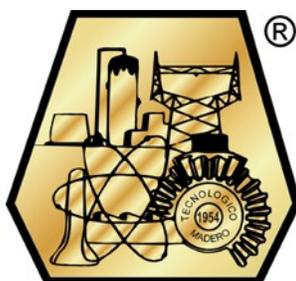


INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN



IMPLEMENTACION DE MODELOS DE ARCO ELECTRICO PARA EL
ANALISIS DE VFTC'S EN UNA SUBESTACION GIS A 245 kV

OPCION I
TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:
ING. JUAN MANUEL HERNÁNDEZ LAZCANO
G09071330

DIRECTOR DE TESIS:
DR. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLOGICO NACIONAL DE MEXICO
Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

Cd. Madero, Tamps; a **01 de Diciembre de 2016.**

OFICIO No.: U2.127/16
ÁREA: DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

C. ING. JUAN MANUEL HERNÁNDEZ LAZCANO
NO. DE CONTROL G09071330
PRESENTE

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	DR. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
SECRETARIO :	M.C. HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS
VOCAL :	DR. PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
SUPLENTE :	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE ARCO ELÉCTRICO PARA EL ANÁLISIS DE VFTC'S EN UNA SUBESTACIÓN GIS 245 KV"

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta, esperando que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"®

DRA. ADRIANA ISABEL REYES DE LA TORRE
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



S. E. P.
DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN
I. T. C. M.

c.c.p.- Archivo
Minuta

AIRT 'RCG' amh



Ave. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz Col. Los Mangos, C.P. 89440 Cd. Madero, Tam.
Tel. (833) 357 48 20. e-mail: itcm@itcm.edu.mx
www.itcm.edu.mx



DEDICATORIAS

A mis padres:

Pio Hernández Flores

Lidia Lazcano Paredes

A mis hermanos:

José Arturo Hernández Lazcano

Miguel Ángel Hernández Lazcano

A mis familiares y amigos.

A todos ellos por su gran apoyo a lo largo de mi carrera profesional y por brindarme su cariño y amistad en cada momento.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios, por haberme permitido cumplir una más de mis metas en mi vida profesional.

“El principio de la sabiduría es el temor a Jehová... Proverbios 1:7”

Agradezco a mi familia

Por estar siempre a mi lado, a pesar de estar lejos siempre estuvieron apoyándome en los buenos y malos momentos.

Agradezco a mi asesor

Por dedicarme tiempo y compartir su conocimiento conmigo para que pudiera alcanzar mi objetivo profesional.

A mis profesores de la Maestría

Implementación de Modelos de Arco Eléctrico para el Análisis de VFTC's en una Subestación GIS a 245 kV

Ing. Juan Manuel Hernández Lazcano

Resumen

En el presente trabajo de investigación se analiza el comportamiento de fenómenos transitorios ultrarrápidos de corriente (VFTC's) en una subestación encapsulada en gas SF₆ (GIS), mediante el uso del software ATP-EMTP, con el cual se pretende modelar la subestación GIS, realizando algunas simulaciones de operación de cierre, así como también llevar a cabo la construcción de cuatro modelos de arco eléctrico (Cassie, Mayr, Cassie-Mayr y Modelo General), los cuales son necesarios en la representación del transitorio. Dichos modelos de arco eléctrico se basan en el uso de ecuaciones matemáticas, que son incorporadas mediante el uso de la herramienta del software ATP-DRAW llamada TACS (Transient Analysis Control Systems).

Otro punto importante dentro de esta investigación es obtener el espectro de frecuencia que genera el VFTC, el cual muestra las frecuencias más significativas que pueden llegar a dañar la GIS, debido a altas frecuencias.

Contenido

	<i>Página</i>
Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Lista de figuras.....	v
Lista de tablas.....	viii
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2 HIPOTESIS.....	2
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.3.1 Objetivos específicos.....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.5 VENTAJAS Y LIMITACIONES.....	4
Capítulo 2: Marco Teórico.....	5
2.1 HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LA GIS.....	6
2.1.1 Evolución histórica.....	7
2.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL GAS SF ₆	8
2.3 COMPONENTES PRINCIPALES DE LA GIS.....	9
2.3.1 Módulo de juego de barras (barras principales o colectoras).....	10
2.3.2 Módulos de interruptores.....	11
2.3.3 Módulos de seccionadores.....	13
2.3.4 Módulos de transformadores de medición.....	14
2.3.5 Módulos de descargadores de sobretensiones.....	15
2.3.6 Módulos de empalme.....	16
2.3.7 Tableros de control y comando, protecciones y mediciones.....	17
2.4 INTRODUCCIÓN DE LOS FENOMENOS TRANSITORIOS EN LAS SUBESTACIONES GIS.....	19
2.4.1 Tipos de oscilaciones de voltajes transitorios ultrarrápidos.....	20
2.4.2 Tipos de comunes de fenómenos transitorios.....	20
2.4.3 Transitorio encapsulado de voltaje (TEV).....	21
2.4.4 Transitorios por maniobra de interruptores y seccionadores en subestaciones GIS.....	22
2.5 TRANSITORIOS ULTRARRÁPIDOS DE SOBREVOLTAJE (VF _{TO} 'S)...	24
2.6 TRANSITORIOS ULTRARRÁPIDOS DE SOBRECORRIENTES (VF _{TC} 'S).....	25
REFERENCIAS.....	27
Capítulo 3: Modelado de una subestación GIS a 245 kV.....	28
3.1 INTRODUCCIÓN.....	29
3.2 CONSIDERACIONES PARA EL MODELADO DE LOS ELEMENTOS DE LA SUBESTACION.....	30
3.3 DATOS Y ESPECIFICACIONES DE LA GIS EN GAS SF ₆ A 245 KV.....	33
3.4 ESQUEMA DEL MODELADO DE LA RED ELÉCTRICA EQUIVALENTE DE LA GIS.....	35
3.5 MODELADO DE LOS COMPONENTES DE LA GIS EN EL SOFTWARE ATP-EMTP.....	36
3.6 MODELO FINAL EN ATP-EMTP DE LA GIS A 245 KV.....	40

REFERENCIAS.....	41
Capítulo 4: Modelos de arco eléctrico.....	42
4.1 NATURALEZA DEL ARCO ELÉCTRICO.....	43
4.1.1 Re-Ignición del arco eléctrico.....	43
4.1.2 Re-Encendido del arco eléctrico.....	44
4.1.3 Columna de arco.....	45
4.1.4 Características del arco.....	46
4.2 MODELOS DE ARCO ELÉCTRICO.....	47
4.2.1 Modelo de Cassie.....	48
4.2.2 Modelo de Mayr.....	51
4.2.3 Modelo combinado de Cassie-Mayr.....	53
4.2.4 Modelo general de arco eléctrico.....	54
4.3 OTROS MODELOS DE ARCO ELÉCTRICO.....	57
4.3.1 Modelo de Hochrainer.....	57
4.3.2 Modelo de Kopplin.....	58
4.3.3 Modelo de KEMA.....	58
REFERENCIAS.....	60
Capítulo 5: Implementación y simulación de modelos de arco eléctrico en la GIS a 245 kV.....	61
5.1 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE ARCO ELECTRICO EN TACS.....	62
5.1.1 Modelo matemático de Cassie implementado en TACS.....	62
5.1.2 Modelo matemático de Mayr implementado en TACS.....	64
5.1.3 Modelo combinado Cassie-Mayr implementado en TACS.....	66
5.1.4 Modelo de arco general implementado en TACS.....	67
5.2 OPERACIONES DE SIMILACIÓN DE CIERRE DE INTERRUPTORES..	69
5.2.1 Operación de cierre SW1 sin incluir el modelo de arco.....	70
5.2.2 Operación de cierre SW1 incluyendo el modelo de arco de Cassie...	75
5.2.3 Operación de cierre SW1 incluyendo el modelo de arco de Mayr....	78
5.2.4 Operación de cierre SW2 sin incluir el modelo de arco.....	81
5.2.5 Operación de cierre SW2 incluyendo el modelo de arco de Cassie-Mayr.....	85
5.2.6 Operación de cierre SW2 incluyendo el modelo de arco de Mayr....	88
5.2.7 Operación de cierre SW3 sin incluir el modelo de arco.....	91
5.2.8 Operación de cierre SW3 incluyendo el modelo general de arco.....	95
5.3 SIMULACIÓN DEL ESPECTRO DE FRECUENCIA DEL VFTC.....	98
5.3.1 Espectro de frecuencia del VFTC para la simulación SW1.....	98
5.3.2 Espectro de frecuencia del VFTC para la simulación SW2.....	101
5.3.3 Espectro de frecuencia del VFTC para la simulación SW3.....	103
5.4 RESULTADOS DE LAS OPERACIONES DE CIERRE.....	106
Capítulo 6: Conclusiones.....	109
Apéndice A: Generalidades del software EMTP-ATP.....	115
A.1 INTRODUCCIÓN.....	116
A.2 COMPONENTES TACS Y CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE ARCO ELÉCTRICO.....	118
A.3 AGRUPAR EL MODELO DE ARCO A TRAVÉS DE LA FUNCION COMPRESS.....	124

Lista de Figuras

	<i>Página</i>
Figura 2.1	Subestación formada por 9 campos de 420 kV y 18 campos de 123 kV. El volumen ocupado por la GIS es el 5.8 % del que ocupa la AIS..... 6
Figura 2.2	Estructura típica de una doble barra de una GIS..... 9
Figura 2.3	Diferentes módulos de juego de barra..... 11
Figura 2.4	Módulo de barra..... 11
Figura 2.5	Interruptor de potencia “montaje horizontal”..... 12
Figura 2.6	Modulo de interruptor de potencia con unidad de ruptura..... 13
Figura 2.7	Módulos de seccionadores..... 14
Figura 2.8	Módulos de transformadores..... 14
Figura 2.9	Montaje de módulos de TC y TP..... 15
Figura 2.10	Descargador de sobretensión..... 15
Figura 2.11	Diferentes módulos de empalme..... 16
Figura 2.12	Modulo de conexión a transformador..... 17
Figura 2.13	Otros elementos de la GIS..... 18
Figura 2.14	Clasificación de los fenómenos transitorios rápidos en una GIS..... 19
Figura 2.15	Mecanismo de generación del TEV de alta frecuencia..... 22
Figura 2.16	Secuencia de apertura del seccionador mostrado en rojo la sección con carga atrapada..... 23
Figura 2.17	Origen y propagación de los VFT’s..... 24
Figura 2.18	Ondas viajeras de sobrevoltaje dentro del GIS..... 25
Figura 3.1	Diagrama unifilar de un GIS en SF6..... 33
Figura 3.2	Red eléctrica equivalente de un GIS en SF6 a 245 kV..... 35
Figura 3.3	Modelado de la fuente..... 36
Figura 3.4	Modelado del espaciador..... 37
Figura 3.5	Modelado del interruptor..... 37
Figura 3.6	Modelado del TC..... 38
Figura 3.7	Representación equivalente del TP..... 38
Figura 3.8	Modelado del CB..... 39
Figura 3.9	Modelado del T1..... 39
Figura 3.10	Modelado en ATP-DRAW de la subestación GIS a 245 kV..... 40
Figura 4.1	Diagrama esquemático de las diferentes regiones en una columna de arco uniforme..... 45
Figura 4.2	Distribución de potencial en el arco..... 45
Figura 4.3	Columna de arco eléctrico propuesto por Cassie..... 48
Figura 4.4	Columna de arco eléctrico propuesto por Mayr..... 52
Figura 4.5	Diagrama del modelo Mayr-Cassie..... 53
Figura 4.6	Evaluación de periodos del modelo general para la ecuación de Mayr..... 56
Figura 4.7	Esquema representativo del modelo de arco general..... 56
Figura 5.1	Diagrama de bloques del modelo de Cassie..... 63
Figura 5.2	Modelo de arco de Cassie representado en TACS..... 63
Figura 5.3	Diagrama de bloques del modelo de arco eléctrico de Mayr..... 65
Figura 5.4	Modelo de arco eléctrico de Mayr implementado en TACS..... 65

Figura 5.5	Modelo combinado Cassie-Mayr modelado en TACS.....	66
Figura 5.6	Bloques lógicos FORTAN del modelo general de arco.....	67
Figura 5.7	Modelo de arco general implementado en TACS.....	68
Figura 5.8	Icono en ATP del input-if component b) esquema del input-if component.....	69
Figura 5.9	a) icono en ATP del controlled integrator b) esquema del controlled integrator.....	69
Figura 5.10	Red eléctrica equivalente de la GIS para operación de cierre SW1....	70
Figura 5.11	Modelo de la GIS en ATP-DRAW para SW1.....	71
Figura 5.12	Grafica de voltaje en el interruptor durante la operación de cierre....	72
Figura 5.13	Grafica de corriente en el interruptor durante la operación de cierre.	72
Figura 5.14	Grafica de corriente en la unión GIS-cable para SW1 sin incluir el modelo de arco.....	73
Figura 5.15	Grafica de corriente en el bus link para SW1 sin incluir el modelo de arco.....	73
Figura 5.16	Grafica de corriente en el TC para SW1 sin incluir el modelo de arco.....	74
Figura 5.17	Modelado de la GIS en ATP-DRAW para SW1 incluyendo el modelo de arco de Cassie.....	75
Figura 5.18	VFTC en la unión GIS-cable para SW1 incluyendo el modelo de arco de Cassie.....	76
Figura 5.19	VFTC en el Bus link para SW1 incluyendo el modelo de arco de Cassie.....	76
Figura 5.20	VFTC en el TC para SW1 incluyendo el modelo de arco de Cassie...	77
Figura 5.21	Modelado de la GIS para SW1 incluyendo el modelo de arco de Mayr.....	78
Figura 5.22	VFTC en la unión GIS-cable para SW1 incluyendo el modelo de Mayr.....	79
Figura 5.23	VFTC en el bus link para SW1 incluyendo el modelo de Mayr.....	79
Figura 5.24	VFTC en el TC para SW1 incluyendo el modelo de Mayr.....	80
Figura 5.25	Red eléctrica equivalente de la GIS para operación de SW2.....	81
Figura 5.26	Modelo de la subestación GIS en ATP-DRAW para SW2 sin modelo de arco.....	82
Figura 5.27	Grafica de corriente en la unión GIS-cable para SW2.....	83
Figura 5.28	Grafica de corriente en el bus link para SW2.....	85
Figura 5.31	Grafica de corriente en el transformador de corriente (TC) para SW2	86
Figura 5.32	Modelado de la GIS para SW2 incluyendo el modelo de arco Cassie-Mayr.....	86
Figura 5.33	VFTC en la unión GIS-cable para SW2 con el modelo de Cassie-Mayr.....	87
Figura 5.34	Grafica del VFTC en el bus link para SW2 con el modelo de Cassie-Mayr.....	88
Figura 5.35	VFTC en el TC para SW2 con el modelo de Cassie-Mayr.....	86
Figura 5.36	Modelo de la GIS para SW2 incluyendo el modelo de arco de Mayr.	87
Figura 5.37	VFTC en la unión GIS-cable para SW2 incluyendo el modelo de Mayr.....	88
Figura 5.38	VFTC en el bus link SW2 incluyendo el modelo de Mayr.....	88
Figura 5.39	VFTC en el TC para SW2 incluyendo el modelo de Mayr.....	89
Figura 5.40	Red eléctrica equivalente de la GIS a 245 kV para SW3.....	90

Figura 5.41	de la GIS en ATP-DRAW para SW3 sin modelo de arco.....	91
Figura 5.42	Grafica de corriente en la unión GIS cable para SW3.....	92
Figura 5.43	Grafica de corriente en el bus link para SW3.....	92
Figura 5.44	Grafica de corriente en el TC para SW3.....	93
Figura 5.45	Modelo de la subestación GIS pasa SW3 incluyendo el modelo de arco general.....	94
Figura 5.46	VFTC en la unión GIS-cable para SW3 incluyendo el modelo general de arco.....	95
Figura 5.47	VFTC en el bus link para SW3 incluyendo el modelo general de arco.....	95
Figura 5.48	VFTC en el TC para SW3 incluyendo el modelo general de arco.....	96
Figura 5.49	Espectro de frecuencia para SW1 en la unión GIS-cable.....	97
Figura 5.50	Espectro de frecuencia para SW1 en el bus link.....	98
Figura 5.51	Espectro de frecuencia para SW1 en el TC.....	99
Figura 5.52	Espectro de frecuencia para SW2 en la unión GIS-cable.....	100
Figura 5.53	Espectro de frecuencia para SW2 en el bus link.....	101
Figura 5.54	Espectro de frecuencia para SW2 en el TC.....	102
Figura 5.55	Espectro de frecuencia para SW3 en la unión GIS-cable.....	103
Figura 5.56	Espectro de frecuencia para SW3 en el bus link.....	103
Figura 5.57	Espectro de frecuencia para SW3 en el TC.....	104
Figura 6.1	Grafica de corriente para SW1 en la unión GIS-cable sin modelo de arco.....	107
Figura 6.2	VFTC para SW1 en la unión GIS-cable incluyendo el modelo de Cassie.....	108
Figura 6.3	VFTC para SW1 en la unión GIS-cable incluyendo el modelo de Mayr.....	109
Figura 6.4	VFTC para SW3 en el TC incluyendo el modelo general de arco.....	110
Figura A2.1	Interacción entre el sistema de potencia (red) y el sistema de control (TACS).....	115
Figura A2.2	Diagrama de bloques de la ecuación de Mayr.....	116
Figura A2.3	Primer bloque lógico FORTRAN.....	117
Figura A2.4	Ventana de ajustes de la fuente.....	118
Figura A2.5	segundo bloque lógico FORTRAN.....	118
Figura A2.6	Ventana de ajustes de la función de transferencia.....	119
Figura A2.7	Tercer bloque lógico FORTRAN.....	120
Figura A3.1	Ventana de ajustes de la herramienta comprimir.....	121
Figura A3.2	Ventana de ajustes para agregar variables.....	122
Figura A3.3	Ventana de ajustes para agregar los nodos.....	122
Figura A3.4	Icono representativo del modelo de arco.....	123
Figura A3.5	Ventana de ajustes del componente del modelo de arco.....	123

Lista de Tablas

		<i>Página</i>
Tabla 2.1	Propiedades físico-químicas del gas SF6.....	8
Tabla 3.1	Modelado de algunos elementos típicos de subestaciones en SF6.....	28
Tabla 3.2	Capacitancia sugerida para algunos elementos de una subestación GIS.....	30
Tabla 3.3	Representación equivalente de los componentes de un GIS.....	32
Tabla 4.1	Características principales del modelo de Mayr y Cassie.....	52
Tabla 5.1	Resultados del VFTC para SW1.....	105
Tabla 5.2	Resultados del VFTC para SW2.....	105
Tabla 5.3	Resultados del VFTC para SW3.....	106
Tabla 6.1	Comparación de valores del VFTC entre los modelos de arco.....	110
Tabla A2.1	Descripción de los componentes TACS.....	116

Capítulo

1

Introducción

En este capítulo se presentan los puntos más importantes de la investigación realizada, tales como antecedentes, justificación, planteamiento del problema así como también los objetivos que se han trazado para este trabajo.

Dádonos a conocer un panorama más amplio sobre lo que se va a trabajar y la metodología que se implementará.

1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Modelar la dinámica de el arco lo más cercano posible a la realidad aprovechando el fenómeno que ocurrió en la subestación mencionada para aplicarlo en cualquier subestación encapsulada en gas SF₆, para establecer las condiciones de seguridad y confiabilidad de la subestación.

La magnitud pico de los transitorios de corriente podría estar cerca de algunos kiloamperios dependiendo de la localización del interruptor operado, el diseño de la subestación y el punto de observación. Las tensiones y corrientes transitorias irradian campos electromagnéticos (EM) durante su propagación a través de la sección de bus GIS coaxial como las frecuencias asociadas están en un rango de unos pocos megahercios hasta aproximadamente unos cientos de megaherzios.

Estos campos electromagnéticos transitorios, a su vez, se filtran en la red eléctrica externa a través de discontinuidades tales como la terminación SF₆-gas-aire, gas-a-cable, puertos de visualización no metálicos, bridas aislantes, etc. y quedan acoplados al equipo de control o cables presentes en el SIG de datos.

1.2.- HIPÓTESIS

Es posible obtener un modelo de arco eléctrico que mejor represente la dinámica física de los transitorios de sobre corriente en la subestación GIS.

1.3.- OBJETIVO GENERAL

Con el desarrollo de esta investigación se pretende obtener los cuatro modelos de arco eléctrico existentes con las características de transitorios ultrarrápidos de sobre-corriente en subestaciones aisladas en gas SF₆ a 245 kV producidos por las operaciones de cierre de interruptores y se analizarán cada uno de estos modelos y el comportamiento de

las corrientes transitorias y la interacción que tienen con lo armónicos provenientes de la red con la finalidad de combinar los modelos.

1.3.1.- Objetivos específicos

- Simular una subestación aislada en gas SF₆ a 245 kV incluyendo todos los componentes de la subestación; utilizando impedancias para la representación de la GIS.
- Realizar las diferentes simulaciones de transitorios ultrarrápidos de sobre-corriente generados por operaciones de cierre de interruptores en el modelo del GIS en SF₆ a 245 kV.
- Obteniendo los resultados de estas simulaciones, se analizarán los resultados de cada uno de los modelos y las características que presentan.

1.4.- JUSTIFICACIÓN

Parte importante de esta investigación es tener un modelo de arco eléctrico donde se simulen los transitorios ultrarrápidos de sobre corriente VFTC'S ya que será de mucha utilidad para conocer mas sobre estos fenómenos y así poder garantizar el buen funcionamiento de cualquier GIS al aplicarle este modelo.

A pesar de que las corrientes transitorias muy rápidas en las subestaciones aisladas en gas son poco comunes no dejan de presentar un grave riesgo en la operación de las mismas ya que originan problemas tales como sobrecorriente, resonancia y pérdidas de aislamiento. Lo que da origen a un desgaste en los componentes de la GIS reduciendo la vida útil de estos dispositivos y equipos.

Un punto fundamental en el sector eléctrico es la continuidad del servicio debido a las grandes demandas de los pequeños, medianos y grandes usuarios como las zonas industriales y una falla y/o operación inadecuada de las subestaciones provocarían una pérdida bastante considerable en la producción y por consecuencia pérdidas económicas.

1.5.- VENTAJAS Y LIMITACIONES

Ventajas:

- Ampliar el tema de investigación dentro de esta área será un paso importante, ya que solo se cuenta con la aplicación de un modelo de arco eléctrico (modelo de Mayr) implementado a la GIS a 245 kV y no se tienen muchas referencias o artículos relacionados.
- Dentro de esta investigación se encuentran puntos importantes y a considerar para la ingeniería eléctrica y el sector eléctrico dando una fiabilidad en la implementación de la subestaciones del tipo GIS.
- La limitación de realizar pruebas físicas a la subestación es compensada con la aplicación de simulaciones en ATP-EMTP, aportando mayor información sobre el GIS.

Limitaciones:

- Es muy poco probable poder implementar los datos recabados de la investigación.
- La simulación del GIS está basada en un solo nivel de tensión de 245 kV, debido a que es el único del cual se tiene conocimiento e información documentada, quedando como punto de partida para otras investigaciones.

Capítulo **2**

Marco teórico

Para este capítulo se presenta la parte de investigación teórica de los puntos más importantes del proyecto; desde hechos históricos, datos más relevantes, componentes de la subestación así como también investigación sobre los fenómenos transitorios y su interacción con la subestación GIS.

2.1 HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LA GIS [1]

Las subestaciones eléctricas aisladas en gas usan este fluido para el aislamiento eléctrico de sus distintos componentes -maniobra, medición, barras, etc.- de alta tensión.

Cuando se trata de alta tensión su denominación común es GIS (Gas- Insulated Switchgear). Por sus propiedades óptimas, el gas utilizado es el hexafluoruro de azufre (SF₆) del cual se mencionan sus especificaciones y propiedades.

Existen diferencias fundamentales con las Subestaciones clásicas aisladas en aire (AIS: Air-Insulated Switchgear). La más importante a favor de las GIS es que sus dimensiones son muy reducidas en comparación con la AIS, tal como se muestra en la figura 2.1. El volumen ocupado por una GIS está entre el 3 al 8 % del que le corresponde a una AIS de la misma tensión nominal y para las mismas funciones.

Del mismo modo, el área ocupada por una GIS está entre el 3 al 12 % de la que le corresponde a una AIS de la misma tensión nominal y para las mismas funciones. Las dimensiones (área y volumen) reducidas de las GIS, las convierten en la mejor solución para utilizarlas en ciudades importantes y/o industriales.

También, en centrales hidráulicas o terrenos escarpados donde el espacio disponible para la instalación de las subestaciones es sumamente reducido, las GIS encuentran una extendida aplicación. Lo mismo ocurre en instalaciones cercanas a industrias de *alta polución*.

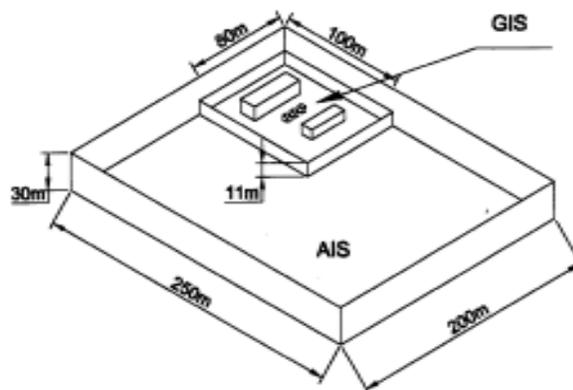


Figura 2.1 Subestación formada por 9 campos de 420 kV y 18 campos de 123 kV. El volumen ocupado por la GIS es el 5.8 % del que ocupa la AIS.

2.1.1 Evolución histórica [1]

Entre 1960 y 1970, aparecen las primeras GIS de alta tensión. En 1966 se instala en Plessis-Gassot, Francia, un prototipo experimental de 245 kV.

La evolución de las GIS reconoce diferentes períodos caracterizados por:

1ero.-El auge de la técnica empleada para el corte del arco en los interruptores de alta tensión que utilizan el gas SF₆.

2do.-El intenso desarrollo informático alcanzado para los medios de cálculo y la utilización de modelos de diseño y por la técnica de corte basada en la expansión térmica y ayuda a la apertura. Se consiguen así comandos reducidos que utilizan la energía de resortes, de forma similar a los comandos de los interruptores de media tensión.

En efecto, el conocimiento de los fenómenos involucrados en el corte que ocurre en las cámaras de los interruptores de SF₆ han llevado a conseguir dimensiones dieléctricas más pequeñas, a la par de alcanzar un aumento de la confiabilidad de estos equipos.

Aparecen nuevos programas informáticos que superan a los que se utilizaban para el cálculo del campo eléctrico; a saber: de simulación del funcionamiento dinámico del corte, de simulación de redes para el estudio del arco asociado con una red, etc.

Así, se llega a las GIS moderna, de muy reducidas dimensiones, de alta confiabilidad, con materiales de alto rendimiento y durabilidad y de muy bajo mantenimiento. Los costos cada vez más reducidos de las GIS y su adaptabilidad a las normas de cuidado del medio ambiente, hacen pronosticar que su uso se intensificará cada vez más en los próximos años. [1]

2.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL GAS SF6 [1]

La fórmula química del gas hexafluoruro de azufre es: SF₆.

