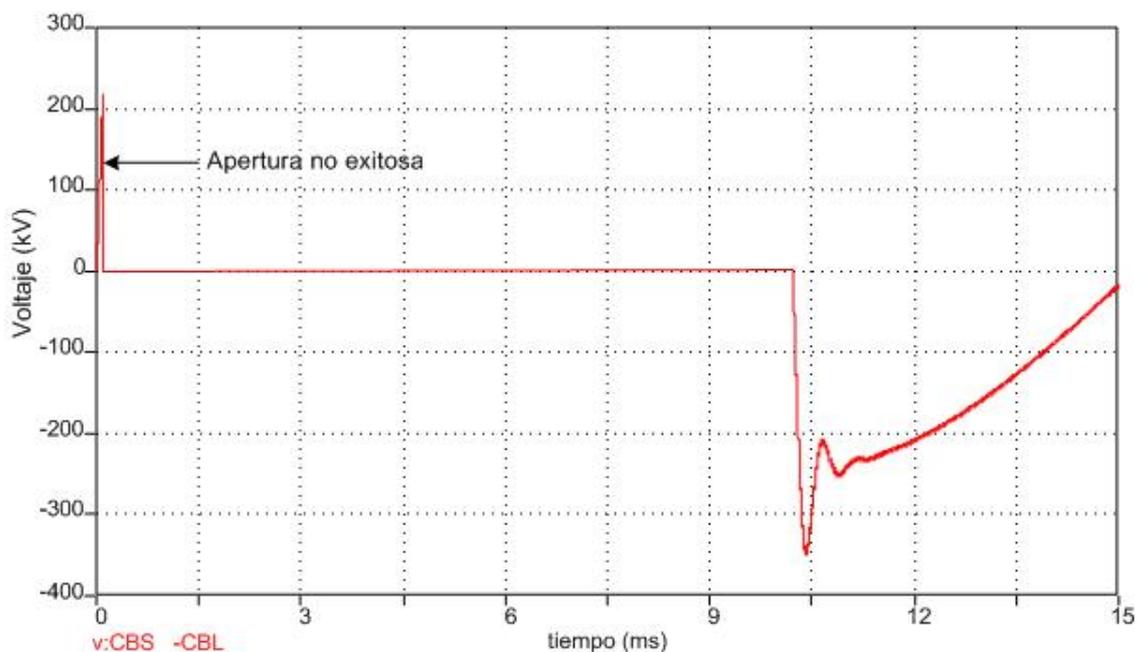


Figura 5.24 Voltaje transitorio de recuperación, falla a 0.1 km de los polos del interruptor empleando el modelo general.

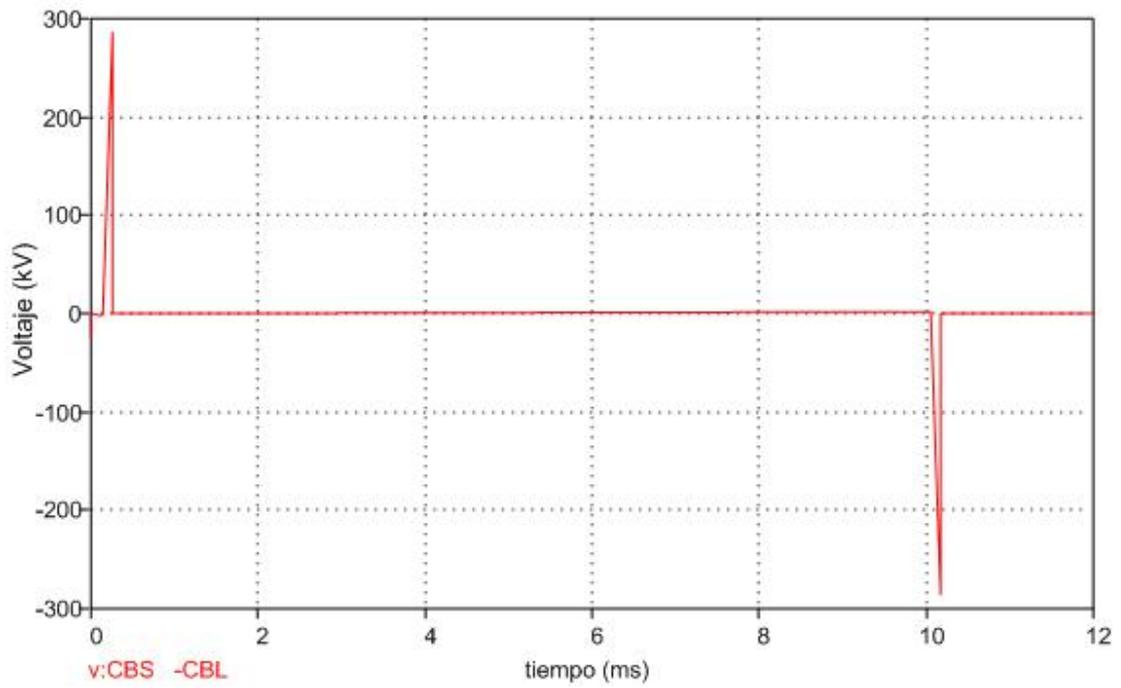


Figura 5.25 Voltaje entre polos del interruptor para una falla a 0.1 km ecuación de Mayr.

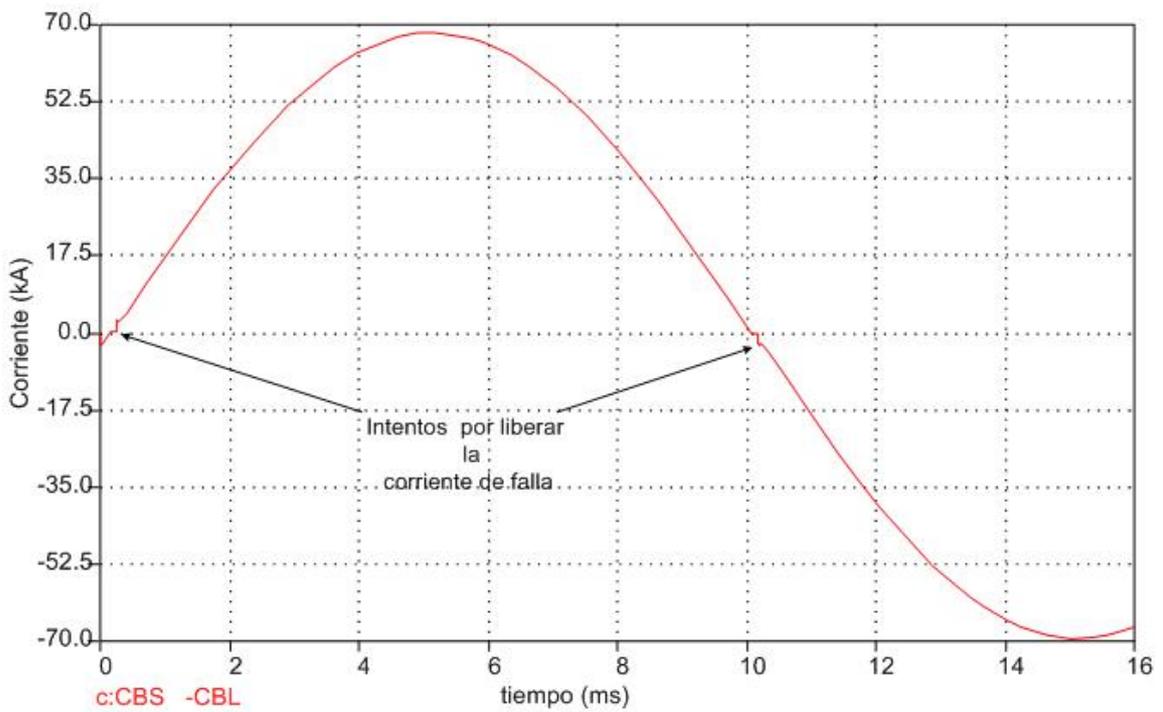


Figura 5.26 Corriente de reestablecimiento de falla kilométrica a 0.1 km de la fuente.