Tabla 1.1 *Propiedades físico-químicas de gas SF₆*

Peso molecular y composición química	Peso molecular	146,06
	Contenido de azufre	21,95%
	Contenido de flúor	78,05%
Solubilidad	En agua (25oC, 1 atm)	0,001 ml/ml
	En aceite dieléctrico	0,297 ml/ml
Constantes críticas	Temperatura crítica	45,64 °C
	Presión crítica	38,6990 bar
	Densidad crítica	0,725 g/cm ³
	Volumen crítico molar	201 ml

En el año 1900 se logra por primera vez la síntesis del SF₆, por la acción directa del flúor gaseoso sobre el azufre.

En la misma época, se comprueba la excelente estabilidad química del SF₆ sometido a un arco eléctrico. Este acontecimiento permite prever el éxito posterior que tendría como aislante eléctrico.

El gas SF₆ reúne las siguientes características:

- Inodoro. ⁽¹⁾
- Incoloro. ⁽¹⁾
- No tóxico.
- Muy estable.
- No inflamable.

(1) En condiciones normales de presión y temperatura (presión absoluta: 1.013 hPa, temperatura: 20°C).

La rigidez dieléctrica del SF₆, es muy superior a la del aire (más del doble) y sometido a presiones de 2 a 4 bares es cinco veces superior. Esta característica es la que lo destaca como medio dieléctrico.

El gas SF₆ tiene un comportamiento excelente como gas de corte de arcos eléctricos, permitiendo un rápido restablecimiento de la tensión. Esto lo logra especialmente debido a que su disociación es reversible y, además, a que posee una gran estabilidad térmica.

2.3 COMPONENTES PRINCIPALES DE LA GIS [2]

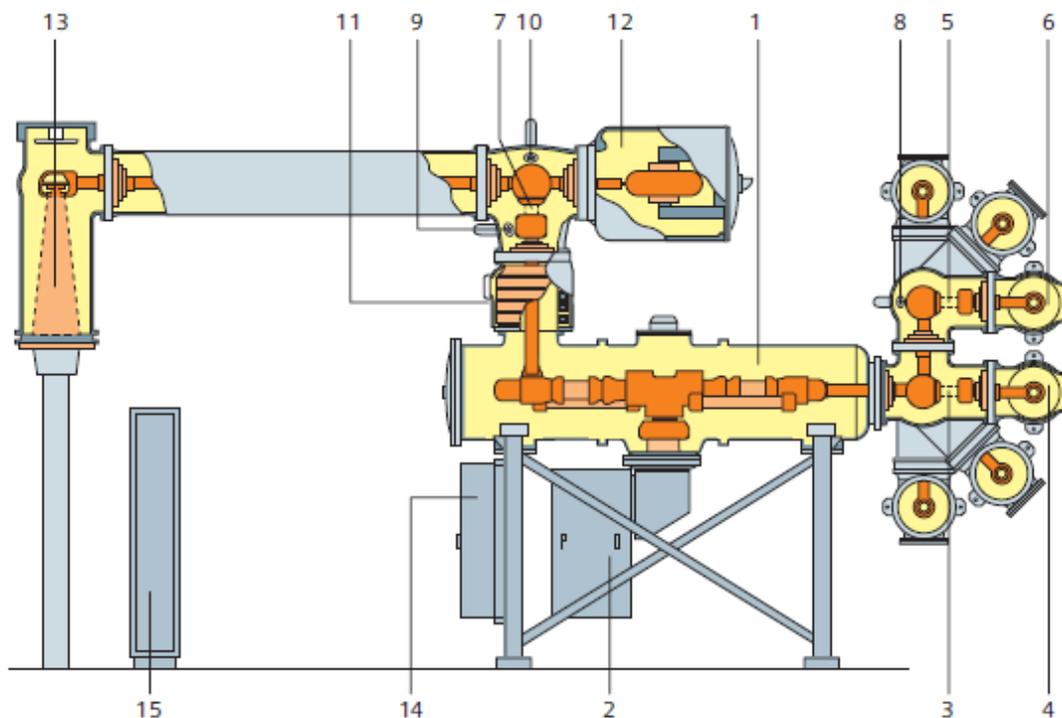


Figura 2.2. Estructura típica de una doble barra de una GIS. (1) Interruptor de potencia, (2) mecanismo de accionamiento por acumulación de energía en resorte, (3) desconectador de barra I, (4) barra I, (5) desconectador de barra II, (6) barra II, (7) desconectador de línea de salida, (8,9) desconectador de puesta a tierra (normal), (10) seccionador de puesta a tierra prueba de cierre (de alta velocidad), (11) transformador de corriente, (12) transformador de tensión, (13) copa terminal de cable, (14) armario de control de interruptor de potencia, (15) armario de control local.

Las subestaciones GIS tienen sus partes bajo tensión aisladas en gas hexafluoruro de azufre (SF₆), en lugar de aislamiento en aire como en las subestaciones AIS. Cada equipo de alta tensión, incluyendo las barras principales o colectoras, está encapsulado independientemente en un comportamiento metálico provisto de un ambiente de gas SF₆ a presión mayor que la atmosférica. Se forman así módulos individuales por equipo, que luego se interconectan mecánica y eléctricamente entre sí para formar distintas configuraciones.

Los módulos individuales corresponden a:

- Módulo de juego de barras principales o colectoras.
- Módulo de interruptor.
- Módulo seccionador de barras.
- Módulo de seccionador de línea.
- Módulo de seccionador de aislamiento.
- Módulo de transformador de corriente.
- Módulo de transformador de tensión.
- Módulo de transformador de tensión en barras.
- Módulo de descargador de sobretensiones.
- Módulo de prolongación (recto, ángulo).
- Módulo de empalme con cable subterráneo.
- Módulo de empalme con línea aérea.
- Módulo de empalme con maquinas (transformador/autotransformador de potencia, reactor, etc.)

Los distintos módulos de equipos y juegos de barras principales o colectoras se conectan entre sí utilizando bridas selladas y atornilladas.

2.3.1 Módulo de juego de barras (barras principales o colectoras) [2]

Están formadas por una barra conductora de aluminio o cobre, de una sección circular y soportada por aisladores situados a lo largo de la envolvente metálica. El volumen entre la barra conductora y su envolvente permanece con gas SF₆ a presión mayor que la atmosférica (distintos valores según cada fabricante). Hasta la tensión nominal de 145 kV existen envolventes tripolares (las tres fases dentro de un mismo encapsulado). A partir de esa tensión son unipolares (fases separadas).

En el caso de subestaciones de distribución de 23 kV muy utilizadas en la ciudad de México se utilizan envolventes unipolares. La GIS unipolares o de fases separadas es más voluminosa que las tripolares o de fases juntas.

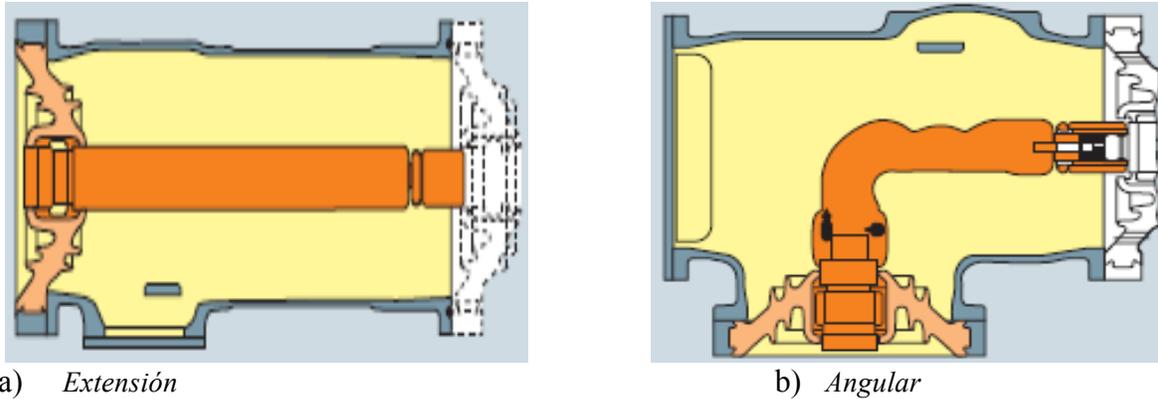


Figura 2.3 Diferentes módulos de juegos de barra

También las tripolares tienen un mantenimiento más sencillo al facilitar la entrada del personal asignado a esas funciones tienen menos partes móviles y por ser una sola envolvente en lugar de tres, la posibilidad de fugas de gas es menor. Además, los flujos magnéticos de cada una de las tres fases se compensan, ahorrando así pérdidas de energía.



Figura 2.4 Módulo de barra

2.3.2 Módulos de interruptores [2]

Los interruptores empleados en las GIS modernos utilizan el mismo principio que los interruptores usados en las AIS: auto compresión. Ante un cortocircuito, el gas SF₆ presente como elemento de corte, se recalienta como consecuencia del contacto con la

energía desarrollada por el arco eléctrico. Aumenta así la presión en el interior del cilindro de contacto, sumándose a la presión de separación propia de su mecanismo de accionamiento. Esta razón hace que no haga falta que el sistema de accionamiento sea el único encargado de aportar la energía necesaria para generar una presión capaz de extinguir el arco eléctrico. De este modo, los accionamientos modernos son simples y basados en la acumulación de energía en resortes.



Figura 2.5 *Interruptor de potencia “montaje horizontal”*

Los interruptores modernos de alta tensión utilizan accionamientos de “carga de resortes” hasta 500 kV. En tensiones superiores se utilizan accionamientos electrohidráulicos, constructivamente muy compactos, y con un control simplificado de las válvulas.

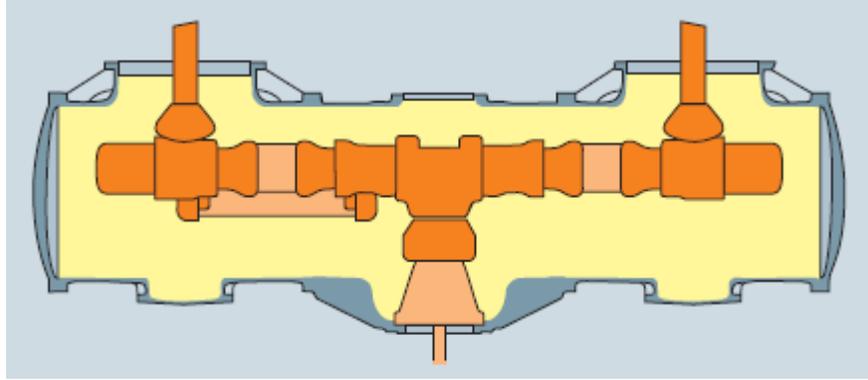


Figura 2.6 Módulo de interruptor de potencia con unidad de ruptura

Según el fabricante y la configuración adoptada, los interruptores se instalan en posición horizontal o vertical. En la posición horizontal, mediante el uso de un carrito apropiado y suministrado por el fabricante, puede extraerse para mantenimiento el contacto móvil con mayor facilidad.

2.3.3 Módulos de seccionadores [2]

Los seccionadores adoptan diversas formas constructivas y algunos fabricantes combinan las funciones del seccionador con su cuchilla de tierra en un solo aparato de tres posiciones. Resulta así que el contacto móvil tiene tres posiciones: (a) se une al contacto fijo, (b) permite unir la barra conductora con el contracontacto de la cuchilla de tierra y (c) en una posición neutra donde no se cierran el seccionador y la cuchilla de tierra. Este diseño posibilita un enclavamiento recíproco de ambas funciones.

El contracontacto de la cuchilla de tierra se extrae aislado de la envoltura metálica para fines de medición. Los polos de un seccionador están acoplados mecánicamente y así son movidos simultáneamente mediante un accionamiento motorizado o en forma manual externa. Los seccionadores de puesta a tierra soportan las corrientes de cortocircuito máximas de diseño del sistema.

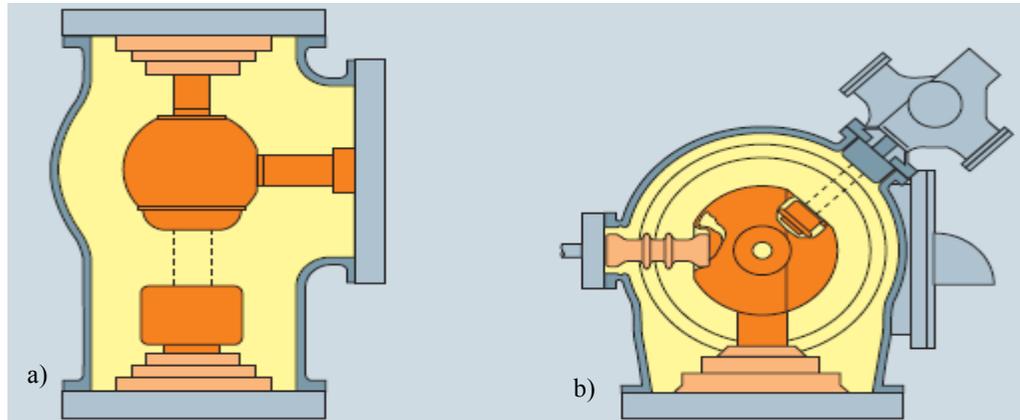


Figura 2.7 Módulos de seccionadores a) *Desconector* b) *Seccionador de puesta a tierra tipo espárrago*

2.3.4 Módulos de transformadores de medición [2]

Los transformadores de corriente son de tipo inductivo y se pueden instalar en cualquier punto de la GIS, ya que su primario está constituido por la barra conductora de alta tensión. Los transformadores de tensión pueden ser de tipo inductivo o capacitivo, siempre inmersos en una atmósfera de gas SF₆.

Los terminales secundarios de los transformadores de medición se extraen de la envoltura metálica a través de una placa de paso perfectamente estanca al gas, quedando eléctricamente accesibles en la caja de bornes, lugar desde donde, 74 además, se pueden cambiar las relaciones de transformación en el caso de los transformadores de corriente.

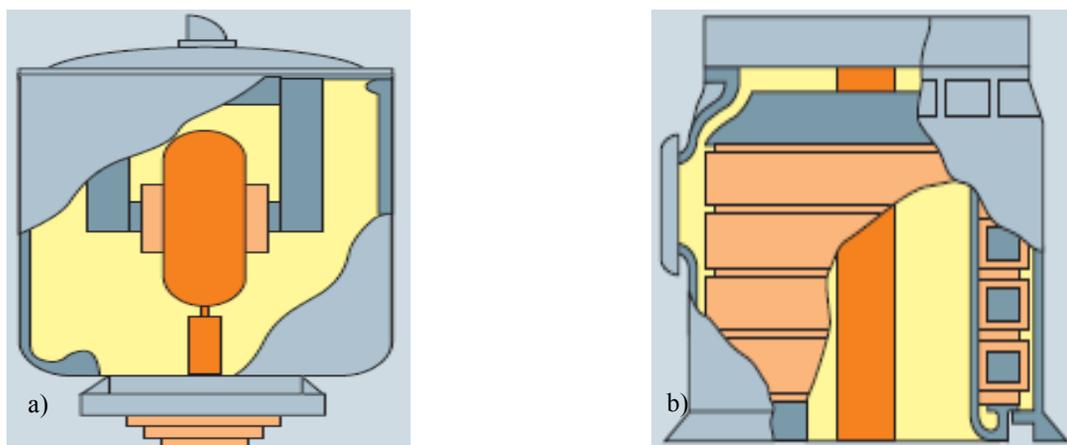


Figura 2.8 Módulos de transformadores a) *Transformador de corriente* b) *Transformador de potencial*

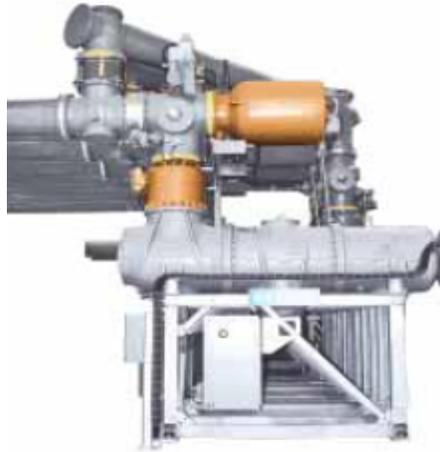


Figura 2.9 Montaje de módulos de TC y TP

2.3.5 Módulos descargadores de sobretensiones [2]

Normalmente se instalan fuera del GIS en los puntos donde las líneas aéreas se conectan a la Subestación. No obstante, también pueden instalarse en módulos aislados en gas SF₆ que forman parte integrante de la Subestación GIS. Los descargadores de sobretensiones - de óxido de zinc- tienen en su envoltura metálica un registro que permite abrir la barra conductora interna para realizar ensayos de la Subestación. Por la parte inferior, además de la existencia de terminales para el monitoreo del gas, se instalan los dispositivos de control propios.

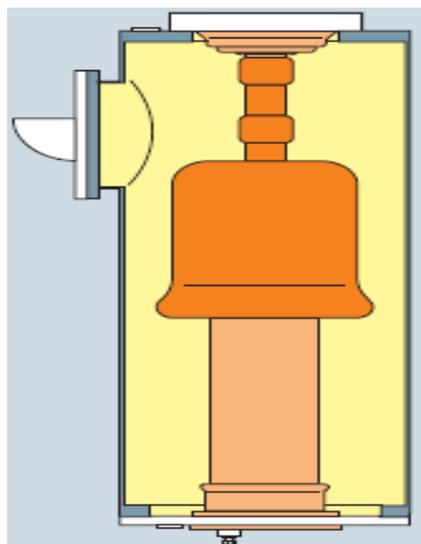


Figura 2.11 Descargador de sobretensión

2.3.6 Módulos de empalme [2]

Los módulos de empalme o conexión unen los campos (celdas) de las Subestaciones GIS con otros equipos externos: líneas aéreas, transformadores de potencia o reactores, cables subterráneos, etc. Asimismo, son el pasaje del aislamiento en gas SF₆ de las GIS a otro medio de aislamiento: aire (líneas aéreas), aceite (transformadores de potencia). Permiten junto con los módulos de unión o prolongación rectos, en ángulo, en “T”, etc., la realización de diversas configuraciones, con una mayor versatilidad y facilidad que las utilizadas en las AIS.

Los módulos de empalme o conexión para líneas aéreas, que contemplan aisladores gas / aire, se diseñan en función de la coordinación de la aislación, las distancias eléctricas mínimas y el grado de polución existente en el lugar de implantación de la GIS. En el caso de los módulos de empalme o conexión para cable permiten la conexión de las GIS con cables subterráneos de alta tensión de cualquier tipo y sección. También se pueden conectar varios cables en paralelo (2, 3, cables por fase) cuando se trata de intensidades nominales que superan las secciones comerciales de los cables y, por lo tanto, debe adoptarse el criterio de utilizar más de un cable por fase.

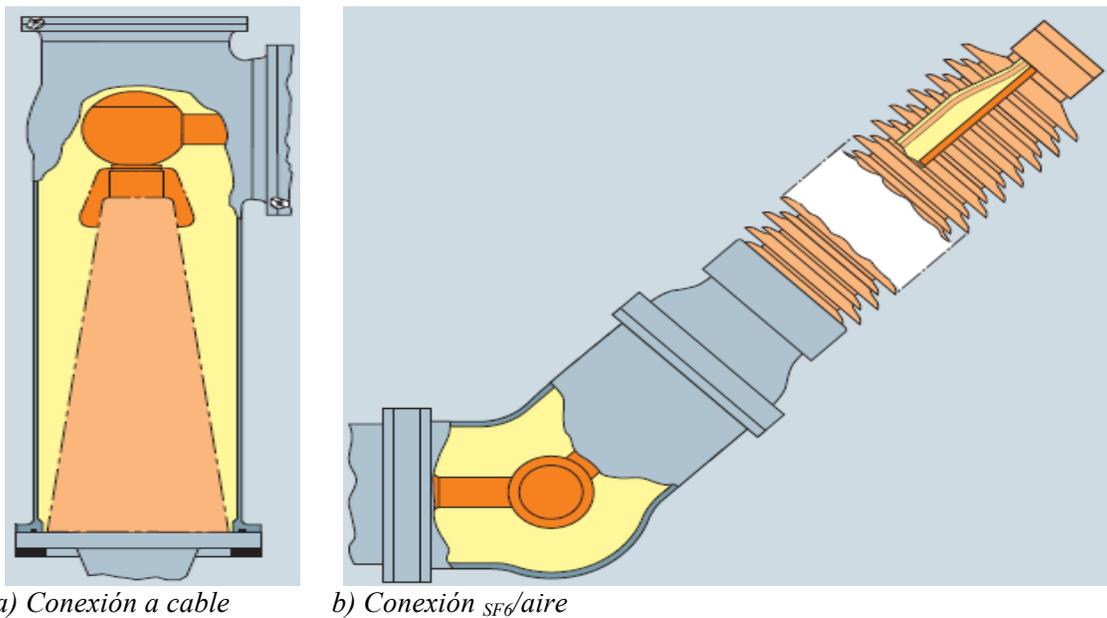


Figura 2.11 Diferentes módulos de empalme

Mediante la utilización de diversos tipos de módulos de prolongación rectos y en ángulos, más los módulos de empalme o conexión correspondientes, se logra la adaptación más económica de las conexiones de las GIS con diversos equipos de alta tensión. Hasta tensiones nominales de 145 kV, los módulos de transición monopolar / tripolar permiten interconectar módulos y componentes de esas características entre sí. Generalmente se utilizan para el módulo de empalme o conexión de salida tripolar con módulos terminales mono polares de líneas aéreas y transformadores trifásicos de potencia.

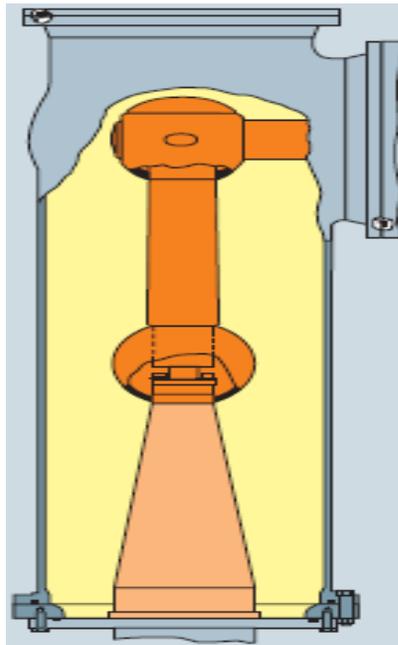


Figura 2.12 Módulo de conexión a transformador

2.3.7 Tableros de control y comando, protecciones y mediciones. [2]

Normalmente, los tableros de baja tensión de comando y control, protecciones y mediciones, se disponen en el frente de cada campo (celda) adosado al mismo o, pasillo por medio, enfrentados, pero siempre en forma individual por campo (celda). También las protecciones y mediciones, juntas o por separado, pueden disponerse en tableros específicos ubicados en otras salas tal como se utiliza en las Subestaciones AIS. Asimismo, el control y comando de toda la Subestación GIS se los puede centralizar en una sala de control general. Cualquiera sea el criterio que se utilice para la ubicación de estos tableros de comando y control, protecciones y mediciones, deberá preverse que en los sistemas de alta tensión es de uso corriente que toda la Subestación pueda controlarse en forma remota.

De este modo, generalmente se establecen tres niveles de comando y control:

- 1) Local, desde cada campo (celda), bien sea el tablero respectivo adosado a éste o enfrentado pasillo por medio.
- 2) Remoto desde la sala de control general ubicada en el mismo edificio.
- 3) Remoto desde un centro de despacho de cargas regional y/o nacional.

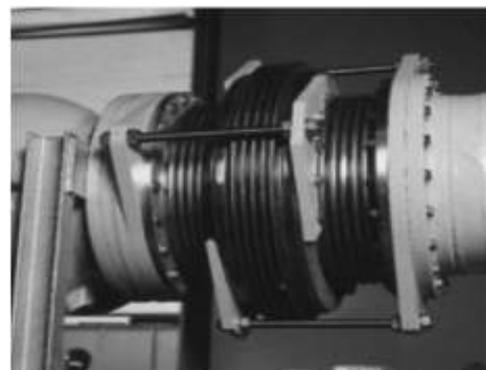
Los instrumentos medidores de la presión de los diferentes módulos que se describen más adelante, pueden ubicarse localmente en los mismos tableros individuales de comando y control, protecciones y mediciones.

Entre módulos se utilizan aisladores cónicos de resina que a la vez soportan las barras conductoras, ofrecen una barrera estanca al gas en toda la subestación en los casos de apertura de interruptores sobre fallas, al tiempo que también evitan la prolongación de una falla al resto de la Subestación.

Para compensar las dilataciones térmicas y las tolerancias de montaje se disponen entre los distintos módulos, en especial los correspondientes a prolongaciones, de juntas de dilatación del tipo fuelle que permiten dichas expansiones y evitan el escape del gas interno.



a) Aislado cónico de resina



b) Junta de expansión

Figura 2.13 Otros elementos de la GIS

2.4 INTRODUCCIÓN DE LOS FENÓMENOS TRANSITORIOS EN LAS SUBESTACIONES GIS. [3]

Los transitorios de sobrevoltaje ultra-rápidos (VFT) en una GIS son generados durante la desconexión u operación de interruptores o por una falla a tierra. El rápido colapso de voltaje da como resultado la generación de ondas viajeras transitorias del orden de nanosegundos las cuales se propagan a través del GIS y a los aparatos conectados externamente. La amplitud de las ondas depende de la diferencia de potencial entre los contactos previo a la ruptura y de la impedancia característica de los buses.

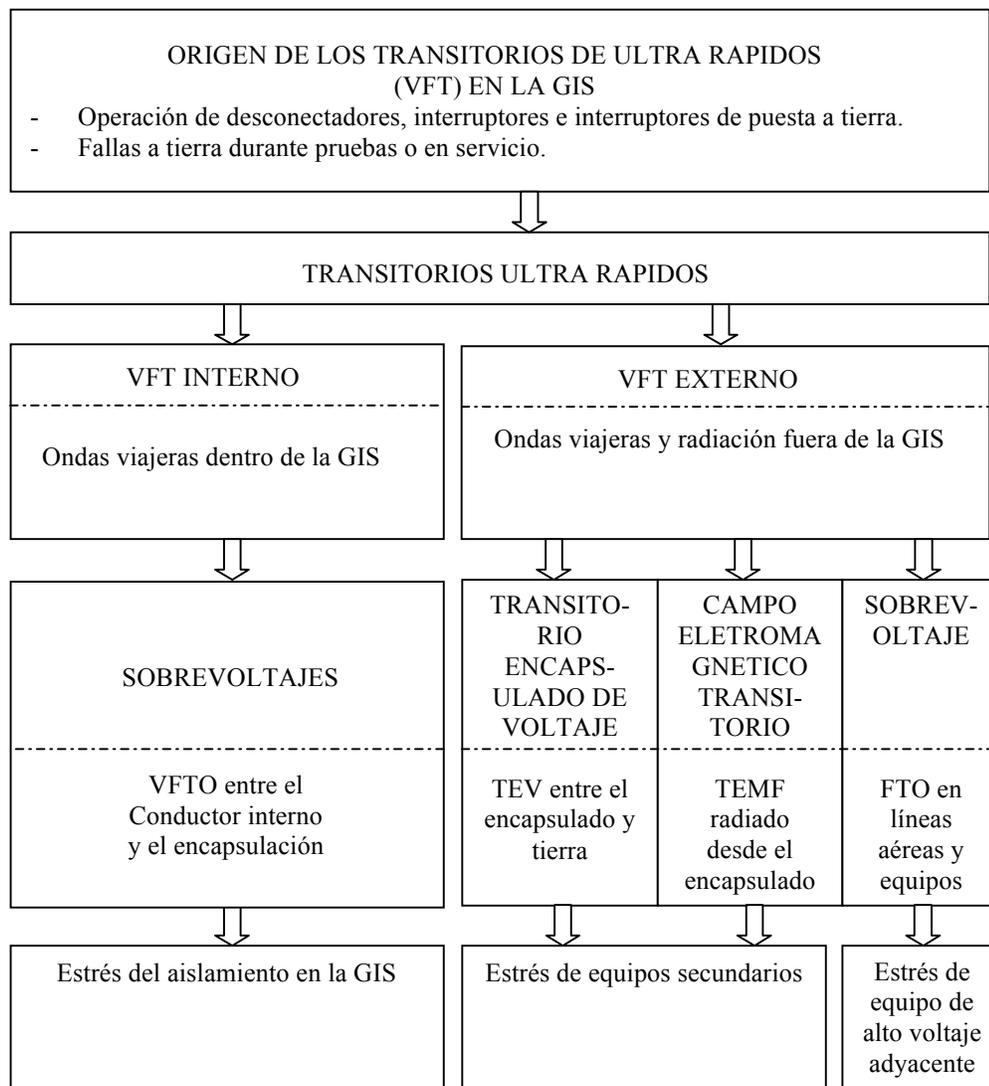


Figura 2.14 Clasificación de los fenómenos transitorios rápidos en una GIS

Las altas frecuencias generadas se propagan con muy poca atenuación. Los sobre voltajes ocurren como resultado de la reflexión y refracción de cada discontinuidad en la impedancia del GIS. Una clasificación de VFT está dada en la figura anterior 2.15. Donde se muestra los diferentes fenómenos que pueden ser relacionados a operaciones de maniobra en la GIS causando un intervalo de voltaje con un tiempo de elevación en el rango de 4 a 7 nanosegundos del lugar de la fuente.

Los fenómenos observados a diferentes distancias del origen del VFT puede ser dividido en VFT's interno o externo y puede presentar diferentes formas, a causa de ondas viajeras dadas por el diseño de la instalación y los efectos de amortiguamiento dentro y fuera de la GIS. Los efectos de VFT's en el equipo usado en las subestaciones son también mencionadas en la figura anterior.

2.4.1 Tipos de oscilaciones de voltajes transitorios ultrarrápidos

Los transitorios ultrarrápidos de voltajes (VFT's) exhiben dos categorías de oscilaciones:

1. Las oscilaciones de alta frecuencia que se encuentran asociadas a la longitud del bus de la GIS en la vecindad del seccionador.
2. Las oscilaciones de baja frecuencia de baja frecuencia las cuales están frecuentemente asociadas con grandes capacitancias agrupadas en la red, tales como transformadores de voltaje altamente capacitivos (CTV's). Las oscilaciones de baja frecuencia son usualmente responsables de altos valores de VFT's.

2.4.2 Tipos comunes de fenómenos transitorios

Algunos de los tipos más comunes de fenómenos transitorios en sistemas eléctricos de potencia incluyen:

- Descargas atmosféricas en o cerca de las líneas de transmisión
- Energización de líneas de transmisión (operaciones de cierre y recierre)
- Switcheo de capacitores
- Interrupción de pequeñas corrientes inductivas (switcheo de reactores y transformadores sin carga)
- Energización de transformadores en líneas conectadas en externos de líneas de transmisión (sobrevoltajes temporales causados por combinación de la corriente de inrush y las ondas viajeras en la línea)
- Resonancia lineal a frecuencia fundamental o armónica
- Switcheo de capacitor serie y resonancia subsíncrona
- Rechazo de carga
- Voltaje de recuperación transitoria en circuitos interruptores
- Transitorios muy rápidos en ductos de bus aislados en gas causados por operaciones de desconexión.

2.4.3 Transitorio encapsulado de voltaje (TEV) [3]

El voltaje transitorio encapsulado se define como la diferencia de potencial transitoria existente entre el encapsulado del GIS con respecto a un plano de tierra, originado por el comportamiento dieléctrico del SF6 en el interruptor o seccionador. El TEV aparece generalmente en la transmisión del GIS y las líneas aéreas. La localización

usual para voltajes es la parte donde el GIS se conecta mediante el bushing de aire a gas al resto de la red eléctrica el acoplamiento del transitorio se efectúa a través de la capacitancia de medición del bushing.

La generación del fenómeno TEV puede presentarse con oscilaciones de baja y de alta frecuencia. Usualmente las oscilaciones de alta frecuencia son más comunes.

Los TEV's pueden también aparecer en otros puntos del encapsulado tales como los espaciadores para TC's y en partes de inspección visual.

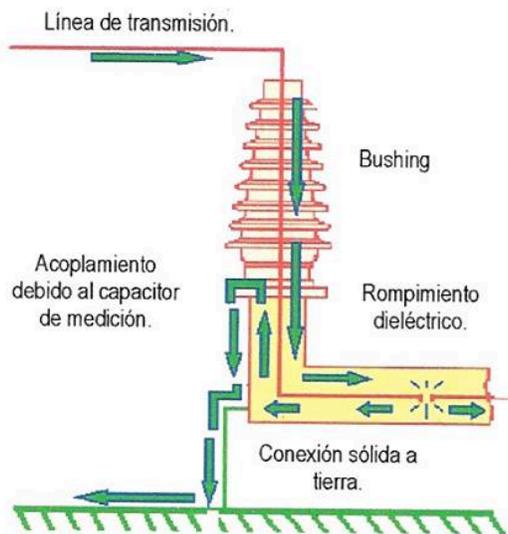


Figura 2.15 Mecanismo de generación del TEV de alta frecuencia

2.4.4 Transitorios por maniobra de interruptores y seccionadores en subestaciones GIS. [4]

Durante la operación de cierre del interruptor, a medida que se acercan los contactos se incrementa la intensidad de campo eléctrico entre los mismos debido a la disminución de la distancia de separación. Al incrementarse el campo eléctrico se vence la rigidez dieléctrica de SF₆ originándose un arco eléctrico. En este momento la corriente fluye a través del arco, alimentando la carga de voltaje de la fuente. Posteriormente, la diferencia de potencial entre los contactos disminuye y el arco eventualmente se extingue,

dejando una carga atrapada en el circuito. Este primer encendido del arco eléctrico puede ocurrir a un valor cercano a la cresta de voltaje de la fuente. El cambio de tensión entre los contactos se lleva a cabo en un tiempo bastante corto, del orden de 3.5 ns a 5 ns. Esto equivale a inyectar un escalón de voltaje en el circuito a energizar, el cual se propaga por el mismo.

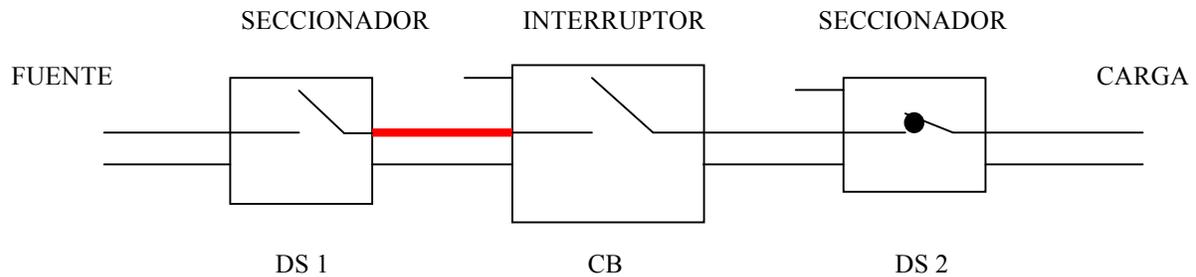


Figura 2.16 Secuencia de apertura del seccionador mostrado en rojo la sección con carga atrapada.

La frecuencia principal de oscilación del fenómeno transitorio depende de la longitud de la sección involucrada por la operación de maniobra y se encuentra en el rango de 1MHz a 40 MHz. La magnitud de la sobretensión transitoria depende de la magnitud de la carga atrapada y la velocidad del interruptor.

Los VFT tienen principalmente dos consecuencias:

- El aumento de la tensión del puente de descarga entre los contactos con respecto a la envoltura.
- Producción de toda una serie de ondas progresivas en la instalación de SF₆

Inicialmente, aumenta brevemente la tensión de descarga entre los contactos, con lo que se presenta un peligro con las descargas disruptivas hacia la envoltura, dado que el canal de descargas se ramifica cada vez más por la formación progresiva de caminos o rutas conductoras, hacia el encapsulado puesto a tierra.

2.5 TRANSITORIOS ULTRA-RÁPIDOS DE SOBREVOLTAJE (VFTO'S). [5]

Las corrientes transitorias rápidas generadas durante las operaciones de maniobra tienen un tiempo de frente de cerca de 3-7 ns, con magnitud pico de algunos kA dependiendo de la ubicación del interruptor. Estas corrientes transitorias se propagan como campos transitorios electromagnéticos (EM), ya que estas corrientes están asociadas con componentes de frecuencia en el rango de unos pocos MHz hasta aproximadamente 100 MHz

Estos transitorios son fuentes potenciales de interferencia electromagnética (EMI) para los equipos electrónicos que operan en el GIS. Tanto la conducción y los mecanismos de radiación son responsables para el acoplamiento de los VFTC al circuito de control presente en el GIS.[4]

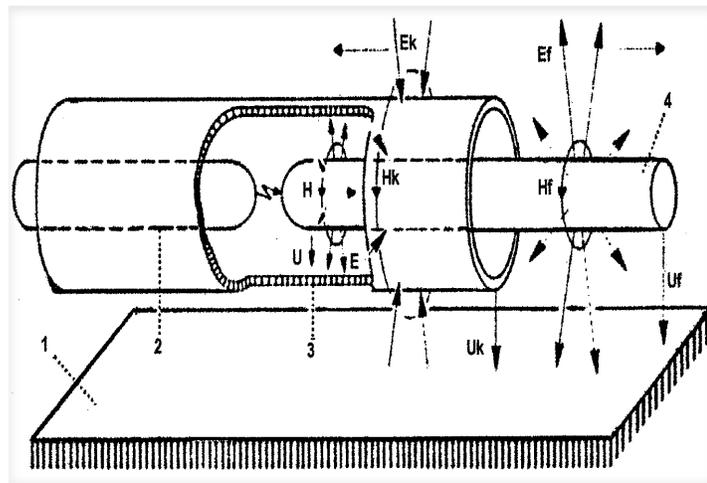


Figura 2.17 Origen y Propagación de los VFTO'S

1. Plano conductor.
2. Conductor interno.
3. Envoltorio.
4. Línea externa

U.- Onda viajera sobre el conductor

H,E.- Campo electromagnético sobre el conductor

Uk.- Voltaje transitorio del envoltorio Hk,Ek.- Campo electromagnético sobre el envoltorio.

Uf.- Onda viajera sobre la línea

Ef,Hf.- Campo electromagnético sobre la línea externa.

Durante las operaciones de apertura y cierre, ocurren repetitivas rupturas de campo eléctrico en forma de pre o recierres en los contactos. El rápido colapso de voltaje da como resultado la generación de ondas viajeras transitorias del orden de nanosegundos las cuales se propagan a través del GIS y los aparatos conectados externamente.

Los transitorios ultrarrápidos de voltaje (VFTO's) exhiben dos categorías de oscilaciones:

1. Las oscilaciones de alta frecuencia que se encuentran asociadas a la longitud del bus del GIS en la vecindad del seccionador.
2. Las oscilaciones de baja frecuencia las cuales están frecuentemente asociadas con grandes capacitancias agrupadas en la red, tales como los transformadores de voltaje altamente capacitivos (CVT's). Las oscilaciones de baja frecuencia son usualmente responsables de altos valores de VFTC's.

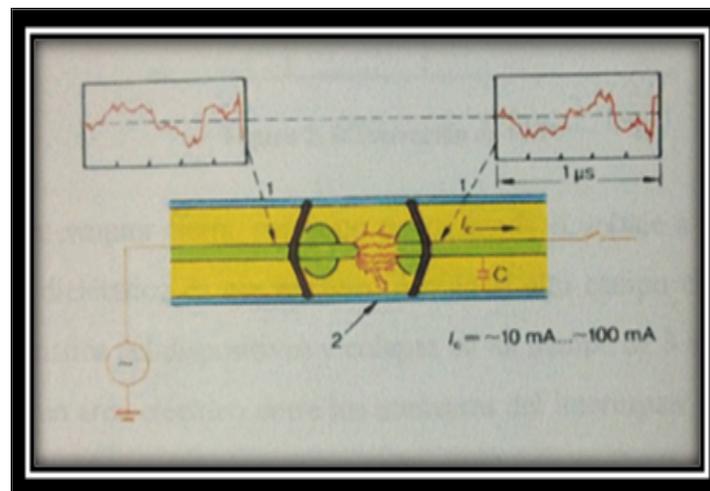


Figura 2.18 Ondas viajeras de sobre voltaje dentro del GIS.

2.6 TRANSITORIOS ULTRARRÁPIDOS DE SOBRECORRIENTE (VFTC'S). [6]

En el análisis de los transitorios ultrarrápidos de corriente que se presentan en los componentes de la GIS se deben conocer cuáles son los elementos que interactúan al momento que aparece este fenómeno, por las causas antes mencionadas, (operaciones de switcheo).

Del mismo modo que se analizó el transitorio ultrarrápido de sobrevoltaje (VFTO's) se tratará de explicar la naturaleza y generación de los VFTC's dentro del GIS y sus componentes; ahora en este fenómeno los valores de campo magnético se colapsan elevándose la corriente a unos cuantos kA en un tiempo aproximado de 4-7 ns.

Los parámetros que caracterizan los VFTC son de más relevancia para la protección de controles de la GIS y son los siguientes:

- 1) Amplitud de VFTC.
- 2) Atenuación de la amplitud de VFTC con distancia y tiempo.
- 3) Componentes de frecuencia dominante de los VFTC.
- 4) Variación en la frecuencia de VFTC con respecto al tiempo.

REFERENCIAS

- [1] Subestaciones Eléctricas de Alta Tensión Aisladas en Gas. Ing. Julio Sosa Escalante. Octubre 2007.
- [2] Simulación y Análisis de VFTC's en u GIS en SF6 a 245 kV y su Interacción con los Armónicos Provenientes de la Red de Distribución. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. José Alfonso Sánchez Cortez. Diciembre de 2008.
- [3] Very Fast Transient in GIS. January, 1989 IEEE. J. Meppelink, K. Diererich, K. Feser
- [4] Análisis, Simulación y Control de Transitorios Electromagnéticos en Subestaciones Aisladas en SF6 por Medio de Redes de Tierra. Tesis de Doctorado. Instituto Tecnológico de Morelia. Gastón Hernández Martínez. 2007
- [5] Wavelet Analysis of VeryFastTransientovervoltagesforEffectiveShielding of Control Circuits in a 245kV Gas Insulated. 2002IEEE; M.Mohanarao, M.joy Thomas and B.P.Singh.
- [6] FrecuencyCharacteristics of VeryFastTransientCurrents in a 245-kV GIS. 2005 IEEE. M.Mohanarao, M.joy Thomas and B.P.Singh.

Capítulo

3

Modelado de una Subestación GIS a 245 kV.

Este capítulo describe los componentes principales de la subestación tipo GIS detallando el modelado de cada uno de ellos. Tomando en cuenta la información encontrada en la literatura y la aplicación de la misma en el software ATP-EMTP, para el posterior análisis de los fenómenos transitorios.

3.1. INTRODUCCIÓN. [1]

Los conductores coaxiales en subestaciones encapsuladas en gas tienen una alta capacitancia específica a tierra en comparación con las subestaciones al aire libre. Por lo tanto, las corrientes de capacitancia del bus fuera de carga en la GIS son más grandes que las corrientes de capacitancia en la subestaciones al aire libre. Además las diferencias entre las características de esas dos subestaciones es disminuir las sobretensiones de inductancia e impedancia característica así como el alto gradiente de campo eléctrico entre el preencendido y el reencendido del arco en gas hexafluoruro de azufre bajo presión con referencia del encapsulado a tierra.

Esto causa transitorios ultrarrápidos con formas de onda caracterizadas por frentes de sobretensiones de corta duración (alrededor de 10ns). Los contactos del desconectador en la GIS se mueven lentamente (en el orden de 1cm/s) causando numerosos encendidos y re encendidos entre contactos. Cuando los contactos están cerrados la carga capacitiva que fluye a través de los contactos es de 0.3 a 1 r.m.s. dependiendo del rango de voltaje y la longitud del bus el cual está operando. El encendido y re encendido ocurre tan pronto como la resistencia del dieléctrico es excedida por sobrevoltaje.

El sobrevoltaje está definido por la distancia entre contactos, los contactos geométricos y la presión del gas así como por la característica del gas al instante del encendido. Cada encendido causa corrientes de alta frecuencia tendiendo a igualar el potencial en los contactos. Cuando la corriente es interrumpida, el voltaje en el sitio de la fuente y el lado de la carga oscilará de manera independiente.

3.2. CONSIDERACIONES PARA EL MODELADO DE LOS ELEMENTOS DE LA SUBESTACION. [2]

El modelado preciso es primordial en la simulación de transitorios electromagnéticos en subestaciones en SF₆, de ello depende en gran medida la exactitud del análisis. Existen datos encontrados en la literatura que pueden ser de gran ayuda, pero algunas veces son apropiados para describir la configuración física y el cálculo de parámetros eléctricos del GIS en particular. Los errores por efecto piel son despreciables y no afectan la simulación, solo en los casos donde se modelen pérdidas dieléctricas en algunos componentes tales como la boquilla y los transformadores capacitivos.

Tabla 3.1. Modelado de algunos elementos típicos de subestaciones en SF₆

Elemento	Modelo	Característica	Limitación de aplicación
Cable de alimentación	Línea de transmisión sin transposición con parámetros distribuidos	Entrada de datos dada por los parámetros modales (R, L, C); la matriz de transformación modal T ₁ se calcula para la frecuencia dominante.	R, L, C son independientes de la frecuencia. Se utilizan los factores de corrección de Carson y Pollaczek ($\delta_g = 250\Omega.m$).
Acoplamiento	Línea de transmisión sin transposición con parámetros distribuidos y capacitancia adicional en terminales.	Parámetros que dependen de la topología del sistema.	
Espaciador	Capacitancias agrupadas hacia tierra.	Valor de la capacitancia dependiendo de la topología del sistema.	
Bus	Línea de transmisión sin transposición con parámetros distribuidos.	Entrada de datos por parámetros modales (R, L, C); la matriz de transformación modal T ₁ se calcula para la frecuencia dominante.	El acoplamiento entre conductor y encapsulado es despreciado a frecuencia muy alta.
Encapsulado	Condiciones como	Condiciones como	Condiciones como

	para el bus.	para el bus.	para el bus.
Codo	Línea de transmisión sin transposición con parámetros distribuidos y capacitancia adicional en terminales.	Parámetros dependientes de la razón entre la radio del conductor y el radio del encapsulado. Valor de la capacitancia C dependiente de la topología del sistema.	
Desconectador	Línea de transmisión sin transposición con parámetros distribuidos y capacitancia adicional en terminales.	Parámetros independientes de la razón entre el radio del conductor y el radio del encapsulado. Valor de la capacitancia C dependiente de la topología.	En el instante de la descarga, el seccionador se asume que se ha cerrado a través de la resistencia de arco, cuando el seccionador están en posición abierto se modela como una terminación esférica
Resistencia de arco	Función de tiempo no lineal	Si $t < \mu s$, $R=0\Omega$; si $t > \mu s$ R varía desde 0 hasta 5Ω . Puede modelarse de acuerdo a la ecuación de Dewey.	Si $t < 0$ se asume que R será infinita.
Descargador de sobretensión	Característica de protección conectada en paralelo con la capacitancia.	En el casi de transitorios ultrarrápidos ($0.5\mu s$) la característica de protección se corrige en referencia a la característica de la sobretensión de $8/20\mu s$. la inductancia de la conexión a tierra es tomada en cuenta.	La inductancia propia del apartarrayos es tomada en cuenta. Si se requiere un modelo más preciso, es necesario modelarlo por capas.
Transformador de potencia	Capacitancia agrupada hacia tierra.	Valor de la capacitancia dependiendo del tipo de transformador, nivel de voltaje y tipo de devanados.	Ramas inductivas hacia tierra despreciadas debido a la muy alta impedancia a altas frecuencias. El comportamiento no

			lineal del núcleo es despreciado.
Terminación esférica	Línea de transmisión sin transposición con parámetros distribuidos y capacitancia adicionada a las terminales.	Parámetros dependientes de la razón entre el radio del conductor y el radio del encapsulado. Valor de la capacitancia C dependiente de la tipología del sistema.	

En el modelado de subestaciones tipo GIS, la capacitancia a tierra desarrolla un papel importante en el comportamiento transitorio. También, la capacitancia equivalente en un sistema tipo Gis es de vital importancia para una simulación confiable.

Tabla 3.2. Capacitancia sugerida para algunos elementos de una subestación GIS.

Equipo	Capacitancia a tierra		
	115 kV	400 kV	765 kV
Interruptor desconectador	100pF	200	160pF
Circuito interruptor (tanque muerto)	100pF	150pF	600pF
Aislamiento del soporte de bus	80pF	120pF	150pF
Transformador de potencial capacitivo	8000pF	5000pF	4000pF
Transformador de potencial magnético	500pF	550pF	600pF
Transformador de corriente	250pF	680pF	800pF
Autotransformador*	3500pF	2700pF	5000pF

*La capacitancia también depende de los MVA.

3.3. DATOS Y ESPECIFICACIONES DE LA GIS EN GAS SF₆ A 245 KV [3]

La figura 3.1 muestra el diagrama en línea de una fase de un GIS a 245 kV usado para el estudio de VFTC. La línea de entrada está compuesta de una línea de transmisión aérea de 5 km de longitud, un transformador de potencial (PT), apartarrayos (LA), un interruptor a tierra (ES), un seccionador (DS), etc. El cable XLPE de 8m de longitud y el transformador de potencia (T1) se suponen como el lado fuente y lado de carga del interruptor siendo operado, respectivamente.

El circuito equivalente de los componentes de la GIS y el canal de la chispa que se crea entre los contacto del interruptor son esenciales para el cálculo de los niveles de corriente transitoria.

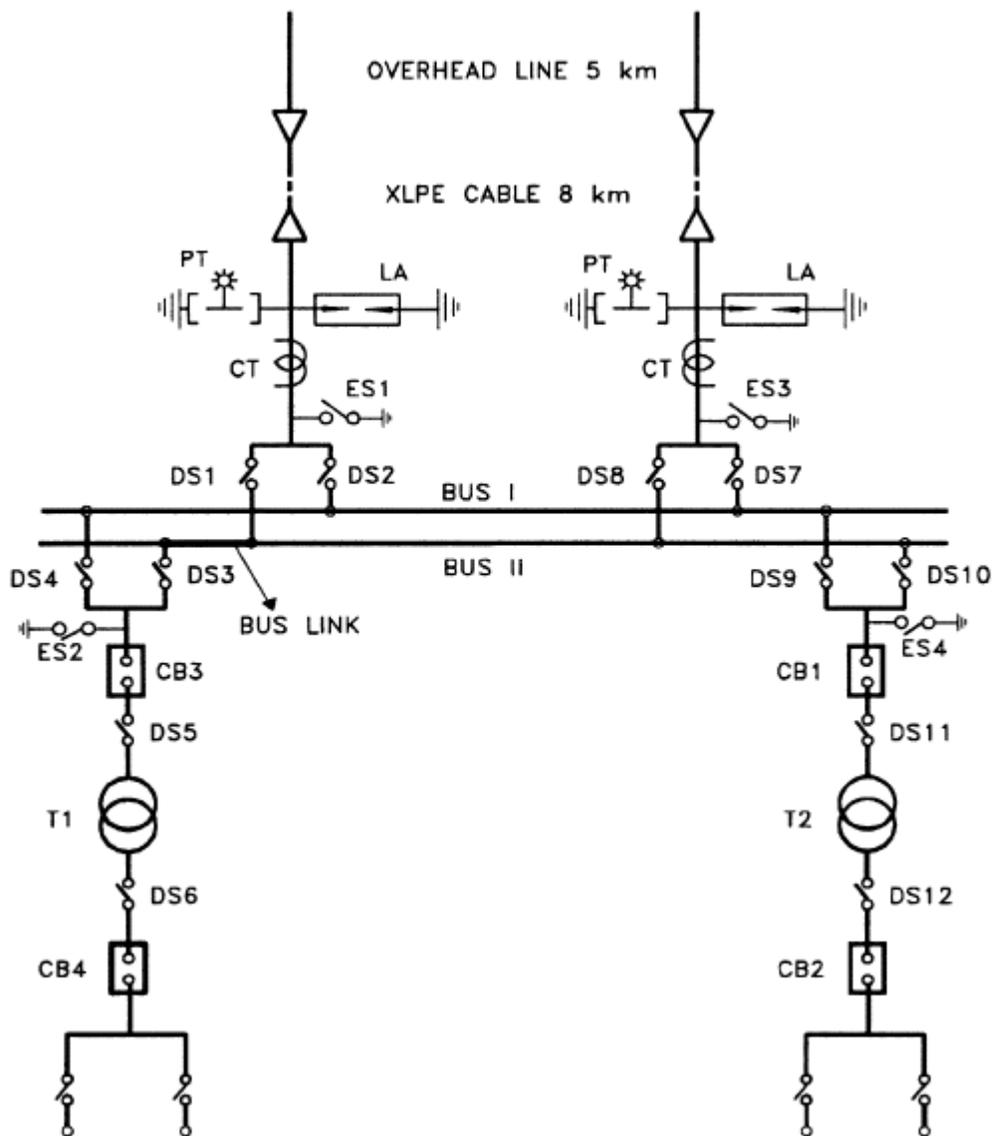


Figura 3.1. Diagrama unifilar de un GIS en SF₆.

La tabla 3.3 proporciona una representación eléctrica equivalente de varios componentes de la GIS.