Se observa en la figura 5.24 que al incluir el modelo general de arco eléctrico se tiene un reencendido de arco eléctrico (apertura no exitosa) debido a que la TTR creció de una manera súbita, estresando demasiado al dieléctrico y dejándolo sin oportunidad de recuperarse para cumplir con su objetivo. Transcurre medio ciclo hasta el siguiente cruce por cero, tiempo suficiente para regenerarse y conseguir con ello liberar exitosamente la corriente de falla.

El modelo general de arco eléctrico está diseñado para abarcar una región más amplia del fenómeno de arco; desde el momento que se presenta la re-ignición en la región del pre-cero que es el momento en que aparece un voltaje relativamente pequeño, antes de que el contacto móvil se separe por completo del contacto fijo y aparezca el voltaje transitorio de recuperación. A esta etapa del arco se le llama **inicio del voltaje transitorio de recuperación de voltaje** (ITRV). La magnitud del voltaje de re-ignición depende de los parámetros de la red y los parámetros del arco en un medio de extinción. Con esto se demuestra una de las ventajas de emplear el modelo general de arco sobre los modelos básicos, ya que se puede simular una operación más real de la apertura de un interruptor.

5.5 Notas Finales

- El empleo de modelos de arco eléctrico en la simulación de apertura de interruptores puede ser fundamental en los casos en que la respuesta del sistema esté estrechamente relacionada con la interacción del arco eléctrico con dicho sistema, como se ha demostrado en los distintos casos de prueba.
- La inclusión de modelos de arco para casos en que no exista interacción importante puede provocar tiempos de simulación innecesariamente largos. En estos casos es preferible emplear los modelos de interruptor ideal existentes en los programas de simulación.
- Si se emplean modelos para estudios distintos de los cuales fueron diseñados (por ejemplo: rangos de corriente o medios de extinción erróneos) los resultados pueden ser incorrectos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

6.1 Conclusiones

En el trabajo de tesis se analizó el comportamiento transitorio de interruptores de potencia durante el proceso de apertura, haciendo énfasis en el fenómeno de arco eléctrico. Las conclusiones de este trabajo pueden resumirse como sigue:

- Los modelos de arco eléctrico necesariamente deben de ser reducidos y simplificados, necesitan de resultados de pruebas experimentales hechas en laboratorio a interruptores para obtener parámetros necesarios en las simulaciones de operación de los interruptores de potencia.
- Es recomendable emplear modelos de arco eléctrico cuando se requiera información del desempeño interno del interruptor o en general cuando la simulación esté estrechamente relacionada con la operación de apertura del interruptor.
- El uso de los modelos de arco eléctrico se hace imprescindible cuando se requiere determinar el comportamiento del arco eléctrico con el resto del sistema.
- Al emplear un modelo de arco eléctrico en simulaciones cuando no es necesario saber del desempeño interno del interruptor se obtiene el mismo resultado al emplear los interruptores con los que cuenta el simulador, además de que los tiempos de cálculo son más grandes.

6.2 Aportaciones de la Tesis

Las aportaciones más importantes de este trabajo de tesis son las siguientes:

- Se crearon cuatro nuevos componentes en el ATP, empleando la interfaz gráfica ATPDraw:
- Interruptor con modelo de Cassie
- Interruptor con modelo de Mayr
- Interruptor con modelo combinado Cassie-Mayr
- Interruptor con modelo general

Estos modelos pueden ser utilizados en forma directa (como cualquier otro componente) para simular la operación de un interruptor de potencia considerando el efecto del arco eléctrico en diferentes medios de extinción (SF_6 , aceite, aire).

- El último de los componentes (interruptor con modelo general) se implementó considerando las diferentes etapas del proceso del arco eléctrico, con el objetivo de estudiar en forma más realista el fenómeno.
- Mediante la inclusión de los modelos en varios casos de aplicación, se analizó tanto la interacción del interruptor con el sistema eléctrico como el comportamiento interno del interruptor con SF_6 como medio de extinción.