Tabla 3.3. Representación equivalente de los componentes de un GIS

COMPONENTE	REPRESENTACIÓN ELÉCTRICA EQUIVALENTE
Espaciador	Capacitancia de 15pF hacia tierra
Terminaciones abiertas	Capacitancia de 15pF hacia tierra
(ES) Cuchilla a tierra	Capacitancia de 45pF hacia tierra
(CT) Transformador de corriente	Línea de transmisión con impedancia de 70Ω y una Capacitancia de 50pF hacia tierra
(PT) Transformador de potencial	Capacitancia de 100pF hacia tierra
(LA) Apartarrayos	Capacitancia de 200pF hacia tierra
(DS) Seccionador	Línea de transmisión con impedancia de 70Ω y una capacitancia de 30pF hacia tierra en cada terminación de contacto. En condición abierta, una capacitancia de 30pF entre contactos
(CB) Interruptor	Línea de transmisión con impedancia de 46Ω y una capacitancia de 30pF hacia tierra en cada terminación de contacto. En condición abierta, una capacitancia de 50pF entre contacto
Bushing	Línea de transmisión con impedancia de 250Ω . Con capacitancia de 30pF hacia tierra en cada terminal del bushing
Cable XLPE	Línea de transmisión con impedancia de 30Ω y con velocidad de propagación de $150\text{m}/\mu\text{s}$. la terminación del es Cable es simulada con una capacitancia de 400pF hacia tierra
(T1) Transformador	Capacitancia de 2nF hacia tierra

3.4. ESQUEMA DEL MODELO DE LA RED ELÉCTRICA EQUIVALENTE DE LA GIS.

La figura 3.2 muestra la red eléctrica equivalente de una GIS a 245 kV durante una operación de cierre.

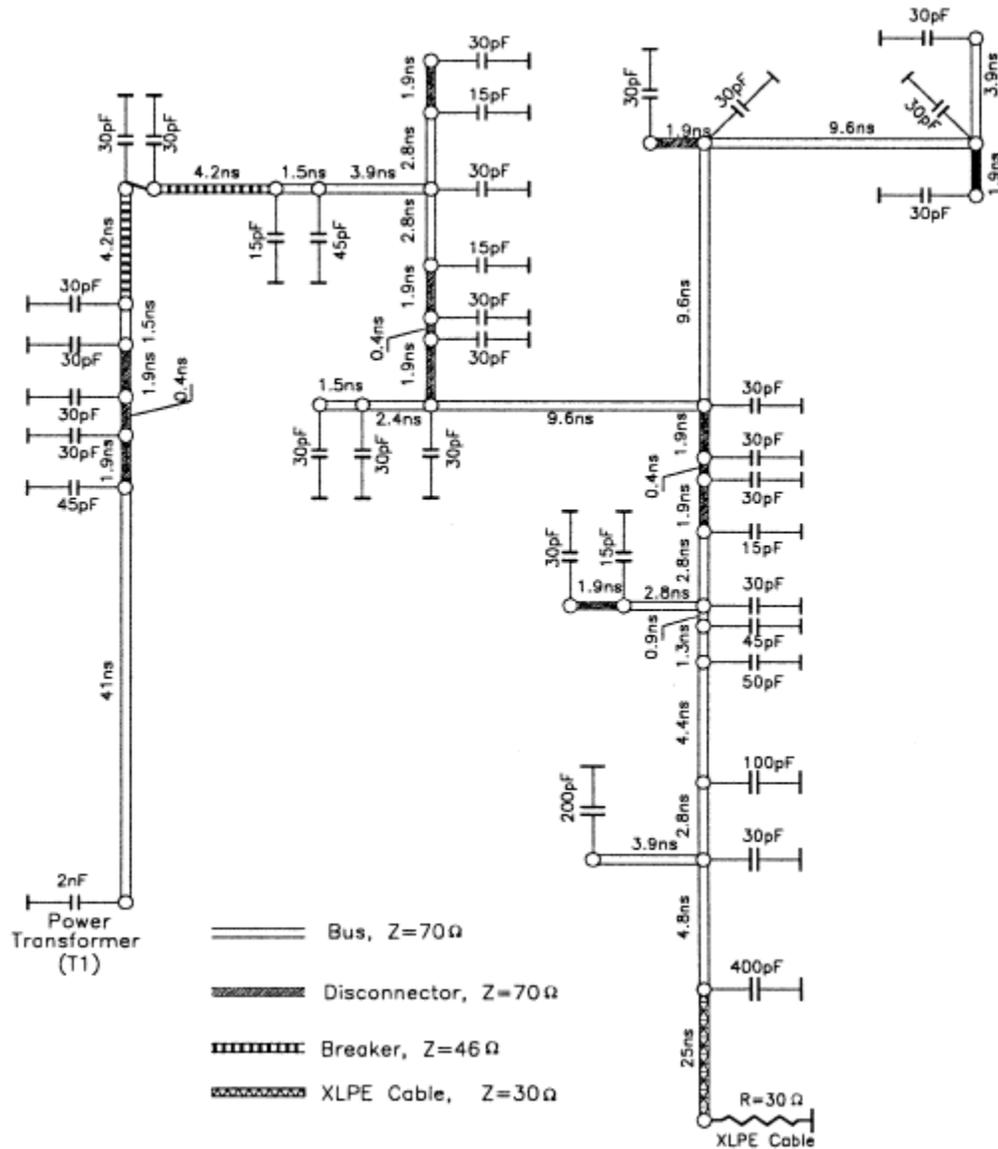


Figura 3.2. Red eléctrica equivalente de un GIS en SF₆ a 245kV.

3.5. MODELADO DE LOS COMPONENTES DE LA GIS EN EL SOFTWARE ATP-EMTP

Para la simulación de transitorios ultra-rápidos de sobre-corriente se utilizó el modelo de la GIS mostrado en la figura 3.2, para lo cual a continuación se definen cada uno de los elementos que componen esta subestación. Se comienza por definir la fuente de alimentación, la cual consta de un valor de 245 rms, por lo cual en el software ATP-DRAW utilizamos lo siguiente:

$$1p.u = 245kV * \sqrt{2} \tag{1}$$

Debido a que el software ATP-DRAW usa valores pico en la simulación. La fuente quedaría de la siguiente manera:

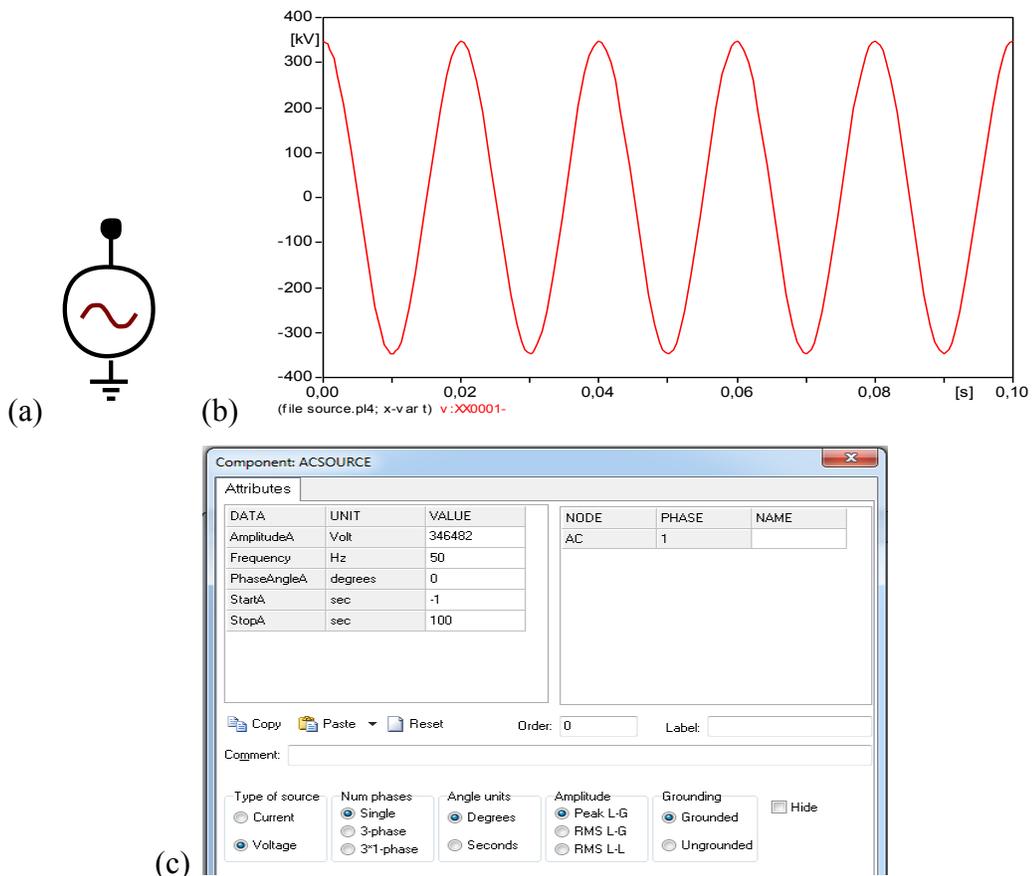


Figura 3.3. Modelado de la fuente (a) Fuente AC, (b) señal de voltaje de la fuente, (c) ventana de dialogo del componente.

En la figura 3.4 se muestra la representación eléctrica equivalente de un espaciador el cual se representa por una capacitancia de 15 pF conectado a tierra.

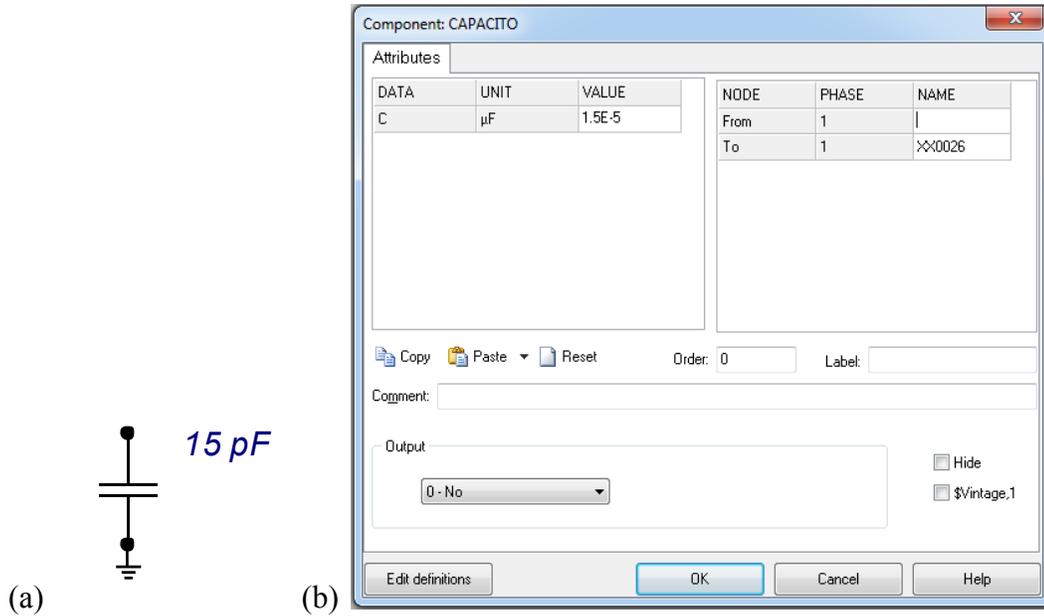


Figura 3.4. Modelado del espaciador (a) Capacitor, (b) ventana de dialogo del componente.

En la figura 3.5 es la representación eléctrica equivalente de un interruptor a tierra el cual se representa por una capacitancia de 45 pF conectado a tierra.

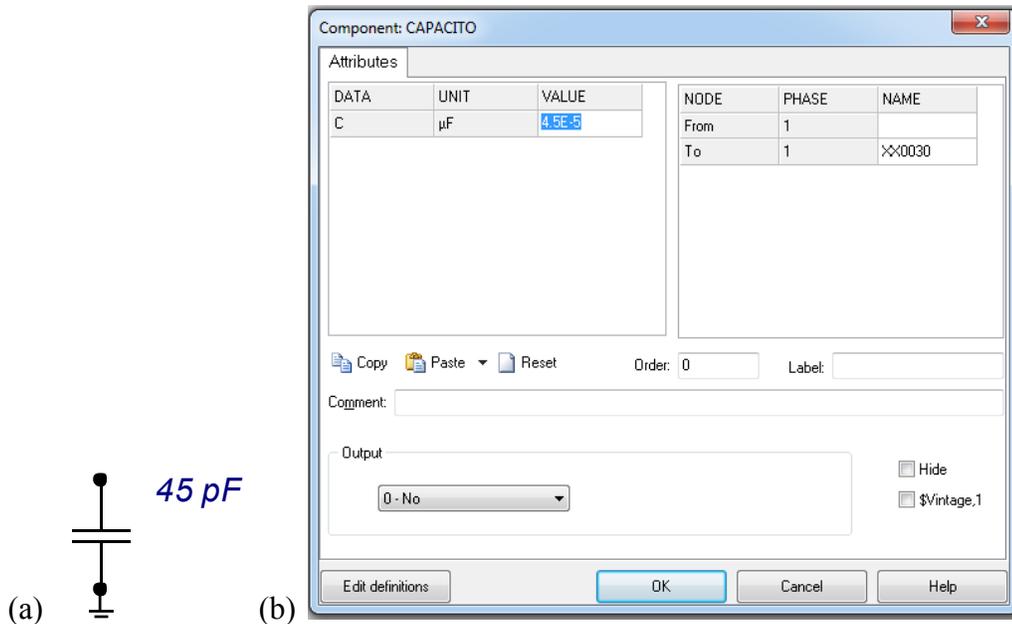


Figura 3.5 Modelado del interruptor a) Capacitor b) cuadro de dialogo del componente

La figura 3.6 es la representación eléctrica equivalente de un transformador de corriente (TC) el cual se representa por mediante de una impedancia de 70Ω y una capacitancia de 50 pF a tierra.

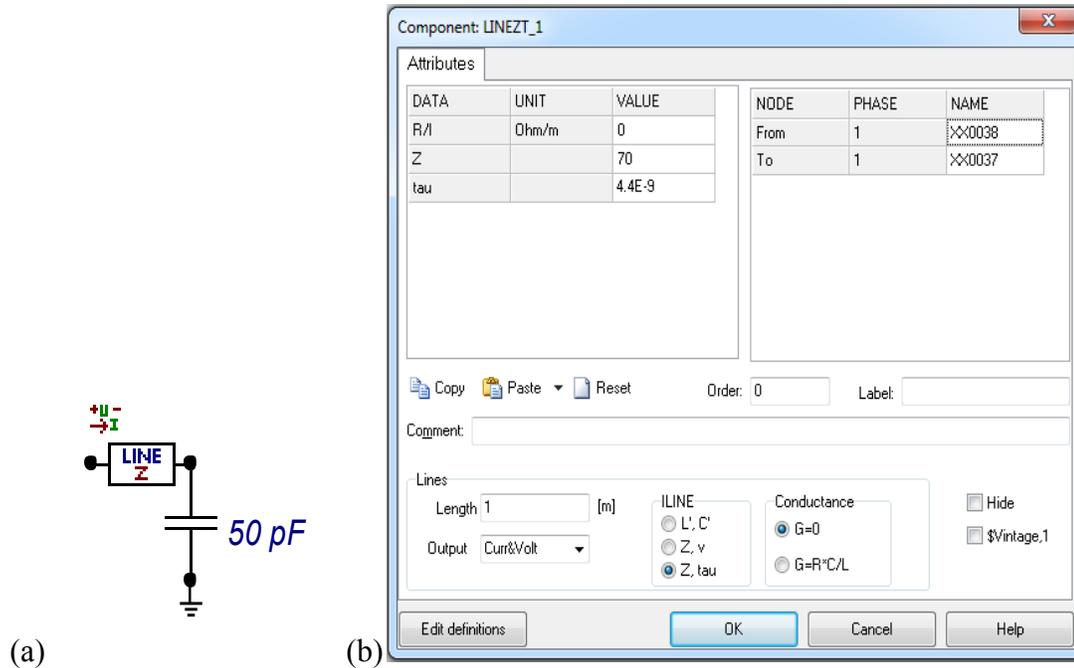


Figura 3.6 Modelado del TC a) Representación del TC b) cuadro de dialogo del componente

La representación eléctrica equivalente de un transformador de potencial (TP) es una capacitancia de 100 pF a tierra, la representación eléctrica de un apartarrayo es una capacitancia de 200 pF a tierra. La representación eléctrica de un seccionador (DS) es una línea de transmisión con una impedancia de 70Ω con capacitancias de 30 pF a tierra en cada uno de sus contactos, para el modelo del GIS utilizado se muestra la figura 3.7.

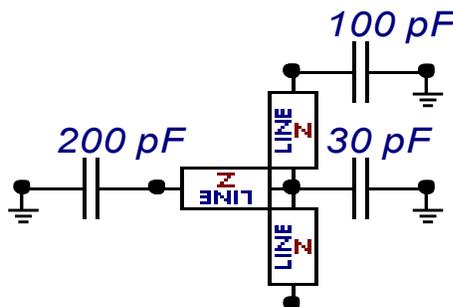


Figura 3.7 Representación equivalente del TP

Para la representación de un interruptor (CB) se utiliza una línea de transmisión con impedancia de 46Ω con capacitancias de 30 pF a tierra en las terminales de los contactos como se muestra en la figura 3.8

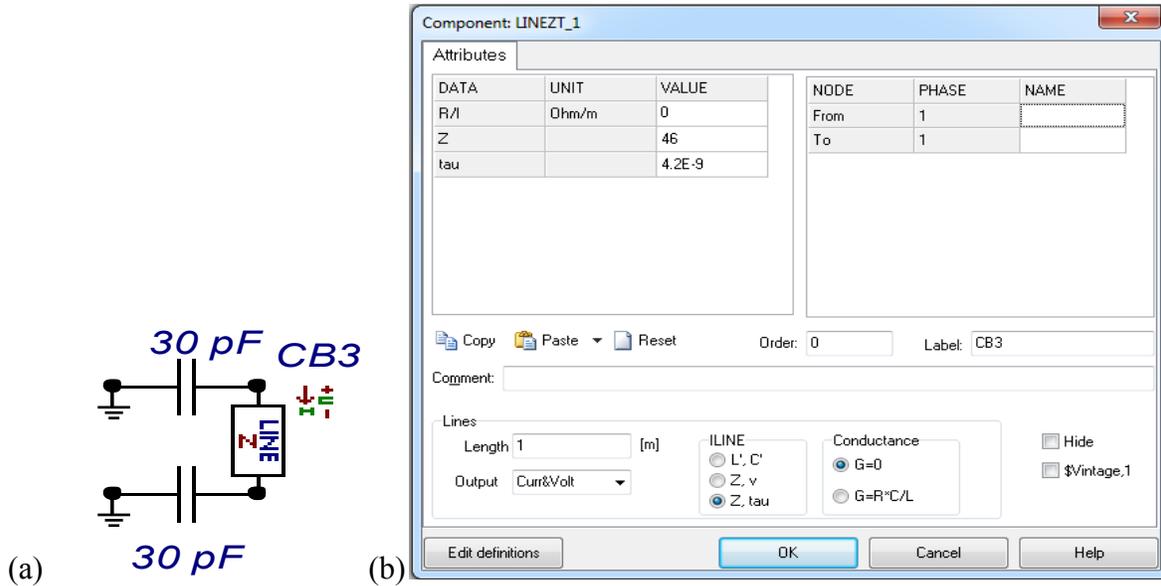


Figura 3.8 Modelado del CB a) Representación equivalente del CB b) ventana de dialogo del componente

La representación eléctrica del transformador T1 es una capacitancia de 2 nF a tierra, para la representación eléctrica de cable XLPE se utiliza una línea de transmisión con una impedancia de 30Ω a una velocidad de propagación de $150 \text{ m}/\mu\text{s}$, la terminación del cable es simulada con una capacitancia de 400 pF a tierra.

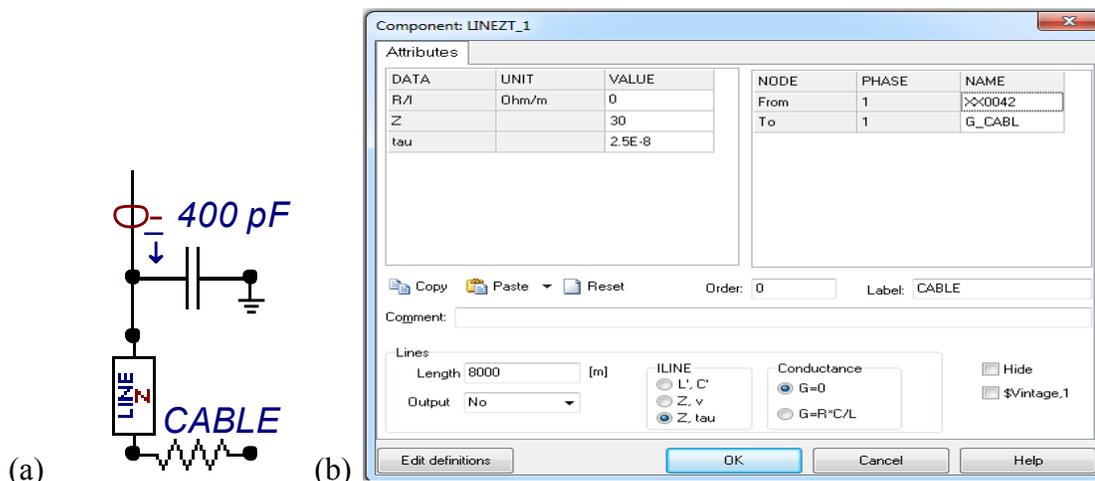


Figura 3.9 Modelado del T1 a) Representación equivalente de cable XLPE b) ventana de dialogo

3.6. MODELO FINAL EN ATP-EMTP DE LA GIS 245 KV

Para el desarrollo de modelo del GIS se utilizaron en conjunto estas representaciones eléctricas de los elementos del GIS, los cuales dieron como resultado el modelo final de la subestación que se utilizará para las simulaciones de transitorios.

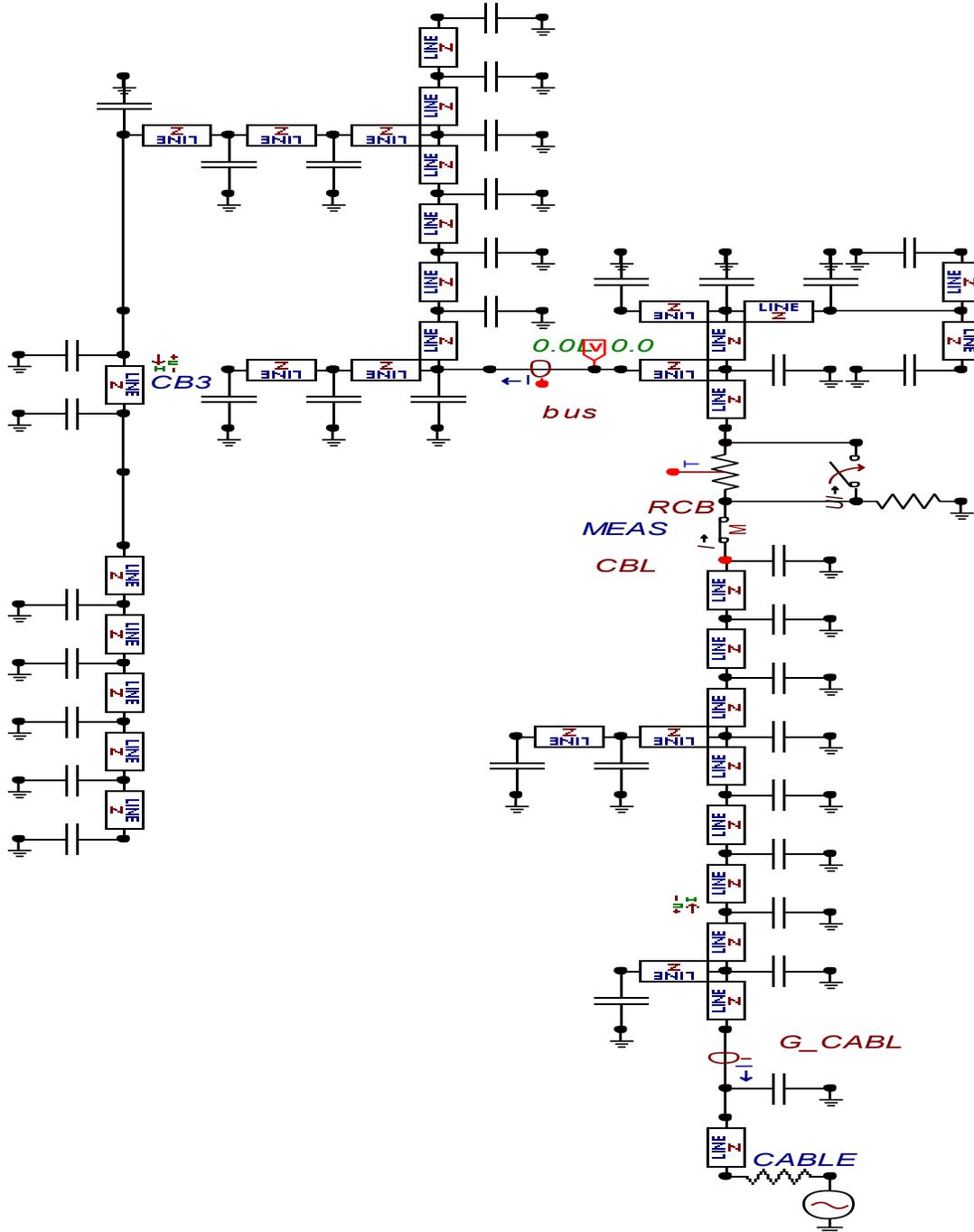


Figura 3.10 Modelo en ATP-DRAW de la subestación GIS a 245 kV

REFERENCIAS

- [1] More Accurate Modeling of Gas Insulated Substation Components in Digital Simulations of Very Fast Electromagnetic Transients. 1991 IEEE. Z.Haznadar, S. Carsímamovic.
- [2] Análisis, Simulación y Control de Transitorios Electromagnéticos en Subestaciones Aisladas en SF6 por Medio de Redes de Tierra. Tesis de Doctorado. Instituto Tecnológico de Morelia. Gastón Hernández Martínez. 2007
- [3] Simulación y Análisis de VFTC's en u GIS en SF6 a 245 kV y su Interacción con los Armónicos Provenientes de la Red de Distribución. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. José Alfonso Sánchez Cortez. Diciembre de 2008.

Capítulo

4

Modelos de arco eléctrico

En este capítulo se describe brevemente el fenómeno de arco eléctrico, sus orígenes y comportamiento, la teoría acerca de los diferentes modelos de arco eléctrico los cuales se implementarán posteriormente para la representación del fenómeno transitorio de sobrecorriente (VFTC's), así como también se mencionan otros modelos de arco eléctrico existentes.

4.1 NATURALEZA DEL ARCO ELECTRICO. [1]

Cuando un interruptor abre un circuito con carga o despeja una falla es inevitable la presencia del arco eléctrico, lo que sin duda es una condición desfavorable en la operación de los interruptores. Durante la presencia del arco se mantiene la circulación de corriente en el circuito de potencia. Las características del arco dependen entre otras cosas de:

- La naturaleza y presión del medio ambiente donde se induce.
- La presencia de agentes ionizantes o desionizantes.
- La tensión entre los contactos y su variación en el tiempo.
- La forma, separación y estructura química de los contactos.
- La forma y composición de la cámara de extinción.
- Sistema de extinción del arco.

La generación del arco se debe a la ionización del medio entre los contactos, haciéndolo conductor, lo que facilita la circulación de corriente. La presencia de iones se origina por la descomposición de las moléculas que conforman el medio entre los contactos, producto de colisiones entre éstas y los electrones aportados por la corriente. Se puede decir que la emisión de electrones desde la superficie de los contactos de un interruptor, se debe principalmente a:

- Aumento de temperatura, originando una emisión termo-iónica de electrones.

4.1.1. Re-Ignición del Arco Eléctrico. [2]

Una vez que la temperatura del medio permite la corriente post-arco, ocurre la re-ignición del arco que tiene dos posibles orígenes:

- a) Re-ignición térmica: debido a que existe ionización residual y elevada temperatura, las corrientes post-arco resurgen.

- b) Re-ignición dieléctrica: una vez abiertos los contactos, si existe tensión entre ellos y esta tensión es muy grande, el medio dieléctrico es incapaz de soportarla, lo cual causara una ruptura del medio aislante y su colapso.

Estos dos posibles orígenes de la re-ignición ocurren por lo regular dentro de los primeros microsegundos posteriores a que la corriente pasa por cero.

4.1.2. Re-Encendido del Arco Eléctrico. [2]

Una vez que la corriente del arco eléctrico pasa por cero, comienza la recuperación tanto de la tensión como de las propiedades del medio aislante. Por lo que se inicia una carrera para restablecer los valores dieléctricos del medio y la (TTR), si el proceso de restablecimiento del arco ocurre después de cuatro ciclos posteriores a la extinción del arco se le llamará re-encendido del arco.

La TTR es la tensión que el circuito impone entre los contactos del interruptor, para que una apertura de un interruptor de potencia sea considerada un éxito, necesitan tomar en cuenta que la TTR debe ser menor a cierto valor para que el medio aislante pueda detener y evitar que exista un re-encendido del arco.

El arco eléctrico generalmente puede ser dividido en tres regiones: la columna del arco, la región anódica y la región catódica, como se indica en la figura 4.1. 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 4.2 se muestra 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).

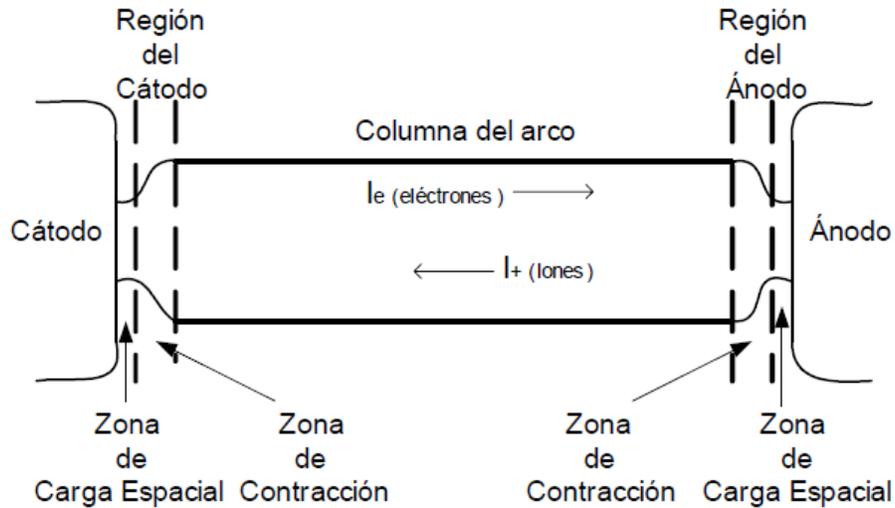


Figura 4.1. Diagrama esquemático de las diferentes regiones en una columna de arco uniforme.

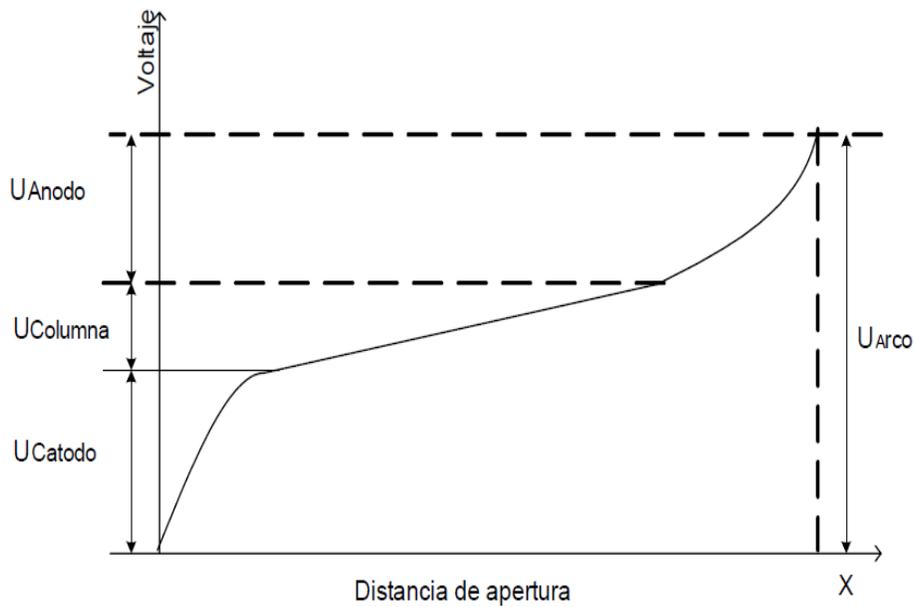


Figura 4.2 Distribución de potencial en el arco.

4.1.3. Columna del arco [3]

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. [3]

4.1.4. Características del arco [3]

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.

4.2. MODELOS DE ARCO ELÉCTRICO [3]

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.

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. [3]

4.2.1. 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 4.3. Los valores respectivos por unidad de longitud de acuerdo a Cassie son: [3]

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

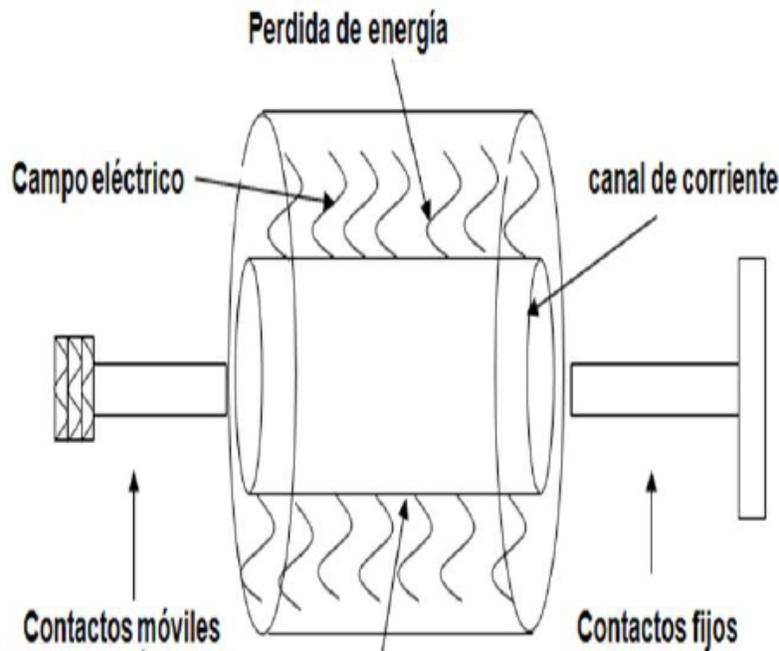


Figura 4.3. Columna de arco eléctrico propuesto por Cassie.

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

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

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)

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G_0}{Q_0} \left(P_{in} - P_0 \frac{Q}{Q_0} \right) \quad (4.11)$$

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

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

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:

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

La ecuación (4.14) es la ecuación de Cassie, donde: $\theta = \frac{Q_0}{P_0}$ se conoce como la constante de tiempo. La variable θ tiene unidades de tiempo e indica cuánto 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:

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

Una solución a (4.15) sería:

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

Como se puede observar, sin un voltaje de arco, la conductancia decae exponencialmente de su valor inicial G_0 con una constante de tiempo θ .

El modelo de Cassie es aplicable a la simulación del comportamiento del arco a corrientes relativamente altas (del orden de 100 A-100kA) para las cuales la temperatura del plasma de arco es muy alta (en el orden de 8000° K o más). De la ecuación 4.1 se despeja con respecto al voltaje y se sustituye en la ecuación de Cassie (4.14).

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

4.2.2. 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 4.4). 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. [3]

$$G = Ke^{\left(\frac{Q}{\theta_0}\right)} \quad (4.18)$$

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

$$P_{out} = P_0 \quad (4.19)$$

Y definiendo la potencia de entrada como:

$$P_{in} = vi \quad (4.20)$$

Se obtiene de (4.2) la ecuación de Mayr:

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{vi}{P_0} - 1 \right) \quad (4.21)$$

Donde, al igual que en el modelo de Cassie, la constante de tiempo está dada por

$$\theta = \frac{Q_0}{P_0}$$

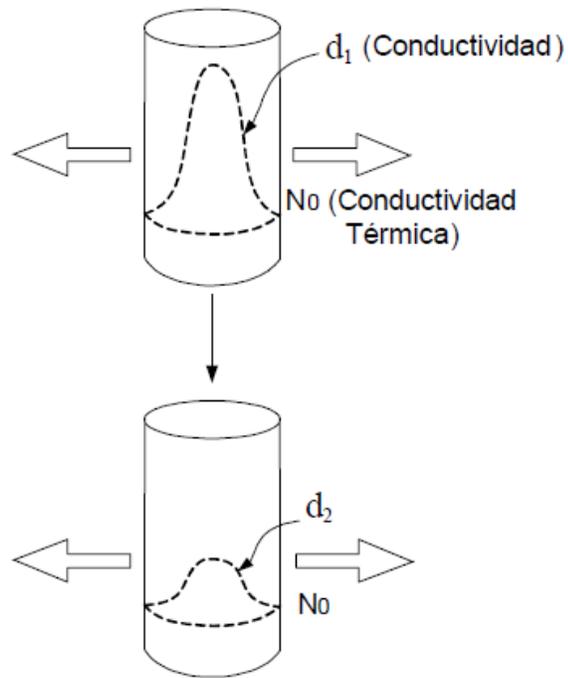


Figura 4.4. Columna de arco eléctrico propuesta por Mayr.

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

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = -\frac{1}{\theta} \quad (4.22)$$

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

$$G = G_0 e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (4.23)$$

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 θ .

4.2.3 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 4.4. Se tiene:

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_C} + \frac{1}{G_M} \quad (4.24)$$

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 [3].

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 mostrará en el capítulo 5.

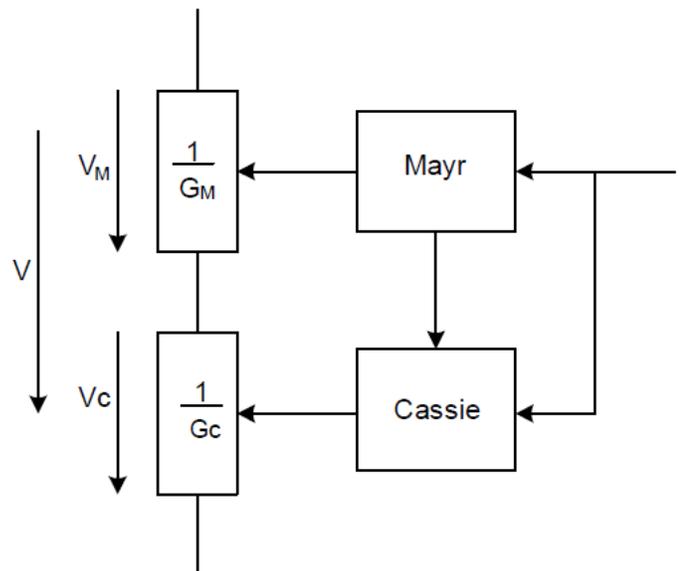


Figura 4.5 Diagrama del Modelo Mayr-Cassie.

Tabla 4.1 Características principales del modelo de Mayr y Cassie.

Característica	Mayr	Cassie
Densidad de corriente	Variable con la distancia al centro del arco	Constante
Temperatura	Variable y proporcional a la densidad de corriente	Constante
Sección transversal	Constante	Función de la corriente
Conductancia	Función de la energía almacenada	Proporcional a la sección transversal
Transferencia de calor	Conducción	Convección
Fórmula	$\frac{dG}{dt} = \frac{G}{\theta} \left[\frac{vi}{P_0} - 1 \right]$	$\frac{dG}{dt} = \frac{G}{\theta} \left[\left(\frac{V}{V_0} \right)^2 - 1 \right]$
Apto para representar	Pequeñas corrientes (corrientes menores a 100 A)	Grandes corrientes (corrientes mayores a 100 kA)

De la comparación de estos dos modelos de arco podemos observar que cuentan con parámetros característicos tales como: [4]

Θ y P_0 , para el modelo de Mayr

Θ y E_0 , para el modelo de Cassie

4.2.4 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 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 4.6(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 4.6 (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. [3]

$$g = \int \left(\frac{i^2(t)}{P(R)\theta(R)} - \frac{g}{\theta(R)} \right) dt \quad (4.25)$$

$$R = \int \left(\frac{R}{\theta(R)} - \frac{v^2}{P(R)\theta(R)} \right) dt \quad (4.26)$$

Despejando $\theta(R)$ en las ecuaciones

$$g = \frac{1}{\theta(R)} \int \left(\frac{i^2(t)}{P(R)} - g \right) dt \quad (4.27)$$

$$R = \frac{1}{\theta(R)} \int \left(R - \frac{v^2}{P(R)} \right) dt \quad (4.28)$$

Donde:

$i(t)$ = corriente de arco

$v(t)$ = voltaje

g = conductividad

R = resistencia

$\theta(R)$ = constante de tiempo

$P(R)$ = pérdidas de potencia

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

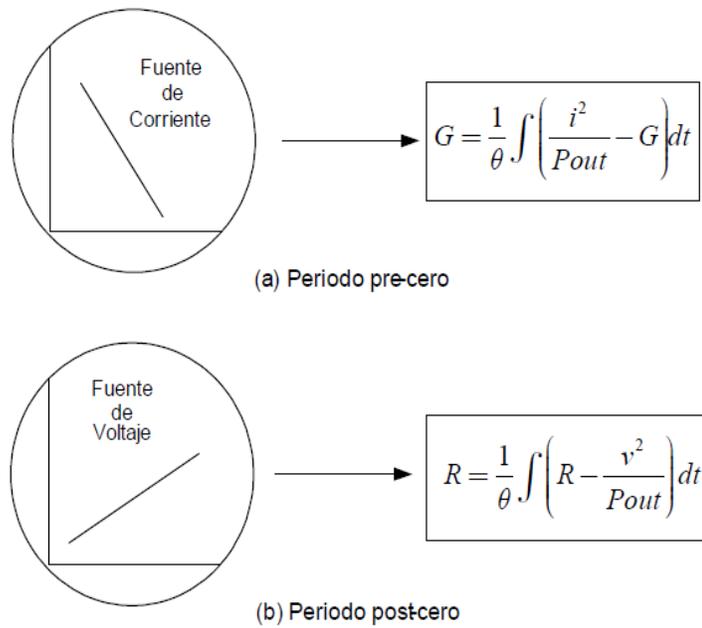


Figura 4.6 Evaluación de periodos del modelo general para la ecuación de Mayr.

En la figura 4.7 se muestra un esquema del modelo de arco general el cual da una idea de cómo son tomados los valores provenientes de la red y como serán introducidos al modelo en TACS.

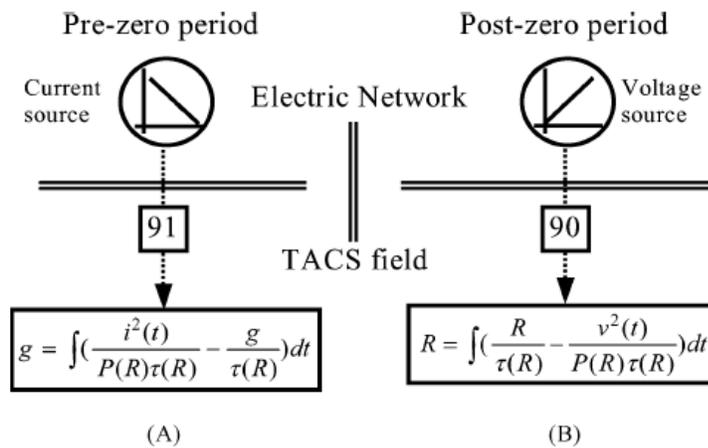


Figura 4.7 Esquema representativo del modelo de arco general

4.3 OTROS MODELOS [5]

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, el cual incluye régimen de ruptura dieléctrica [2]. 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.

4.3.1 Modelo de Hochrainer

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

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G^* - G}{\theta} \quad (4.29)$$

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]

4.3.2 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 $P(G)$, esto es:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G}{\tau(G)} \left(\frac{W}{P(G)} - 1 \right) \quad (4.30)$$

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 Urbeanek o Avdonin [4].

4.3.4 Modelo de KEMA [6]

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 [4].

Los parámetros de cada sub modelos son una constante de tiempo $T_i[s]$, una cantidad $\Pi_i[A^{\lambda-1} V^{3-\lambda}]$ relacionado a las pérdidas de potencia y a un parámetro de modelo dimensional λ_i .

El modelo de la ecuación es:

$$\frac{dG_i}{dt} = \frac{1}{\Pi_i T_i} G_i^{\lambda_i} U_i^2 - \frac{1}{T_i} G_i \quad i = 1, 2 \text{ y } 3 \quad (4.31)$$

Donde G_i es la conductancia y U_i es el voltaje de arco de submodelo i . Si $\lambda=2$, el modelo de la ecuación cambia al modelo clásico de Mayr con $\Pi=P_0$ [W] como la constante de potencia de pérdida. Si $\lambda=1$, la ecuación es el modelo de Cassie y $\Pi=U_0^2$ [V] como el voltaje de arco inicial. [6]

La corriente I . Voltaje U y la conductancia G son descritas por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{G} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{G_i} \quad (4.32)$$

$$U = \sum_{i=1}^3 U_i \quad (4.33)$$

$$I = U \cdot G \quad (4.34)$$

REFERENCIAS

- [1] Simulación Digital de Interruptores de Potencia en Gas SF₆ en Estado Transitorio. Tesis de Ingeniería. José Antonio Aguilar de la Rosa, Diego A. Aristeo J., Claudia P. Cordero J. México, DF. Junio.

- [4] Simulación de Interruptores de Potencia con Gas SF₆ en ATPDraw. Tesis de Ingeniería. Ing. Juan Hiram Cuacuas Gutiérrez. Instituto Politécnico Nacional. México, DF, 2010.

- [3] Implementación de Modelos de Arco Eléctrico Para Simulación de Interruptores de Potencia en el EMTP. Tesis de Maestría. Ing. Jahel Hernández Ángeles. Instituto Politécnico Nacional. México, DF, Diciembre, 2006.

- [4] Modelización de Interruptores Eléctricos de Potencia. Tesis Doctoral. Walter Fernando Giménez Gutiérrez. Universidad Politécnica de Cataluña, Septiembre, 1999.

- [5] Descripción Teórica y Análisis de Fallas de Arco, Mediante un Modelo Adecuado, con el Propósito de Determinar su Efecto en Líneas de Transmisión. Tesis de Ingeniería. David Cubillos Rodríguez. Universidad de la Salle Facultad de Ingeniería Eléctrica. Bogotá, 2008.

- [6] Evaluation and Simulation of Black-Box Arc Models for High-Voltage Circuit-Breakers. Master Thesis. Niklas Gustavsson. Linkopings Universitet, 2004, Sweden.

Capítulo

5

Implementación y simulación de modelos de arco eléctrico en la GIS a 245 kV.

En este capítulo se lleva a cabo la implementación y simulación de los cuatro modelos de arco eléctrico (Cassie, Mayr, Cassie-Mayr y Modelo general), así mismo se muestran las graficas correspondientes a cada una de las simulaciones, las cuales se describirán más adelante, y así comprobar si el transitorio de sobrecorriente puede ser observado mediante la implementación de estos modelos de arco.

Otro de los propósitos importantes dentro de las simulaciones, es analizar el espectro de frecuencia del VFTC, el cual también es obtenido en este capítulo.

5.1. IMPLEMENTACION DE LOS MODELOS DE ARCO ELECTRICO EN TACS.

De las ecuaciones (4.17), (4.21), (4.24), (4.25) y (4.26) de los modelos matemáticos obtenidos en el capítulo anterior, ahora se llevarán al dominio de Laplace para posteriormente poder usarlas en la herramienta de bloques lógicos TACS (Transien Analysis Control Systems) que es una herramienta del software ATP-DRAW.

5.1.1. Modelo matemático de Cassie implementado en TACS

Como se mencionó anteriormente para la implementación de los modelos matemáticos se necesita la ecuación del modelo expresado en el dominio de Laplace, debido a que es la manera en la que se puede hacer uso de la herramienta TACS y construir el modelo de arco.

Tomando la ecuación 4.17 de la cual se despeja la conductancia.

$$\frac{dG}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{i^2}{GV_0^2} - G \right) \quad (5.1)$$

Aplicando el operador de Laplace a la ecuación (5.1)

$$sG(s) - g(0) = \frac{1}{\theta} \left(\frac{i^2(s)}{G(s)V_0^2} - G(s) \right) \quad (5.2)$$

Donde $g(0)$ se hace igual a cero, y despejando θ queda entonces:

$$\theta sG(s) = \frac{i^2(s)}{G(s)V_0^2} - G(s) \quad (5.3)$$

Ahora se despeja $G(s)$ y se factoriza en el otro lado de la ecuación

$$G^2(s)[\theta s + 1] = \frac{i^2(s)}{V_0^2} \quad (5.4)$$

A continuación se muestra la ecuación correspondiente al modelo matemático de Cassie, que está en función de la conductancia.

$$G^2 = \frac{i^2}{V_0^2} \left(\frac{1}{1 + \theta s} \right) \quad (5.5)$$

Con (5.5) expresada de esta forma es posible representarla mediante un diagrama de bloques como los muestra la Figura. 5.1, el cual permitirá construir el modelo de arco con los diferentes componentes TACS, dando como resultado la obtención de la resistencia de arco que es la inversa de la conductancia.

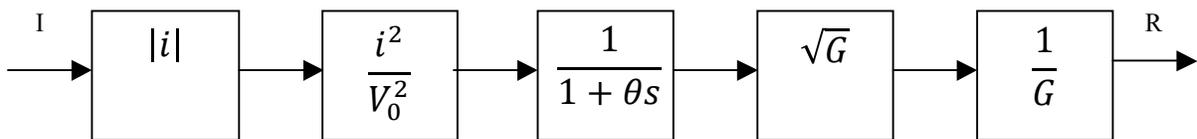


Figura 5.1 Diagrama de bloques del modelo de Cassie.

De esta manera será más fácil incorporar la ecuación del modelo matemático por bloques mediante los diferentes elementos TACS (ver apéndice A.2), dando como resultado el modelo de arco eléctrico que se quiere representar.

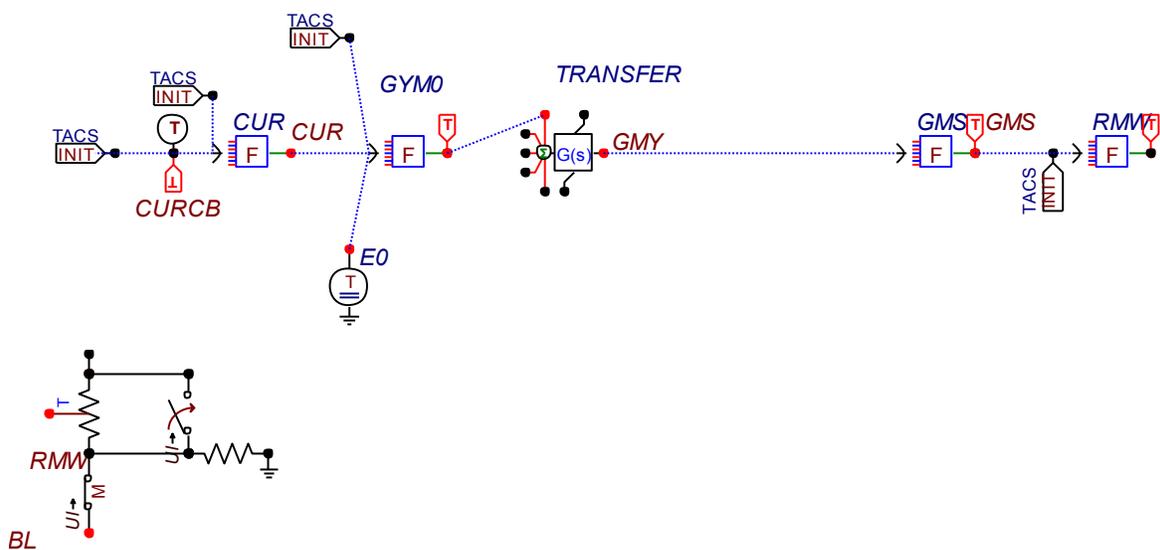


Figura 5.2 Modelo de arco de Cassie representado en TACS

De la figura 5.2 podemos observar el modelo de arco ya construido en TACS, en el cual cada bloque representa una parte de la ecuación. Para poder integrar el modelo de arco con el modelo de la subestación es necesario utilizar una resistencia TAC la cual integrará al circuito la resistencia obtenida del modelo.

5.1.2. Modelo matemático de Mayr implementado en TACS

De la misma manera en la cual se implementó el modelo de Cassie ahora se llevará acabo el mismo proceso para la implementación del modelo de Mayr, partiendo de la ecuación (4.21) y despejando la conductancia G tenemos que:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{i^2}{P_0} - G \right) \quad (5.6)$$

Aplicando el operador de Laplace a la ecuación 5.6 y despejando θ :

$$sG(s) - g(0) = \frac{1}{\theta} \left[\frac{i^2(s)}{P_0} - G(s) \right] \quad (5.7)$$

Donde $g(0)$ es igual a cero

$$\theta sG(s) = \frac{i^2(s)}{P_0} - G(s) \quad (5.8)$$

En este paso se factoriza $G(s)$

$$G(s)[\theta s + 1] = \frac{i^2(s)}{P_0} \quad (5.9)$$

Finalmente se tiene la ecuación en el dominio de Laplace en función de la conductancia G

$$G = \frac{i^2}{P_0} \left(\frac{1}{1 + \theta s} \right) \quad (5.10)$$

5.1.3. Modelo combinado Cassie-Mayr implementado en TACS

Para este modelo de arco se utilizan las ecuaciones de Cassie y Mayr, las cuales combinan las características de cada modelo matemático antes mencionadas en el capítulo 4, con el fin de representar una región más amplia de corriente.

La manera en la cual se emplean estos dos modelos matemáticos es conectando en serie las resistencias de arco de cada modelo.

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_c} + \frac{1}{G_m} \quad (5.11)$$

Donde

G_c = conductancia de arco de Cassie

G_m =Conductancia de arco de Mayr

En la figura 4.4 se muestra el diagrama de bloques del modelo combinado Cassie-Mayr, el cual da una idea general de cómo se lleva a cabo la construcción de este modelo y a continuación en la figura 5.5 se muestra el modelo de arco realizado en TACS.