6.3 Sugerencias y Recomendaciones para Trabajos Futuros

- Desarrollo de un programa para determinar los parámetros de arco eléctrico necesarios en la simulación de interruptores de potencia en base a oscilogramas obtenidos de pruebas de laboratorio, ya que en la literatura dichos parámetros están únicamente definidos para ciertos tipos de interruptores.
- Implementar en el modelo de arco eléctrico general otro tipo de modelos particulares como el modelo combinado ó el modelo de KEMA.

- Desarrollar e implementar al interruptor un modelo de re-cierre como parte de la operación del interruptor.
- Integrar al modelo del interruptor de potencia la resistencia de amortiguamiento y el capacitor compensador.

REFERENCIAS

- [1] Guy St.-Jean and Ren Fu Wang., **“Equivalence Between Direct and Synthetic Short-Circuit Interruption Test on High Voltage Circuit Breakers”**, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-102, No.7, July 1983.
- [2] H. W. Dommel **“Electromagnetic Transient Program”**, Reference (EMTP Theory Book), Bonneville Power Administration Portland USA, 1986.
- [3] Haginomori E., **“High Specialized Electric Power Systems Tokio Institute of Technology”**, Ed. By Japanese ATP User Group 1998.
- [4] Bizjak Grega and Zunko Peter. **“Circuit Breakers Model for Digital Simulation Based on Mayr´s and Cassie´s Differential Arc Equations”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.3, July 1995.
- [5] ANSI/IEEE C37.081, **“IEEE Guide for Synthetic Fault Testing of AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on Symmetrical Current Basis”**, 1981.
- [6] Guy St-Jean and Michel Landry., **“A New Concept in Post-Arc Analysis Applied to Power Circuit Breakers”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, No.3, July 1988.
- [7] Phaniraj V. and Phadke A.G. **“Modelling of Circuit Breakers in the Electromagnetic Transients Program”**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, No.2, May 1988.
- [8] Van der Sluis L. and Sheng B.L. **“The Influence of The Arc Voltaje In Synthetic Test Circuits”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.1, July 1995.
- [9] D. Dufourmet, **“Recent Evolution of High-Voltage SF₆ Circuit Breakers”**, Physics of Power Interruption, IEE Colloquium on Published, 1995.
- [10] Browne T.E., JR. **“An Approach to Mathematical Analysis of A-C Arc Extinction in Circuit Breaker”**, IEEE Trans. 78(part III): pp. 27-37, 1955.
- [11] Van der Sluis L. and Rutger W.R. **“Comparison of Test Circuits for High-Voltage Circuit Breaker by Numerical Calculations With Arc Models”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7, No.4, October 1992.

- [12] Van der Sluis L. and Rutger W.R. **“A Physical Arc Model for the Simulation of Current Zero Behavior of High-Voltage Circuit Breakers”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7, No.2, April 1992. .
- [13] Guardado J. L., Maximov S.G., **“An Improved Arc Model Before Current Zero Based on the Combined Mayr and Cassie Arc Model”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No.1, January 2005.
- [14] U. Habedank. **“Application of a New Arc Model for the Evaluation of Short-Circuit Breaking Tests”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, October 1993.
- [15] Knobloch H., Habedank U., **“Behaviour of SF₆ High-Voltage Circuit Breakers with Different Arc-Extinguishing Systems at Short-Line Fault Switching”**, IEE Proc. Sci. Meas. Technol., Vol. 148, No. 6, November 2001.
- [16] Hatem A. Darwish and Nagy I. Elkalashy, **“Universal Arc Representation Using EMTP”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No.2, April 2005.
- [17] Thomas D.W.P. and Pereira E.T., **“The Simulation of Circuit Breaker Switching Using A Composite Cassie- Modified Mayr Model”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.4, October 1995.
- [18] Bizjak Grega and Zunko Peter., **“Combined Model of SF₆ Circuit Breaker for Use in Digital Simulation Programs”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, No.1, January 2004.
- [19] King-Jet Tseng, Yaoming Wang, and D. Mahinda Vilathgamuwa. **“An Experimentally Verified Hybrid Cassie-Mayr Electric Arc Model for Power Electronics Simulations”**, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol., 12, No. 3, May. , 1997.
- [20] Schavemaker P.H. and Van der Sluis L., **“Circuit Breaker Arc Model Computations for Critical Line Length Determination”**, Proceedings Power Con , Vol. 7, December. , 2000.
- [21] Ramirez P. C. **“Incorporación de Modelos de Arco Eléctrico a Interruptores de Potencia en el ATP/EMTP”**, Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME, México D.F. 2000.