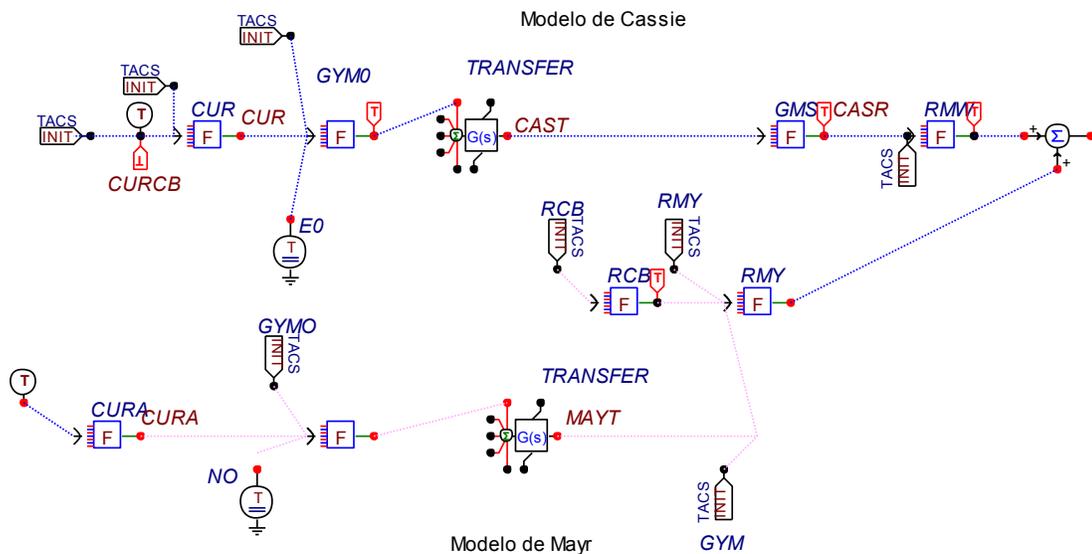


Figura 5.5 Modelo combinado Cassie-Mayr modelado en TACS

5.1.4. Modelo de arco general implementado en TACS

Para la implementación de este modelo de arco primeramente se generan dos señales de control las cuales se modelan a través de bloques lógicos de FORTAN, esto con el fin de distinguir los periodos pre y post cruce por cero de la corriente los cuales son fundamentales para este modelo de arco.

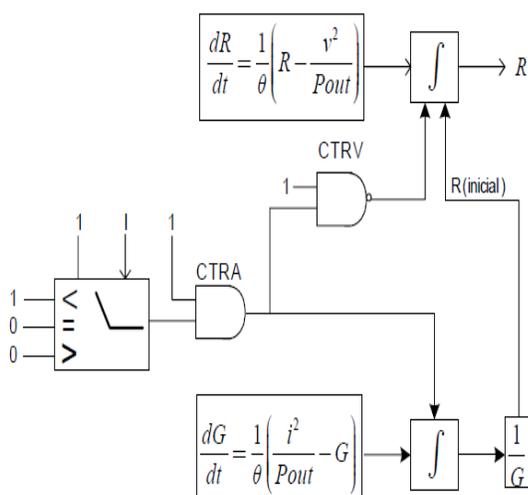


Figura 5.6 Bloques lógicos FORTAN del modelo general de arco

El esquema anterior de la figura 5.6 muestra los elementos principales que formarán el modelo general de arco. En los intervalos pre cruce por cero, la señal CTRA es relativamente alta mientras la corriente se encuentra en un periodo anterior al cruce por cero, por otro lado la señal de control CTRV se encuentra en un valor igual a cero. Es así como la conductancia pre-cero es calculada.

Sin embargo en los periodos post cruce por cero de la corriente, la señal CTRV es alta y la CTRA es baja, es decir, la parte de control CTRA es desactivada e inmediatamente la parte de control CTRV se activa y la resistencia de post-cero es calculada, utilizando el último valor calculado en la etapa anterior como condición inicial.

En la figura 5.7 se muestra la implementación en TACS del modelo general de arco eléctrico.

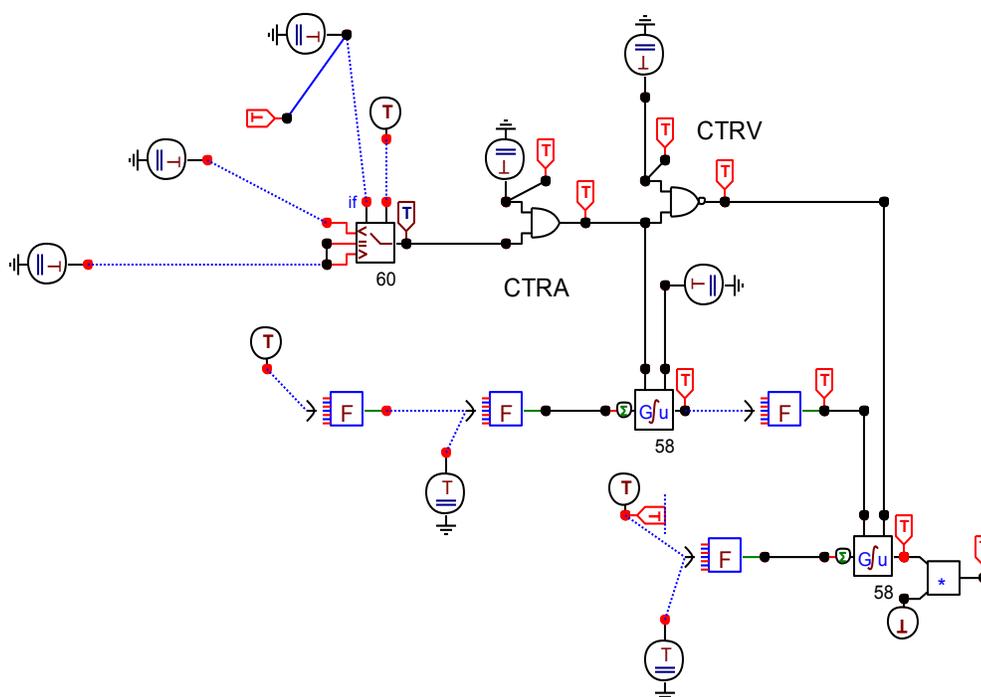


Figura 5.7 Modelo de arco general implementado en TACS

Al igual que en los modelos anteriores se utilizaron elementos de la librería TACS solo que para la construcción de este modelo fueron necesarios un par de elementos más, tales como: *controlled integrator*, *input-if component*, *AND logic operator* y *NAND logic operator*; Los cuales son fundamentales en la dinámica de las señales de control anteriormente descritas.

A continuación en la figura 5.8 se muestra la condicional de estado o *input-if component* (Device 60); la cual sirve para comparar la corriente de arco con un valor cero y así determinar los periodos pre y post cruce para que posteriormente sea enviada esta señal a las compuertas lógicas (AND y NAND) y así generar las señales de control CTRA y CTRV.

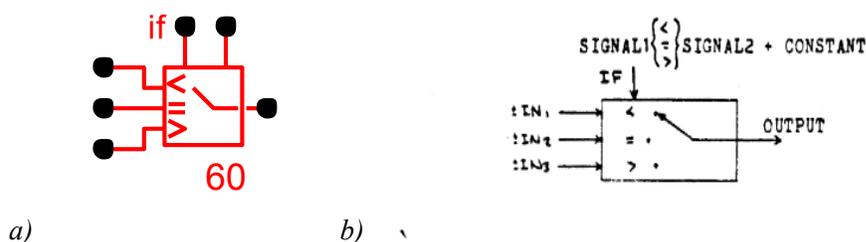


Figura 5.8 Icono en ATP del input-if component b) esquema del input-if component

En la figura 5.9 se muestra otro de los elementos importantes en la implementación de este modelo es el *controlled integrator* o integrador controlador (Device 58), el cual toma la señal proveniente ya sea de CTRA o CTRV para el cálculo de la conductividad de arco.

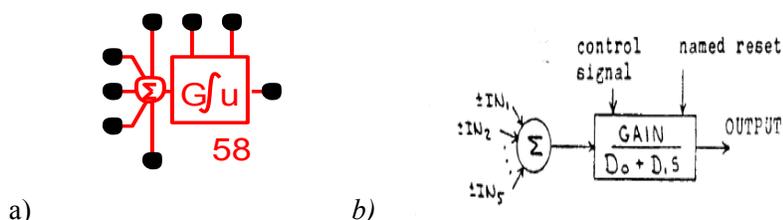


Figura 5.9 a) ícono en ATP del controlled integrator b) esquema del controlled integrator.

5.2. OPERACIONES DE SIMULACIÓN DE CIERRE DE INTERRUPTORES

Una vez que se tienen construidos los modelos de arco e incorporados al modelo de la subestación el siguiente paso es la simulación de transitorios de sobre-corriente para lo cual se consideran las siguientes operaciones de cierre de interruptores.

- 1) SW 1 Operación de cierre de seccionador DS1 cuando DS3 y CB3 están abiertos
- 2) SW 2 Operación de cierre del seccionador DS3 cuando el interruptor CB3 está abierto
- 3) SW3 Operación de cierre de CB3 cuando el seccionador DS6 está abierto

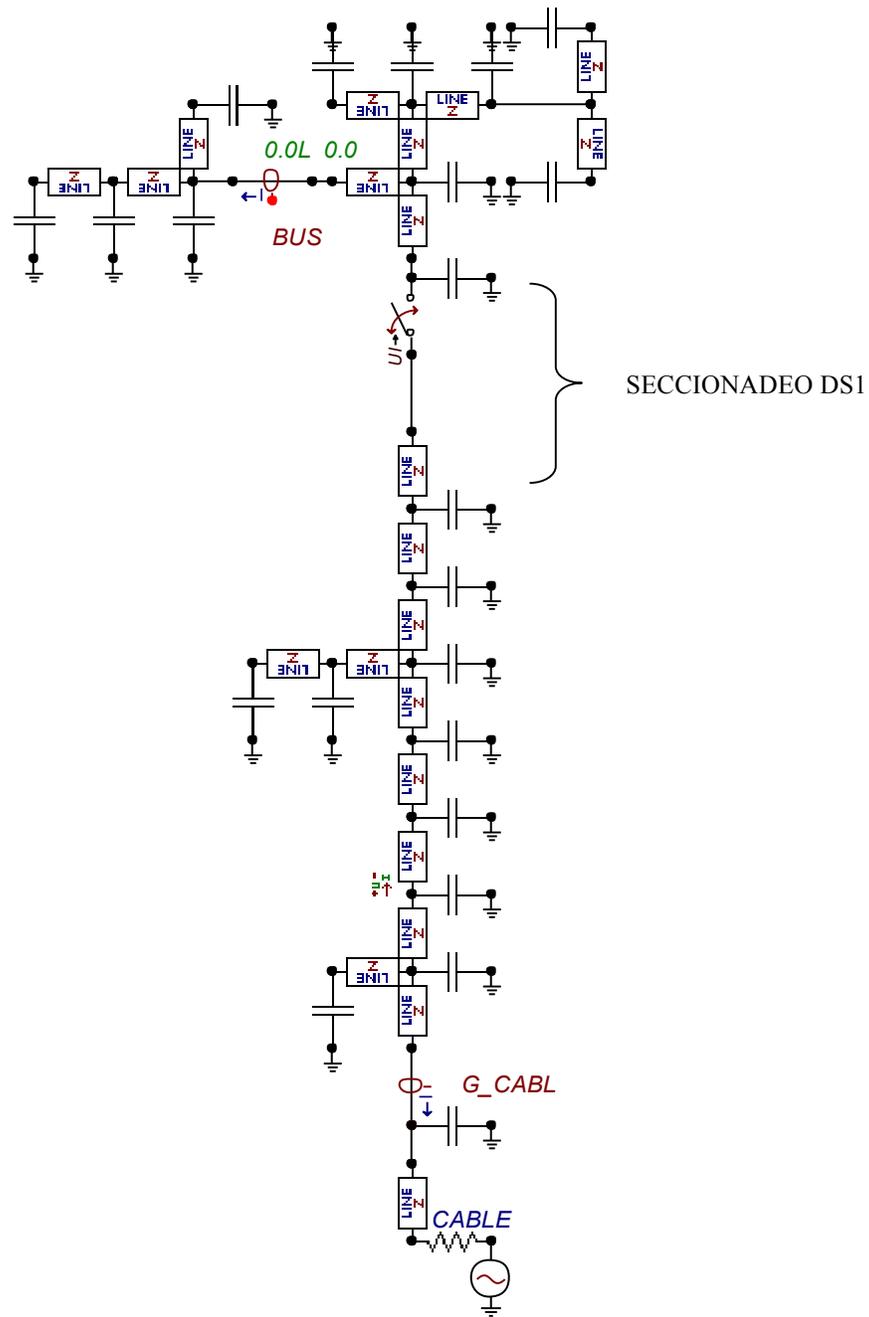


Figura 5.11 Modelo de la GIS en ATP-DRAW para SW1

Con ayuda de un interruptor ideal “Time-controlled switch with RECLOSE option” se realiza la simulación en la cual se pueden observar los transitorios (VFTO y VFTC) en algunos puntos importantes de la subestación.

A continuación en las figuras 5.12 y 5.13 se muestran las gráficas de voltaje y corriente en el interruptor al momento del cierre; en las cuales podremos observar el comportamiento de los transitorios.

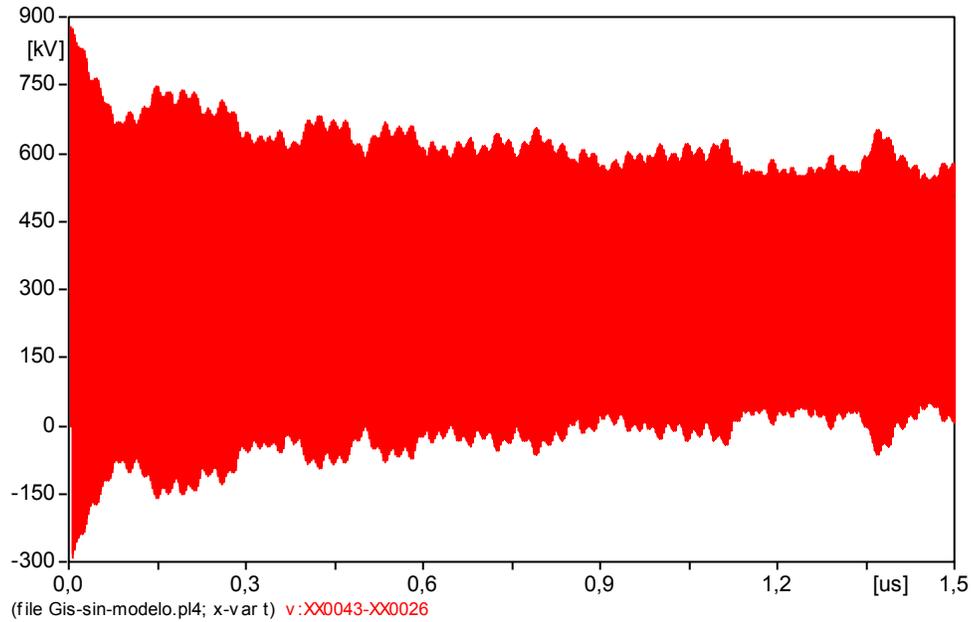


Figura 5.12 Gráfica de voltaje en el interruptor durante la operación de cierre.

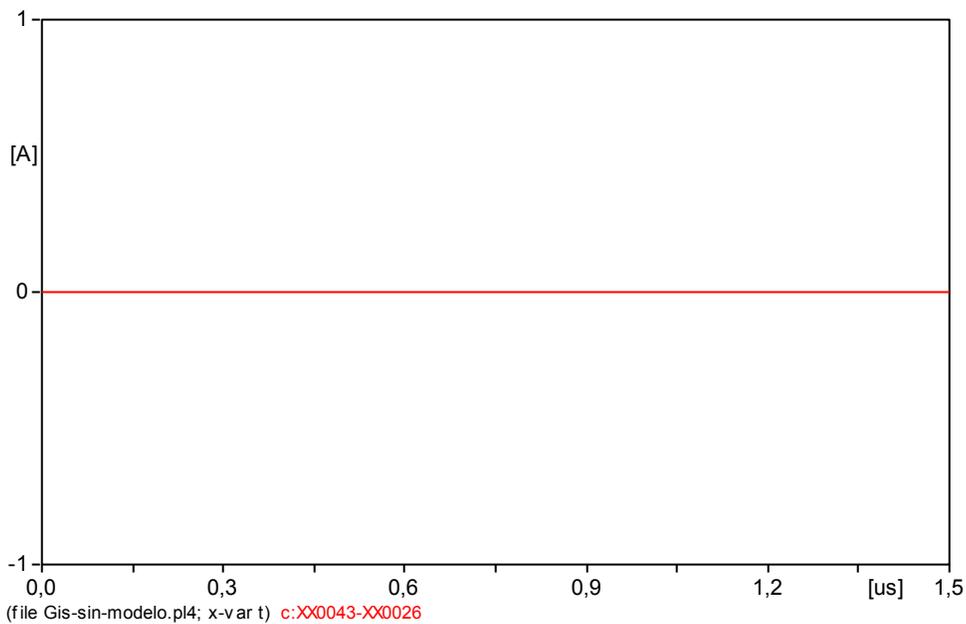


Figura 5.13 Gráfica de corriente en el interruptor durante la operación de cierre

Otros puntos importantes a observar dentro de la GIS son: la unión GIS-cable, el transformador de corriente (TC) y el bus link. En donde se analizan las gráficas y los valores de corriente que existen en dichos componentes.

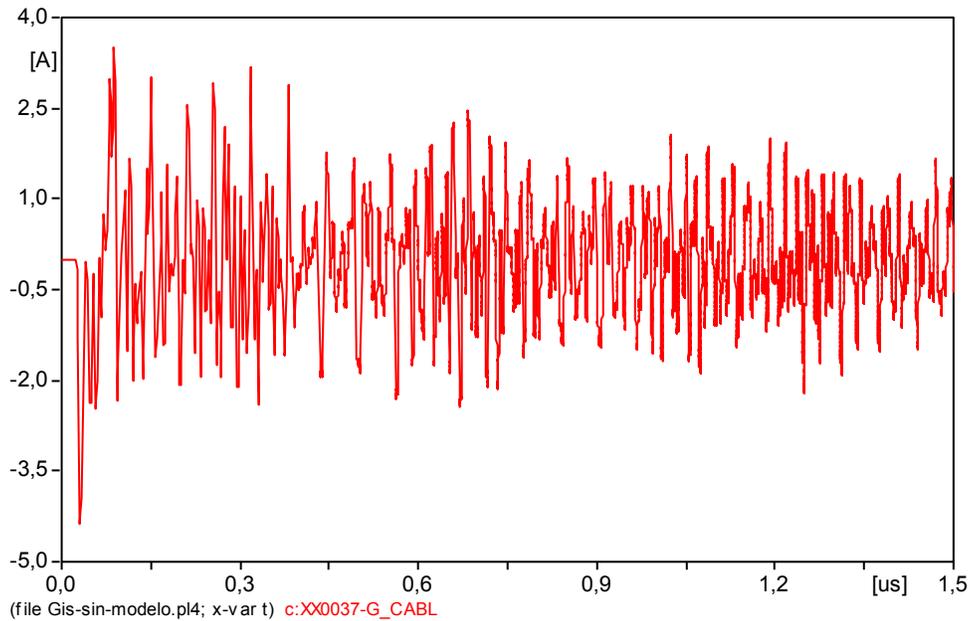


Figura 5.14 Gráfica de corriente en la unión GIS-cable para SW1 sin incluir el modelo de arco

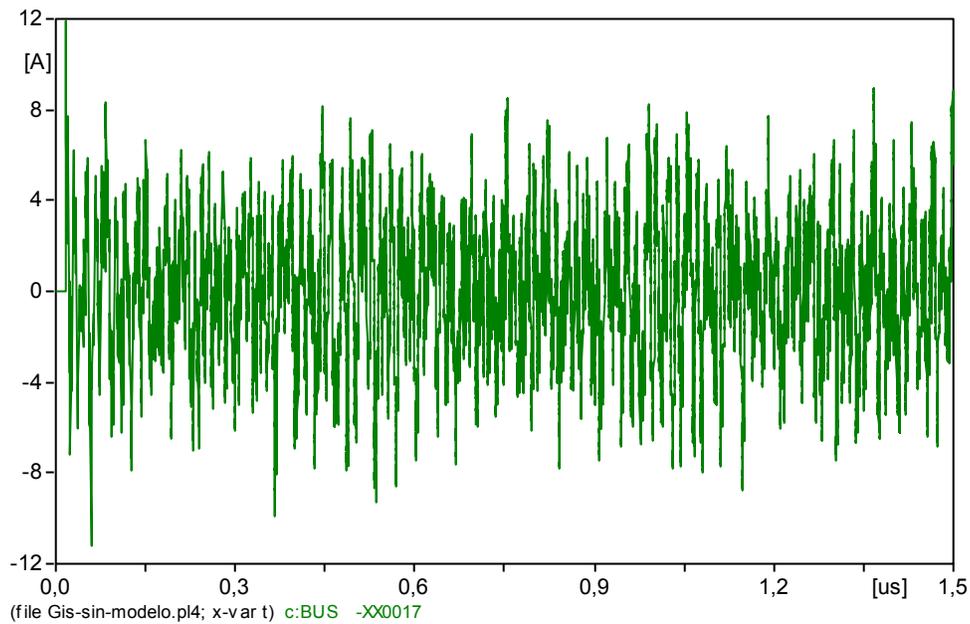


Figura 5.15 Gráfica de corriente en el bus link para SW1 sin incluir el modelo de arco

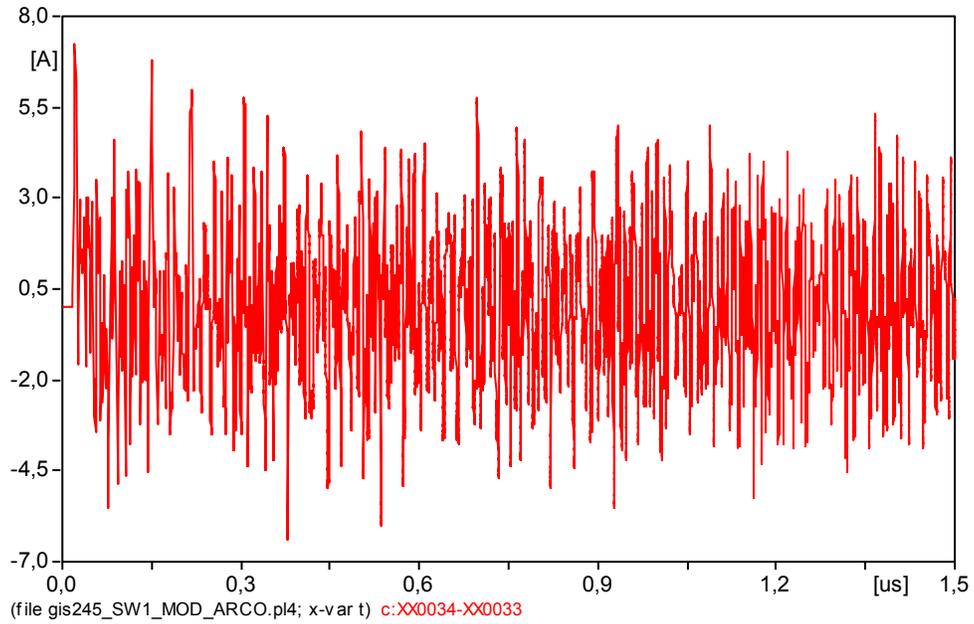
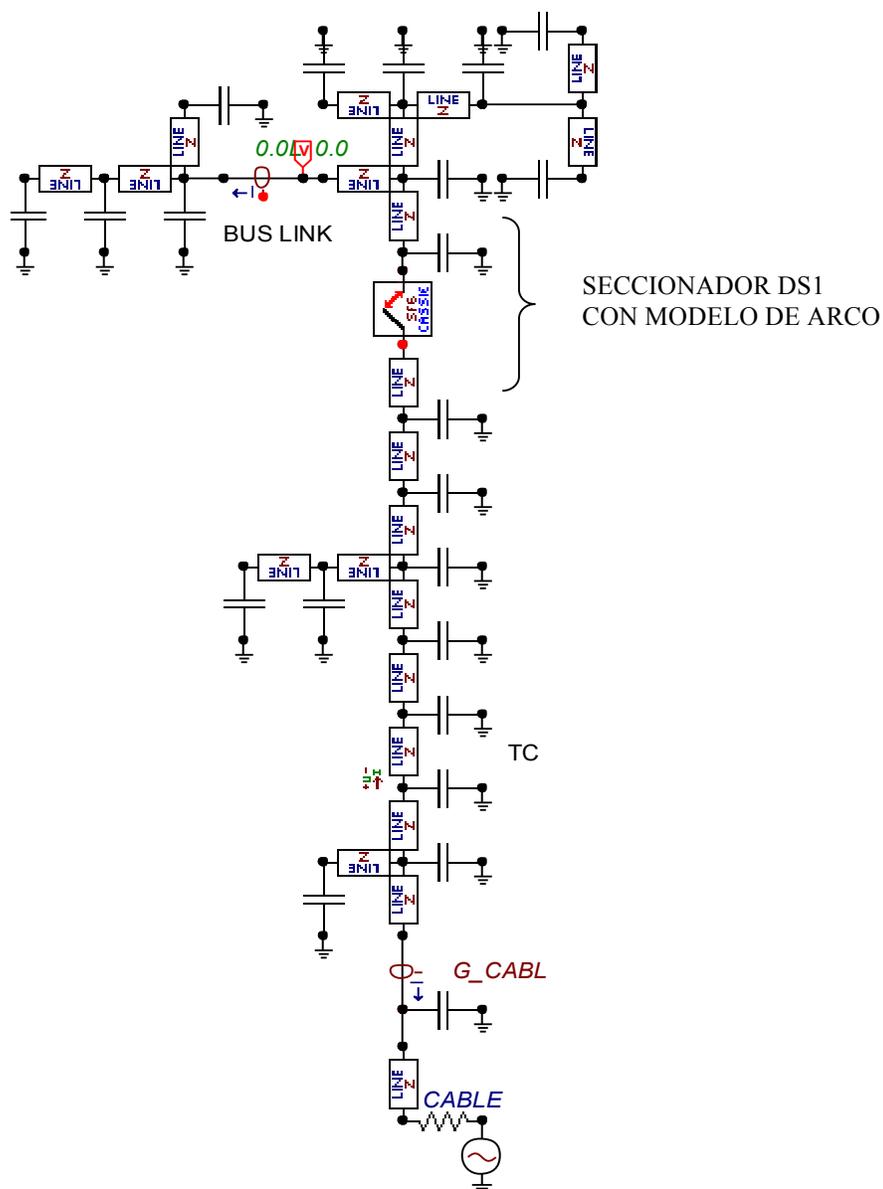


Figura 5.16 Gráfica de corriente en el TC para SW1 sin incluir el modelo de arco

Los valores de corriente que muestran las figuras 5.14, 5.15 y 5.16 se encuentran en un rango no mayor a los 15 A, lo cual no representa un transitorio de sobre-corriente.

5.2.2. Operación de cierre SW1 incluyendo el modelo de arco de Cassie

A continuación en la figura 5.17, se muestra la misma operación de cierre SW1, a partir de la red equivalente mostrada en la figura 5.10, pero ahora incluyendo el modelo de arco de Cassie al modelo de la GIS para el análisis del transitorio de sobrecorriente “VFTC”.