- [22] Greenwood Allan. **“Electrical Transients in Power Systems”**, Second edition, John Wiley & Sons, Inc. 1991.
- [23] Giménez Gutiérrez Walter Fernando. **“Modelización de interruptores eléctricos de potencia”**, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Septiembre 1999.
- [24] Enriquez Harper G. **“Apuntes de Análisis de Transitorios en Sistemas Eléctricos de Potencia”**, SEPI-ESIME Zac., Instituto Politécnico Nacional.
- [25] Flurscheim C.H., **“Power Circuit Breaker Theory and Desing”**, IEEE Engineering Series 1, 1982.
- [26] D. Garzon Ruben. **“High Voltage Circuit Breakers, Desing and Applications”**, Edited Hardcover 2002.
- [27] Siegert L.A., **“Alta tension y Sistemas de Transmisión”**, Editorial Limusa.
- [28] www.siemens.com/highvoltage/circuit-breakers/
- [29] www.parsswtich.20un.com/about03.jpg
- [30] Thomas E. Browne, Jr. **“Circuit Interruption, Theory and Tecniques”**, 1984.
- [31] H.W. Dommel, T. Luis, CanAm EMTP User Group, **“Rule Book”**, Vol. 1 y 2, 1995.
- [32] Nakanishi K. **“Switching Phenomena in High Voltage Circuit Breakers”**, Marcel Dekker Inc. 1991.
- [33] Grigore A. and Natalia G., **“KEMA Arc Model Parameters Evaluation”**, Optimization of Electrical and Electronic Equipaments-Brasov 1998.
- [34] Haginomori E., **“High Specialized Electric Power Systems Tokio Institute of Technology”**, Ed. By Japanese ATP User Group 1998.
- [35] Martinez J. A. and Mahseredjian J., **“Parameter Determination for Modeling System Transients-Part VI: Circuit Breaker”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No.3, July 2005.
- [36] Orama-Exclusa R. Lionel, Medina Rodriguez. **“Numerical Arc Model Parameter Extraction for SF₆ Circuit Breaker Simulatións”**, International Conference on Power Systems Transients- IPST 2003 in New Orleans, USA.
- [37] Schavemaker P.H. and Van der Sluis L., **“Quantification of the Interrupting performance of High-Voltage Circuit Breakers”**, IEE Proc. Sci. Meas. Technol., Vol. 149, No. 4, July 2002.

- [38] Orama-Exclusa R. Lionel., **“Numerical Modeling of Vacuum Arc Dynamics at Current Zero Using ATP”**, International Conference on Power Systems Transients-IPST 2005 in Montreal, Canada on June 19-23, 2005, Paper No. IPST05-155.
- [39] Ramírez C. and Calva P., **“Simulation of Electric Power Circuit Breaker in the EMTP Incorporating Electric Arc Models Application to Reactor Bank Switching and Short Line Fault”**, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena IEEE, 2001.

APÉNDICE

EL EMTP/ATP

A.1 Introducción

El programa de transitorios electromagnéticos EMTP (ElectroMagnetic Transient Program) es un programa digital utilizado para simular transitorios electromagnéticos, electromecánicos y de sistemas de control en sistemas eléctricos de potencia. Inicialmente fue desarrollado como alternativa digital del Analizador de Transitorios en Redes (TNA - Transient Network Analyzer). En las últimas décadas se lo ha ampliado considerablemente, resultando actualmente un programa de amplia difusión y utilización en todo el mundo.