5.17 Modelado de la GIS en ATP-DRAW para SW1 incluyendo el modelo de arco de Cassie.

Para esta simulación de cierre de seccionador DS1, los puntos de observación del transitorio fueron los siguientes: unión GIS-Cable, Bus-Link y TC.

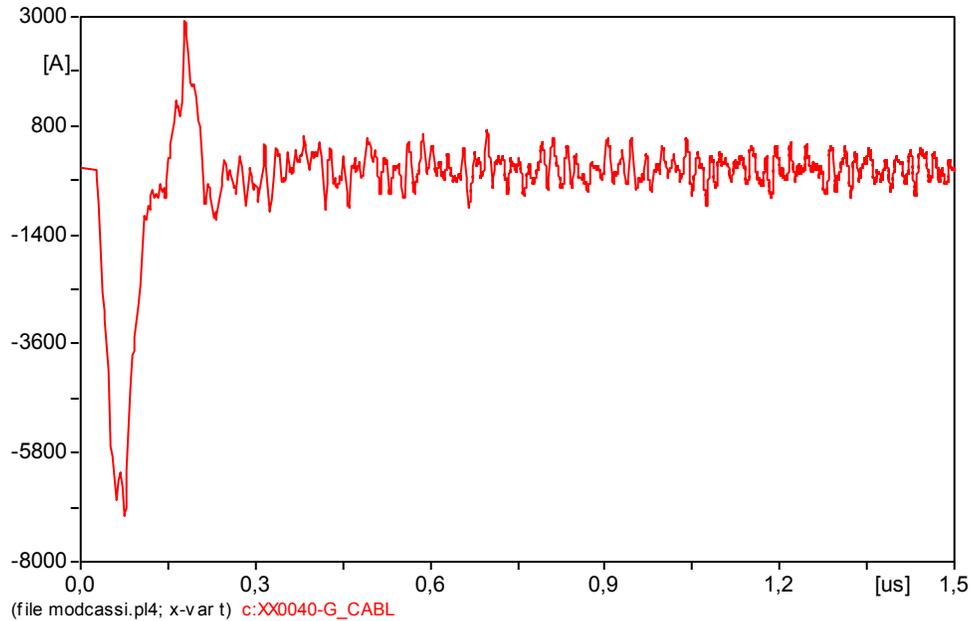


Figura 5.18 VFTC en la unión GIS-cable para SW1 incluyendo el modelo de arco de Cassie

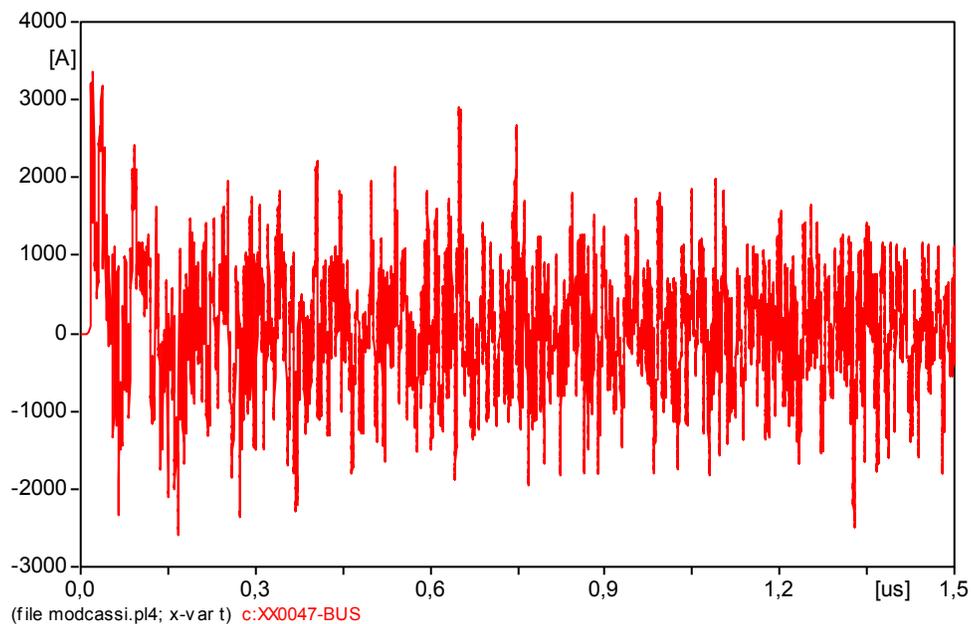


Figura 5.19 VFTC en el Bus link para SW1 incluyendo el modelo de arco de Cassie

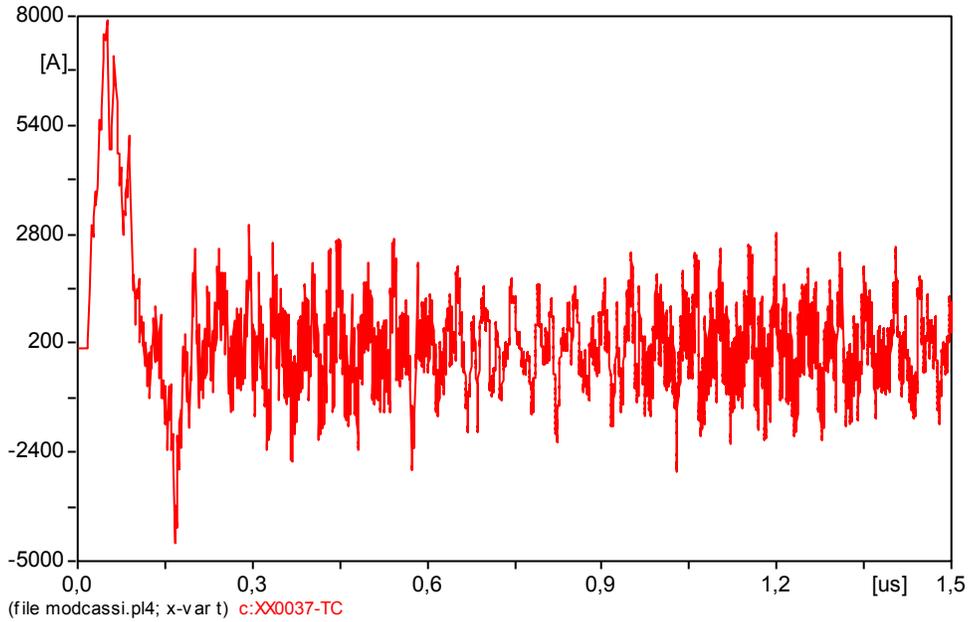


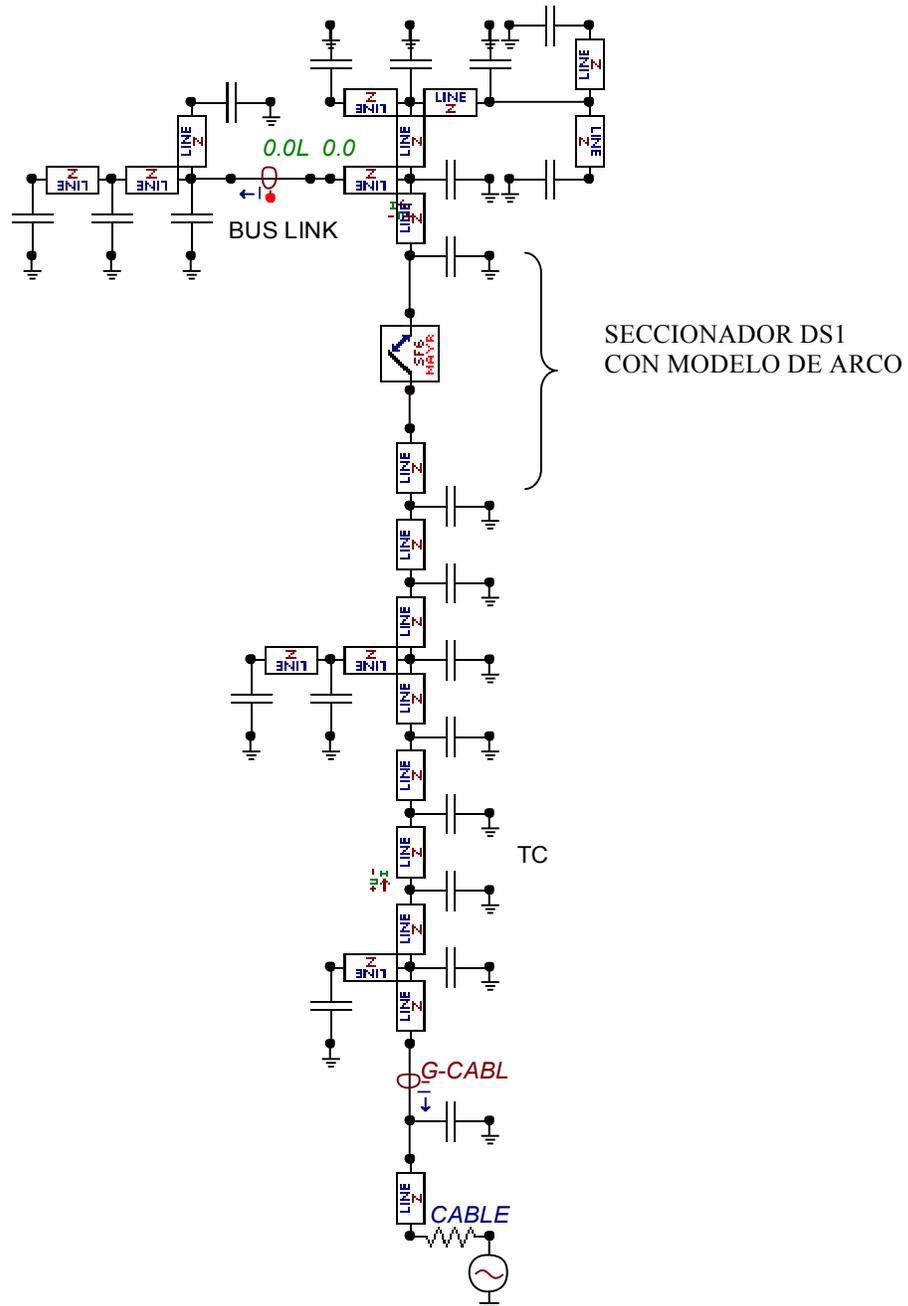
Figura 5.20 VFTC en el TC para SW1 incluyendo el modelo de arco de Cassie

En esta operación de cierre SW1 que comprende la operación de cierre del desconectador DS1, las gráficas anteriores muestran la magnitud del transitorio de corriente ultra rápido (VFTC); como se puede observar en la figura 5.18, la corriente alcanza una magnitud máxima de 7.03 kA en un tiempo de 0.75 ns.

Las figuras anteriores (4.19 y 4.20) también muestran un transitorio de corriente con una magnitud alta. El VFTC en el bus link tiene una magnitud máxima de corriente de 3.3 kA en un tiempo de 0.2 ns, mientras que en el transformador de corriente se registra una corriente máxima de 7.8 kA en un tiempo de 4.9 ns.

5.2.3. Operación de cierre SW1 incluyendo el modelo de arco de Mayr

Para esta simulación se ha incorporado el modelo de arco de Mayr, realizando la misma simulación que con el modelo de arco de Cassie.



5.21 Modelado de la GIS para SW1 incluyendo el modelo de arco de Mayr

En las siguientes gráficas se analizan los VFTC's generados en la subestación GIS pero ahora incluyendo el modelo de arco de Mayr y al igual que en la simulación anterior con el modelo de arco eléctrico de Cassie los puntos de observación del transitorio son: la unión GIS-cable, bus link y el transformador de corriente (TC).

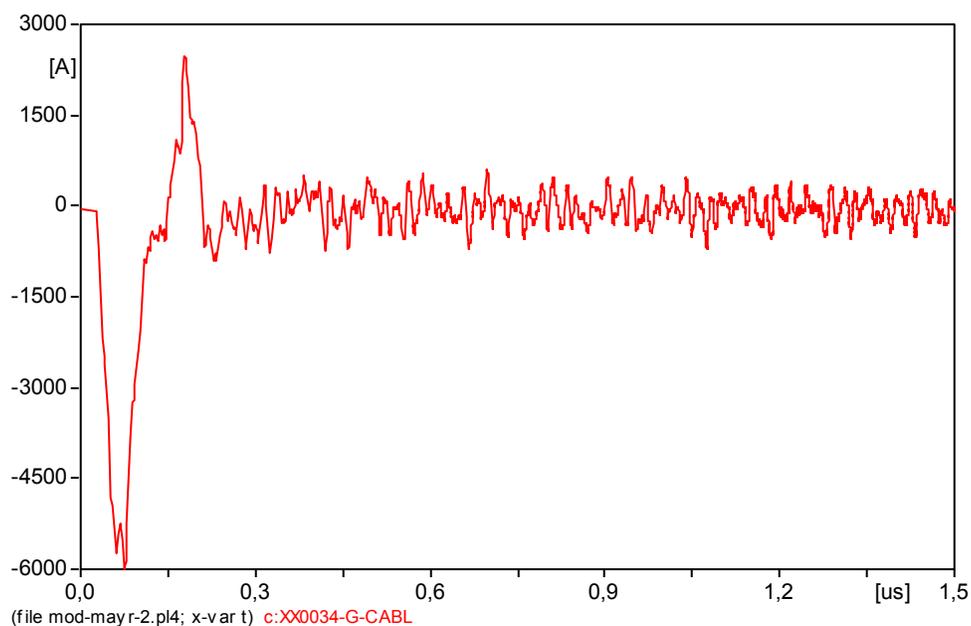


Figura 5.22 VFTC en la unión GIS-cable para SW1 incluyendo el modelo de Mayr

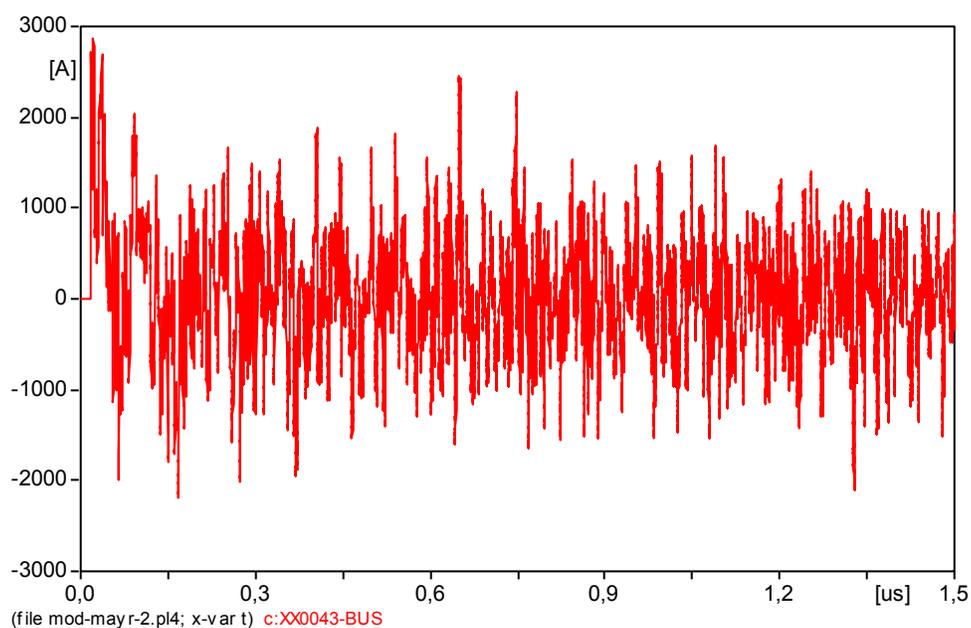


Figura 5.23 VFTC en el bus link para SW1 incluyendo el modelo de Mayr

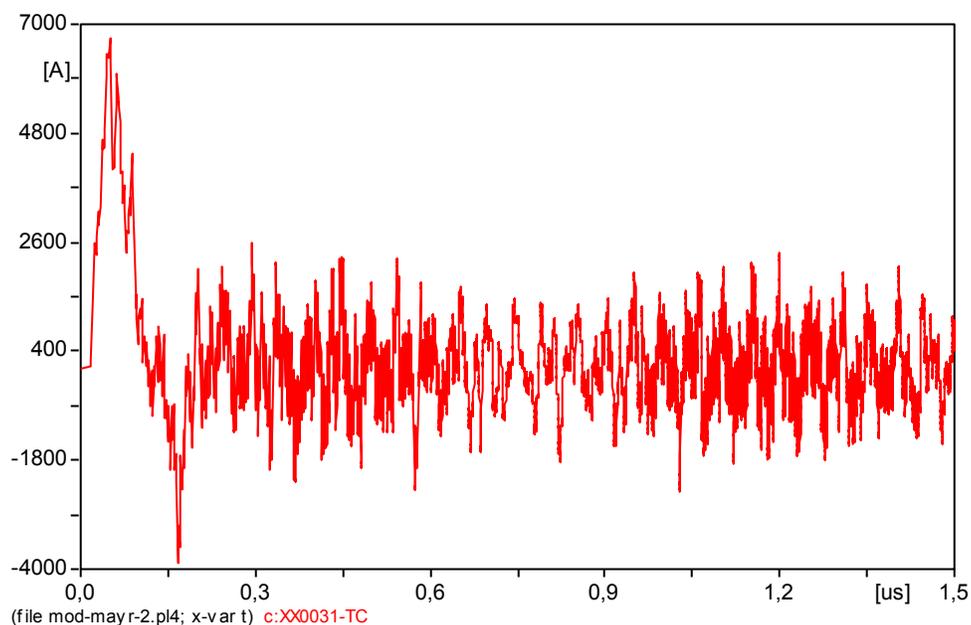


Figura 5.24 VFTC en el TC para SW1 incluyendo el modelo de Mayr

En la figura 5.22 se puede observar que al igual que en el modelo de Cassie y para la misma operación de cierre SW1 aparece el VFTC en la unión GIS-cable con una magnitud máxima de corriente de 6 kA en un tiempo de 0.7 ns. En la figura 5.23 que corresponde al bus link se presenta el VFTC con una magnitud pico de 2.8 kA en un tiempo de 0.22 ns.

En el tercer punto de observación de la subestación GIS se encuentra el transformador de corriente (TC), el cual también se presenta un transitorio de sobre-corriente con una pico de corriente de 6.8 kA en un tiempo de 0.5 ns

Para esta operación de cierre no se incluyó ningún modelo de arco eléctrico, no obstante se muestran las gráficas con los valores de corriente en la unión GIS-cable, bus link y el transformador de corriente (TC).

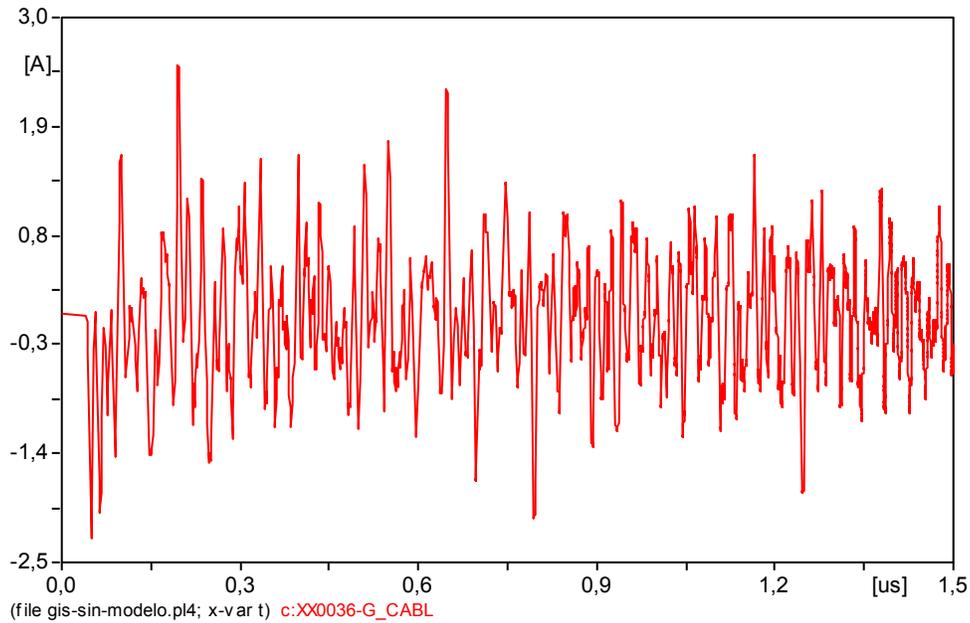


Figura 5.27 Gráfica de corriente en la unión GIS-cable para SW2

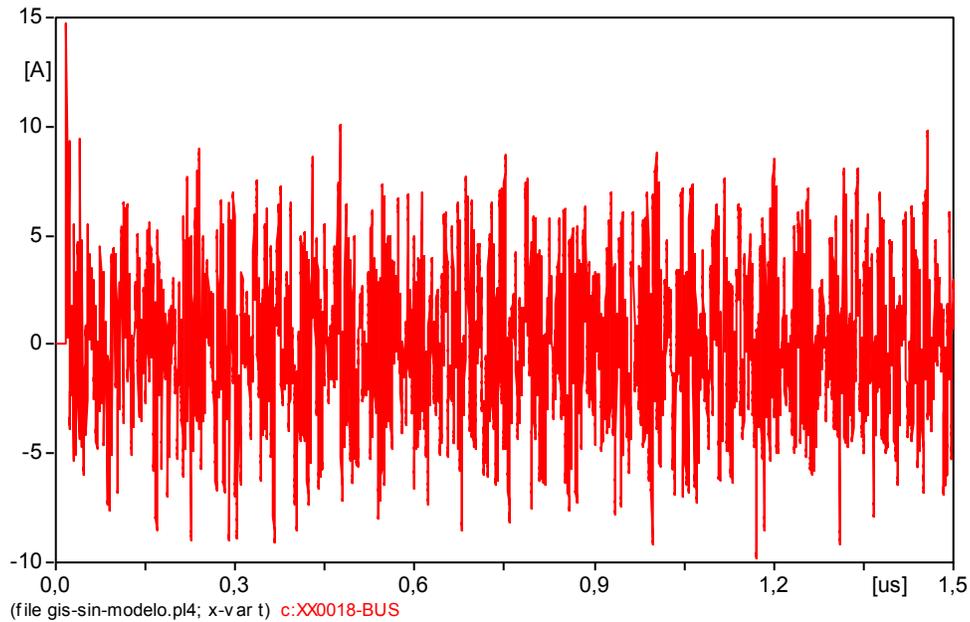


Figura 5.28 Gráfica de corriente en el bus link para SW2

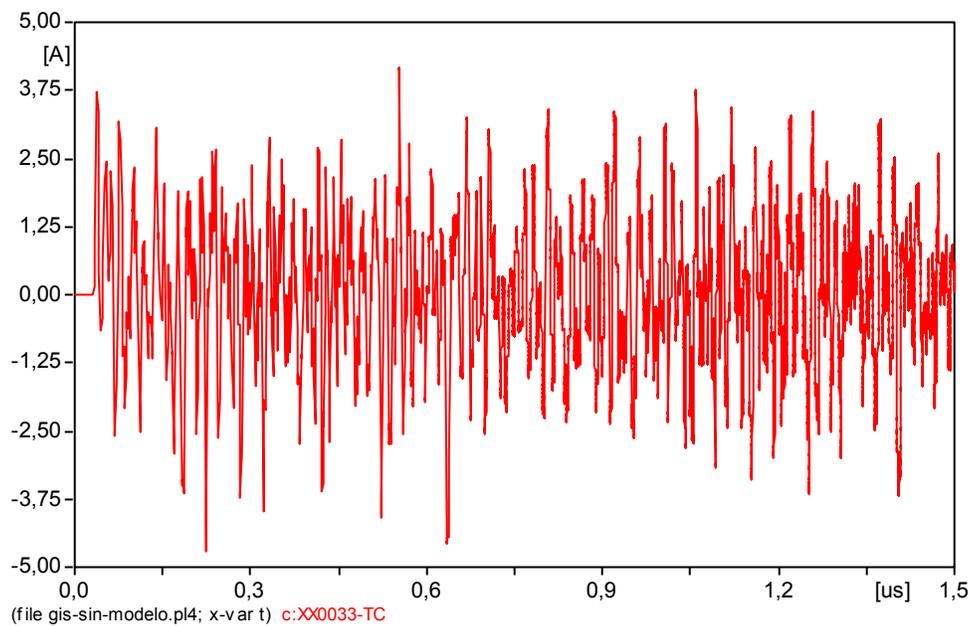


Figura 5.29 Gráfica de corriente en el transformador de corriente (TC) para SW2

Como se puede observar en las gráficas anteriores (5.29, 5.30 y 5.31) los valores de corrientes están en el rango de 5-15 A, lo cual no muestra un transitorio de sobre corriente.

5.2.5. Operación de cierre SW2 incluyendo el modelo de arco de Cassie-Mayr.

Para la misma operación de cierre SW2 ahora se ha implementado el modelo de arco Cassie-Mayr, con el fin de analizar el VFTC bajo las mismas condiciones de cierre.

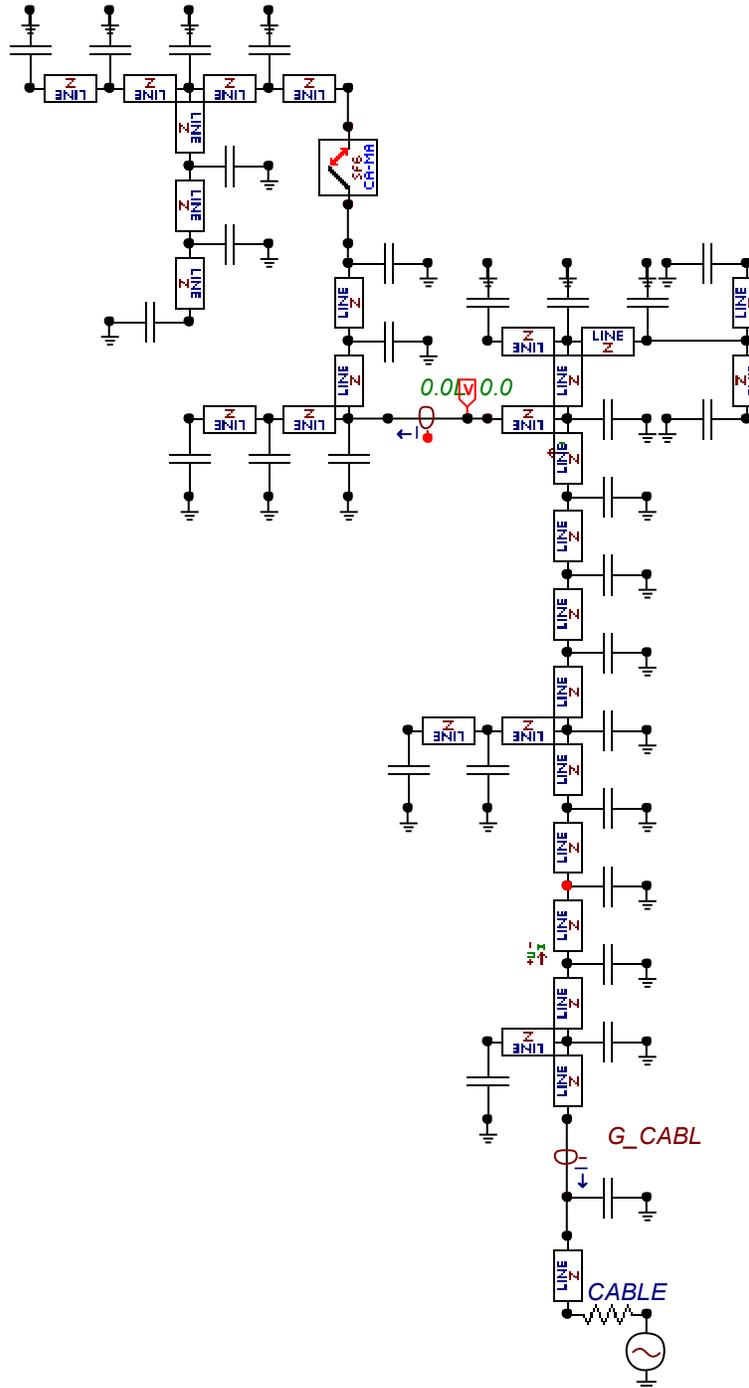


Figura 5.30 Modelado de la GIS para SW2 incluyendo el modelo de arco Cassie-Mayr

Las gráficas (Figuras 5.33, 5.34 y 5.35) siguientes muestran los valores del transitorio de sobrecorriente (VFTC), los cuales son analizados en los siguientes puntos de la subestación: la unión GIS-cable, bus link y el transformador de corriente (TC).