El EMTP fue desarrollado en la Boneville Power Administration (EUA) en 1969 por H. Dommel y se basa en la aplicación de la regla trapezoidal y el método de Bergeron para la solución transitoria de sistemas eléctricos de parámetros concentrados y distribuidos en el dominio del tiempo. Posteriormente surgieron versiones alternas al EMTP como:

- EMTP/ATP (Alternative Transient Program), implementado inicialmente por S. Meyer y T. Liu, en 1984, co-presidentes del “Canadian/American EMTP User Group”.
- EMTDC (ElectroMagnetic Transients for Direct Current), desarrollado en Manitoba Hydro (Canadá) por D. Woodford en 1975.
- Microtran, desarrollado en la Universidad de British Columbia (Canadá) por H. Dommel, J. Martí y L. Martí en 1987.
- EMTP-RV (versión oficial del EMTP), supervisado por el Grupo de Coordinación y Desarrollo del EMTP (DCG, por sus siglas en inglés).

Este trabajo de tesis se enfoca en la aplicación de la versión ATP del EMTP (EMTP/ATP). Los objetivos de los estudios que involucran el uso del EMTP/ATP pueden agruparse en

dos categorías. Una es el diseño, la cual incluye la coordinación del aislamiento, dimensionamiento de los equipos, especificación de los equipos de protección, diseño de los sistemas de control, etc. La otra es la solución de problemas de operación, tales como fallas en los sistemas y análisis de los transitorios que normalmente ocurren en la operación del sistema. Una lista parcial de los casos típicos de estudio se indica a continuación:

- Transitorios por maniobra.
- Descargas atmosféricas
- Coordinación del aislamiento.
- Ferroresonancia
- Análisis armónico
- Arranque de motores
- Análisis de sistemas de control en general
- Análisis de sistemas desbalanceados.

Ésta es solo una lista parcial, ya que una de las mayores ventajas del EMTP/ATP es su flexibilidad para modelar sistemas, de manera que un usuario experimentado puede aplicar el programa a una gran variedad de estudios. El usuario define el sistema a ser simulado interconectando los diversos componentes que constituyen el modelo del sistema. Los tipos de componentes que pueden ser utilizados son:

- Resistencias, capacitancias e inductancias concentradas. Estas pueden ser elementos monofásicos ó secciones polifásicas consistentes en matrices R, C y L simétricas.
- Modelos para representar líneas aéreas o cables, ya sea con parámetros distribuidos o con secciones PI. Se disponen de distintos tipos de modelos que permiten considerar las transposiciones, la variación de los parámetros con la frecuencia, etc.
- Inductancias y Resistencias no lineales, como por ejemplo inductores no lineales para representar dispositivos con saturación magnética y descargadores de protección.
- Fuentes ideales de corriente y tensión, las cuales pueden ser sinusoidales de cualquier frecuencia, exponenciales ó cualquier otra especial definida por el usuario.
- Máquinas síncronas, siendo posible modelar la parte eléctrica, mecánica y también sus dispositivos de control.

- Modelo de máquina universal que permite representar máquinas sincrónicas, de inducción y de corriente continua.
- Sistemas de control. Las señales eléctricas medidas pueden ser transferidas a un programa auxiliar denominado TACS (Transient Analysis of Control Systems), donde se emula una computadora analógica y se calculan las variables de control que son reenviadas a la red eléctrica principal. También se dispone de otro programa auxiliar denominado MODELS que cumple similares funciones, pero empleando un lenguaje propio.

Las entradas del programa consisten en el intervalo de tiempo para el cálculo (Δt), el tiempo máximo de simulación, las variables de salida deseadas y los datos del modelo. El modelo puede armarse con un programa adicional denominado ATPDraw, el cual actúa como un preprocesador de datos, permitiendo ensamblar los distintos componentes del modelo en forma gráfica.

Los datos de entrada requeridos por el EMTP/ATP son diferentes y superiores en cantidad a los necesarios para otros programas tales como flujo de carga, cortocircuito y estabilidad. Esto se debe a que el EMTP/ATP utiliza modelos más detallados que dichos programas para poder simular en forma precisa los transitorios de alta frecuencia que ocurren durante cortos períodos de tiempo. Para facilitar la entrada de datos, existen programas auxiliares que ayudan al usuario en la entrada de los datos de líneas, cables, transformadores, etc.

Como resultado de la simulación, el EMTP/ATP provee las tensiones de barra, corrientes de ramas, energía, variables de máquina, variables de control, etc. Estos valores pueden ser graficados y/o impresos como función del tiempo y almacenados en archivos para su posterior tratamiento. También se dispone de la impresión de los valores máximos y mínimos de las variables y del tiempo en el cual ocurren.

Una solución de estado estacionario se realiza antes de la simulación transitoria para definir las condiciones iniciales y esto puede ser también una útil herramienta de estudio en sí misma. Todas las tensiones, corrientes y potencias de estado estacionario son determinadas

para todos los nodos de la red. También se dispone de una opción de barrido en frecuencia de las fuentes que permite realizar estudios de armónicos en el sistema eléctrico.

El EMTP/ATP no es un programa comercial, su distribución es gratuita. Las sucesivas versiones del programa y toda la información relacionada con el mismo (manuales y diversas publicaciones) es recibida y distribuida por los comités de usuarios.

A.2 Bloques de Control en el EMTP/ATP (TACS).

La parte del EMTP/ATP conocida como TACS fue desarrollada en los 70s por L. Dubé. Entre 1983 y 1984, Ma Ren-ming hizo un estudio completo del código y revisiones mayores especialmente al orden de solución de los bloques de control. Otras mejoras fueron realizadas más adelante por el propio L. Dubé, entre otros.

El algoritmo de TACS fue escrito originalmente para la simulación de controles de convertidores de sistemas HVDC. Con el tiempo fue evidente que sus aplicaciones son mucho más amplias, aplicándose en la actualidad para:

- control de convertidores HVDC
- sistemas de excitación de maquinas síncronas
- electrónica de potencia y controles
- modelado de arco eléctrico en interruptores
- relevadores
- medidores de frecuencia

así como otros fenómenos y dispositivos que no pueden ser modelados en forma directa con las herramientas disponibles en EMTP/ATP.

El usuario define el sistema a ser simulado interconectando los diversos componentes que constituyen el modelo del sistema en forma de bloques de funciones de transferencia. Las señales eléctricas o variables medidas son transferidas a un programa auxiliar que se denominará en adelante simplemente como TACS, donde se simula una computadora

analógica y se calculan las variables de control que son retornadas a la red eléctrica principal.

Los sistemas de control generalmente son representados por diagramas de bloques interconectados, ó pueden ser varios bloques interconectados en forma aleatoria que representen una lógica compleja. La figura A.1 muestra un ejemplo típico.

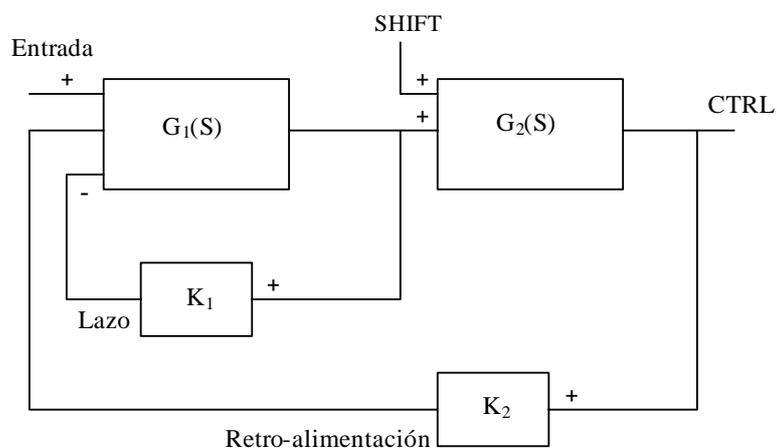


Figura A.1 Relación entre TACS y el sistema de potencia.

Los TACS aceptan como entradas de la red, voltajes y corrientes de fuentes, voltajes de nodos, corrientes de interruptores, estados de interruptores, variable internas de maquinas rotatorias. Los procesos hechos en TACS son resueltos de forma independiente del resto de la red; los datos obtenidos en TACS sirven como entradas en los dispositivos controlados por TACS y de la misma forma las variables del sistema sirven como entradas a los TACS.

Resolver los modelos representados simultáneamente en TACS con la red es más complicado que los modelos de los sistemas de potencia, como los transformadores y generadores. Tales modelos pueden representarse como matrices equivalentes de resistencias con fuentes de corriente en paralelo, las cuales se ajustan directamente a las ecuaciones nodales de la red. Las ecuaciones de los sistemas de control son muy diferentes en ese aspecto. Sus matrices son asimétricas y por lo tanto no pueden ser representadas

como redes equivalentes. Debido a estas dificultades, L. Dubé decidió resolver la red eléctrica de forma independiente de TACS. Esto impone algunas limitaciones de las cuales el usuario debe ser conciente.

En la figura A.2 se ilustra la solución de la red, primero avanzando de $(t-\Delta t)$ a t como si no existiera en forma directa TACS. Hay un vínculo indirecto entre TACS y la red con un retardo de tiempo de Δt , ya que la red puede incluir fuentes de voltaje y corriente definidas en un intervalo de tiempo de $(t-\Delta t)$ a t que son calculadas como salidas de TACS entre $(t-2\Delta t)$ y $(t-\Delta t)$. La red también recibe señales de apertura o cierre de interruptores en un tiempo t , la solución será determinada en TACS en un intervalo de tiempo de $(t-2\Delta t)$ a $(t-\Delta t)$. En el último caso, el error en la solución de la red debido al retardo de tiempo Δt es usualmente despreciable. En primera, el Δt para este tipo de simulaciones es generalmente muy pequeño, del orden de $50 \mu s$. En segunda, el retardo de tiempo en un tiristor-interruptor es compensado por el control del convertidor, que alterna los retardos y adelantos del disparo del tiristor-interruptor manteniendo una corriente constante en una condición de operación estable.

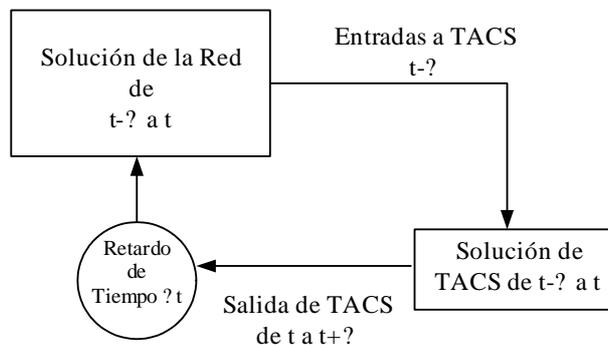


Figura A.2 Interfaz entre la red y TACS.

Con voltajes y corrientes continuos de fuentes viniendo de TACS, el retardo de tiempo puede ser más crítico; sin embargo, el usuario debe de ser conciente de sus consecuencias.

Se han documentado casos donde el retardo de tiempo Δt puede causar inestabilidades numéricas en el modelado de arco eléctrico en interruptores con TACS.

Una vez resuelta la red, los voltajes y corrientes de red especificados como entradas de TACS, conocidos entre $(t-\Delta t)$ y t , son usados para obtener solución de TACS de $(t-\Delta t)$ a t . No ocurre un retardo de tiempo en esta parte del enlace, excepto porque la parte de TACS tiene un retardo de tiempo que en muchas ocasiones no es evidente para el usuario.