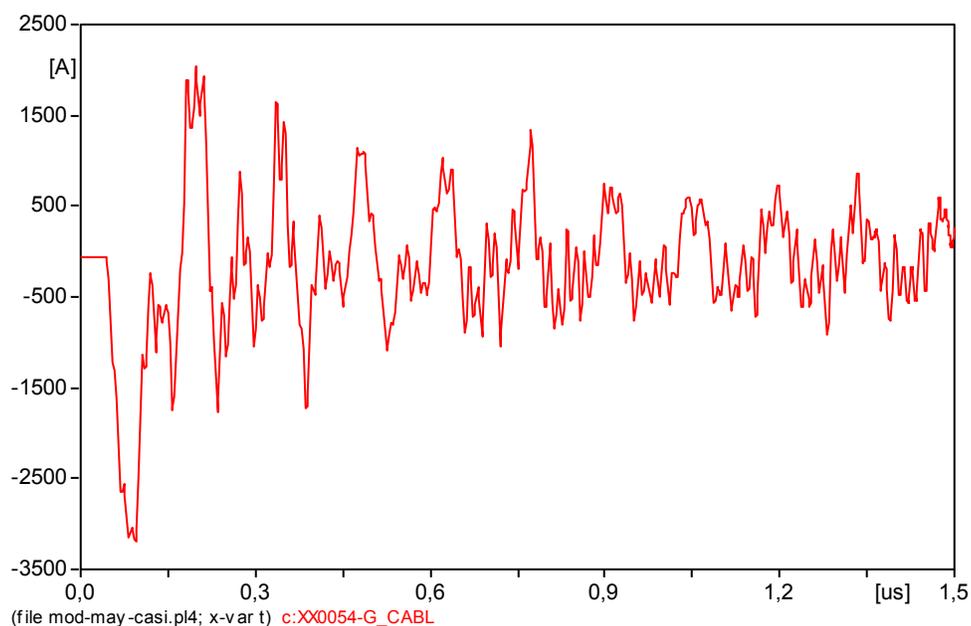


Figura 5.31 VFTC en la unión GIS-cable para SW2 con el modelo de Cassie-Mayr

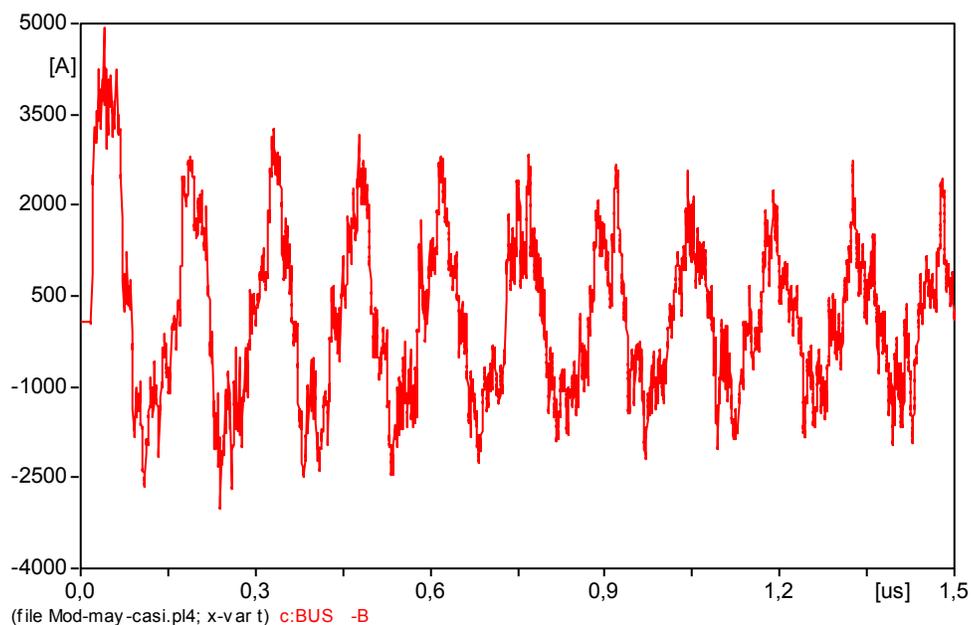


Figura 5.32 VFTC en el bus link para SW2 con el modelo de Cassie-Mayr

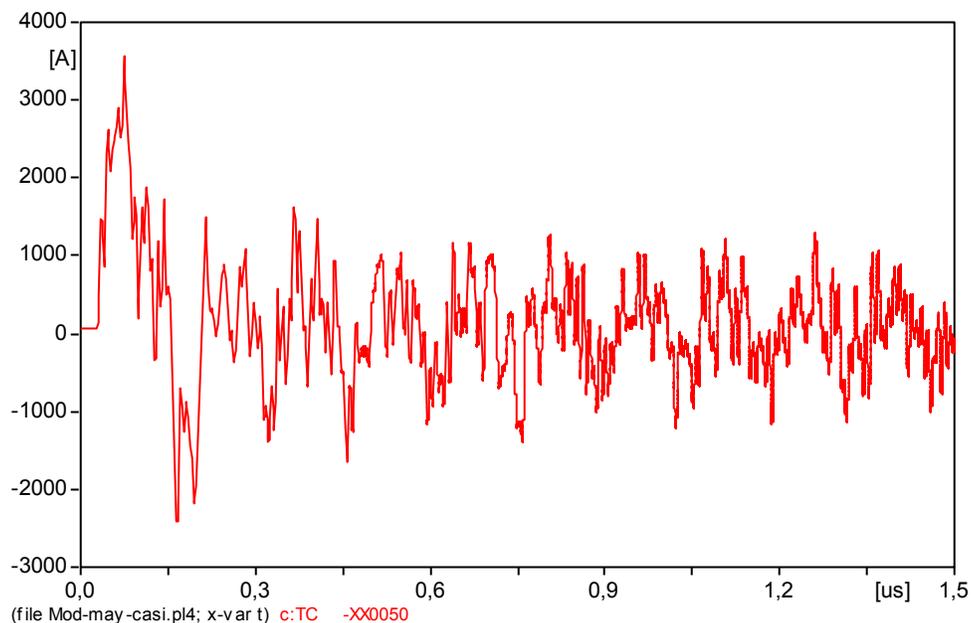


Figura 5.33 VFTC en el TC para SW2 con el modelo de Cassie-Mayr

Con la implementación del modelo combinado Cassie-Mayr al modelo de la GIS y una configuración de operación de maniobra diferente (SW2); nuevamente aparece el VFTC.

En la figura 5.33 se puede observar un transitorio de sobrecorriente que toma valores pico de 3 kA en un tiempo de 0.82 ns; el cual se observa en la unión GIS-cable. En otro punto de la subestación también se presenta el VFTC; tal como muestra la figura 5.34 la gráfica de corriente en el bus link, este transitorio presenta un valor máximo de corriente de 4.93 kA en un tiempo 4 ns. En la figura 5.35 se muestra el VFTC en otro punto de la subestación (TC); el cual toma valores máximos de sobre-corriente de 3.7 kA en un tiempo de 0.75 ns.

5.2.6. Operación de cierre SW2 incluyendo el modelo de arco de Mayr.

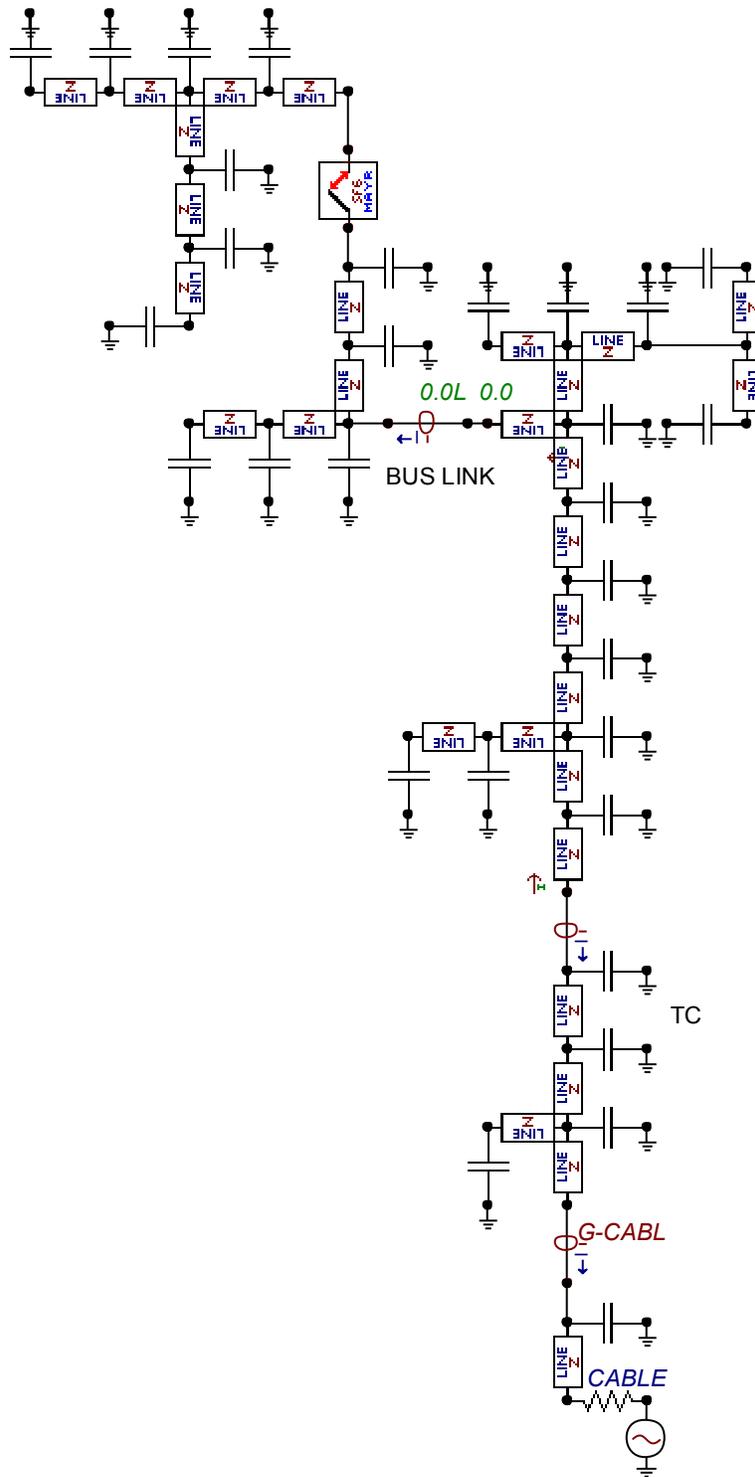


Figura 5.34 Modelo de la GIS para SW2 incluyendo el modelo de arco de Mayr.

En la figura anterior (5.36) correspondiente al modelo de la GIS, se ha incluido el modelo de arco de Mayr; con el cual se realiza la simulación de operación de cierre SW2.

En las figuras 5.37 y 5.38 se muestran las gráficas que describen el comportamiento del VFTC en algunos puntos de la subestación tales como: la unión GIS-Cable, bus link y transformador de corriente (TC).

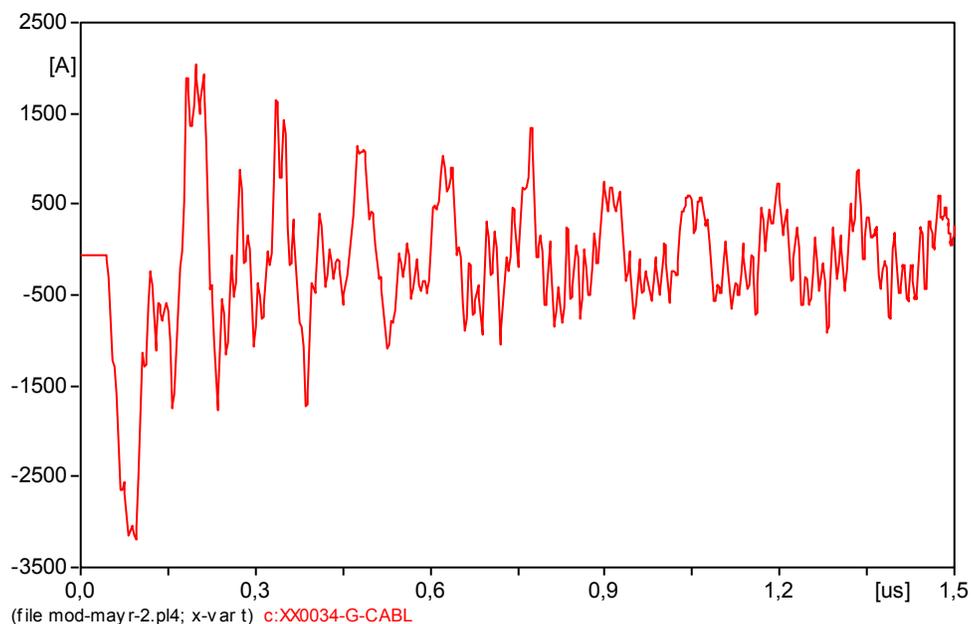


Figura 5.35 VFTC en la unión GIS-cable para SW2 incluyendo el modelo de Mayr

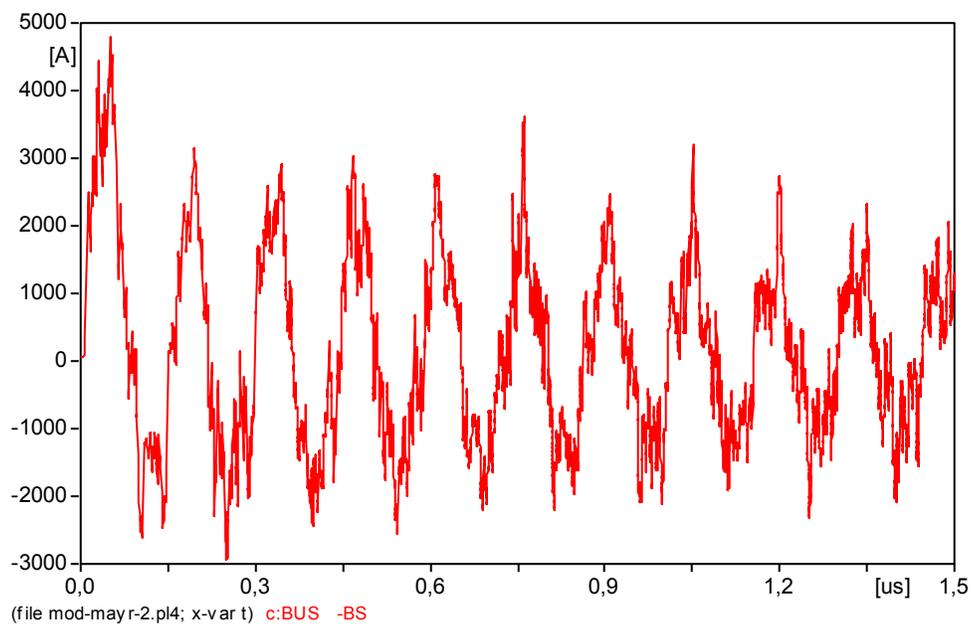


Figura 5.36 VFTC en el bus link SW2 incluyendo el modelo de Mayr

Como se puede apreciar en la figura 5.37 y 5.38 la forma del transitorio de corriente es muy similar a la que se analizó en la operación de cierre SW2; la cual incluía el modelo de arco combinado Cassie-Mayr.

Cabe mencionar que a pesar de ser muy similares la forma del VFTC para la operación de cierre SW2 con el modelo de Mayr en comparación con el modelo combinado Cassie-Mayr; los valores máximos del transitorio de sobrecorriente sí varían. Para la unión GIS-cable el valor máximo de corriente es de 3.1 kA en un tiempo de 0.95 ns, por otro lado el valor de sobre-corriente en el bus link es de 4.7 kA en un tiempo de 5 ns.

En el transformador de corriente (TC) el valor máximo de corriente que toma el VFTC es de 3.5 kA en un tiempo de 74 ns

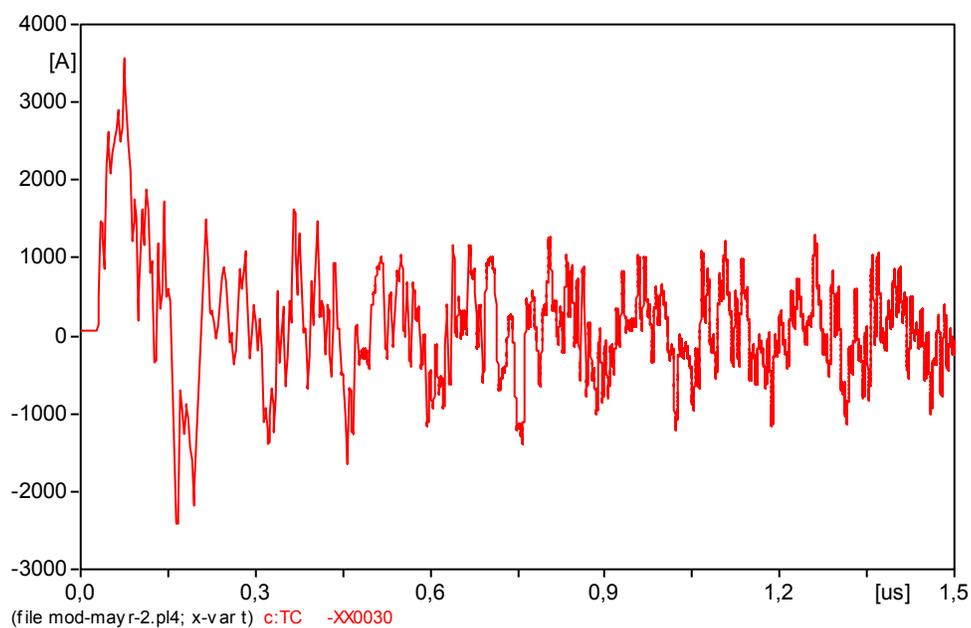


Figura 5.37 VFTC en el TC para SW2 incluyendo el modelo de Mayr

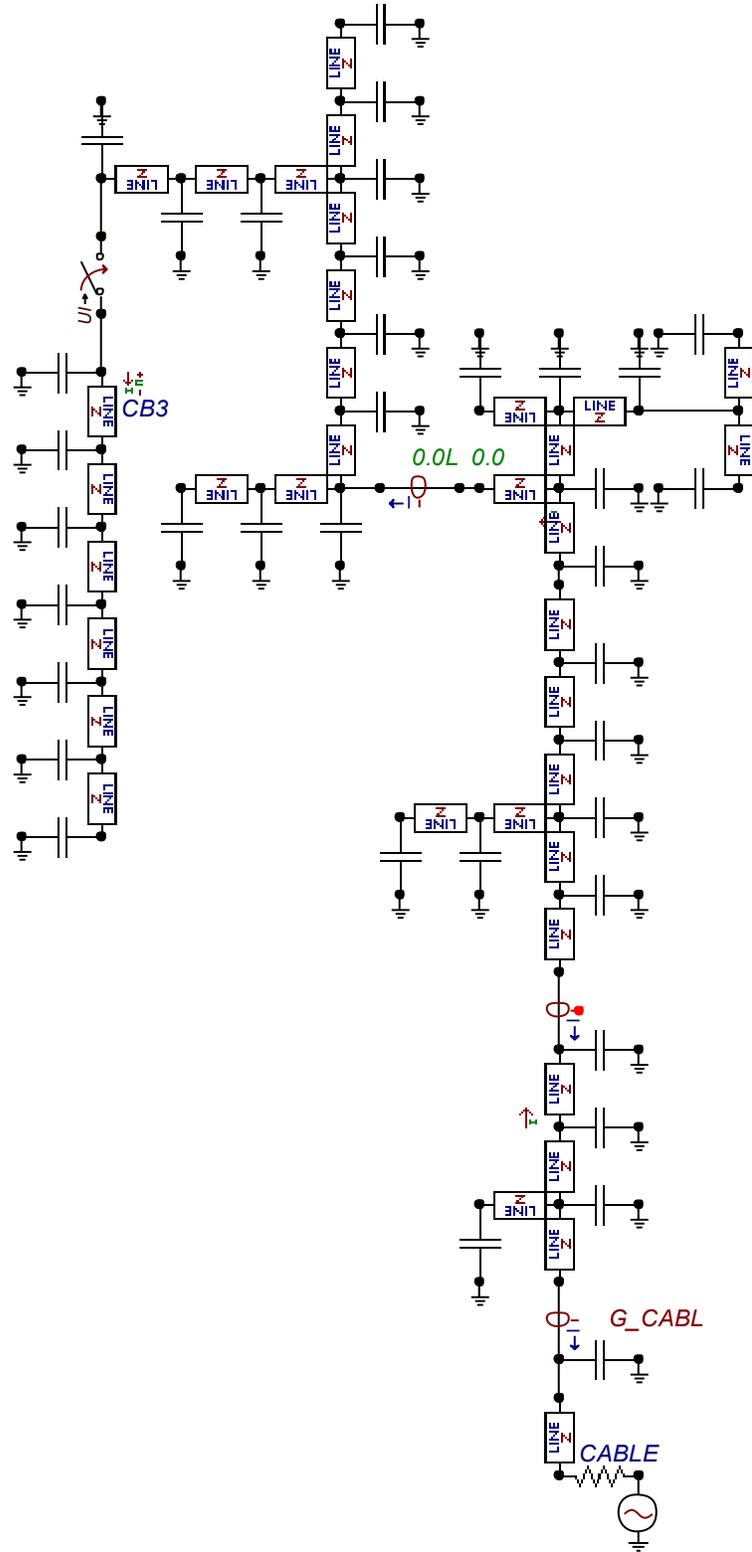


Figura 5.39 Modelo de la GIS en ATP-DRAW para SW3 sin modelo de arco

En esta operación de cierre SW3 no se ha incluido ningún modelo de arco eléctrico al modelo de la subestación. A continuación se analizan los valores de corriente en algunos puntos de la GIS; de tal forma que se pueda observar si se presenta un transitorio de sobrecorriente.

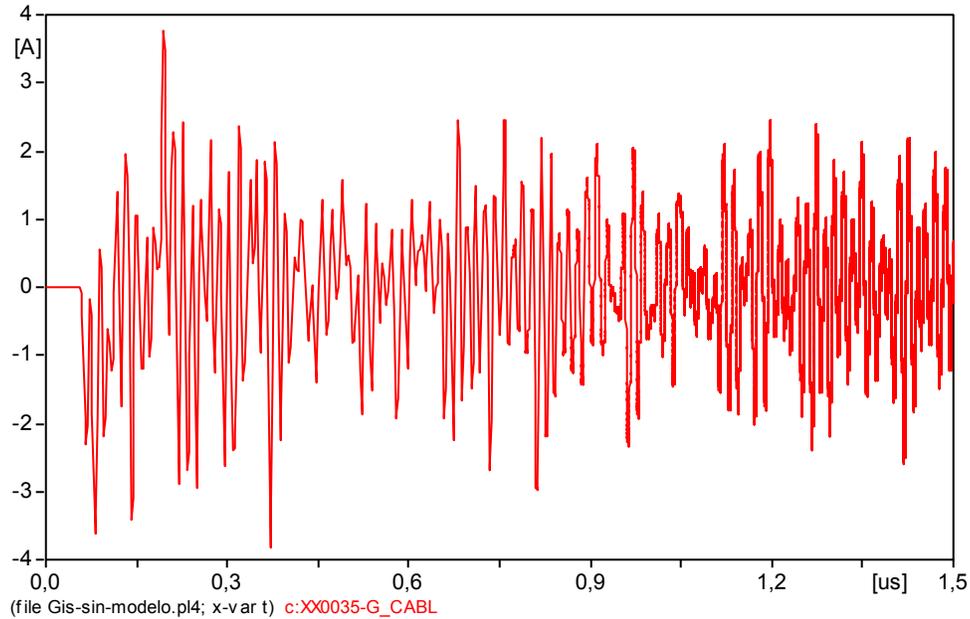


Figura 5.40 Gráfica de corriente en la unión GIS cable para SW3

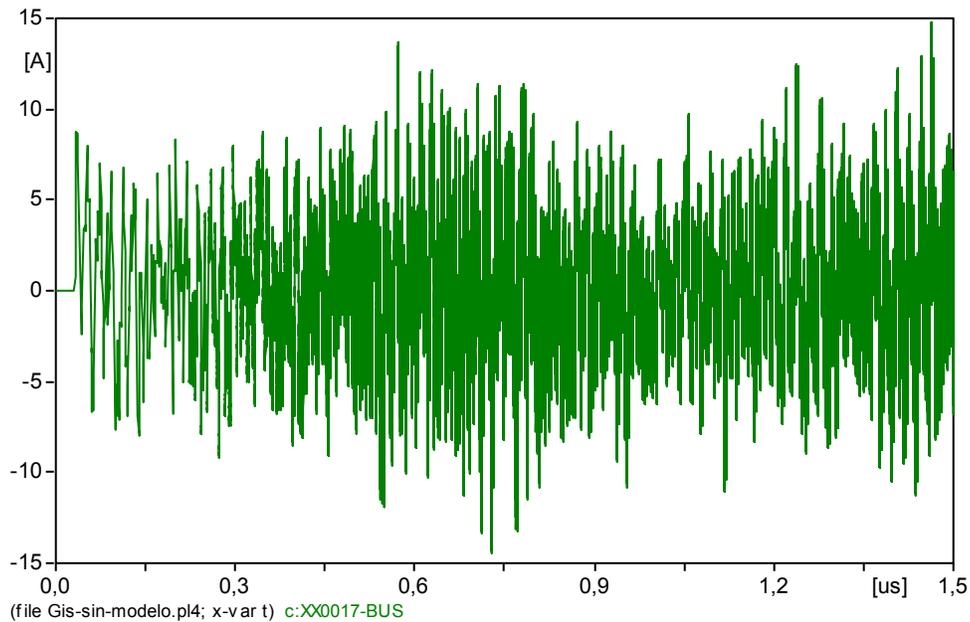


Figura 5.41 Gráfica de corriente en el bus link para SW3

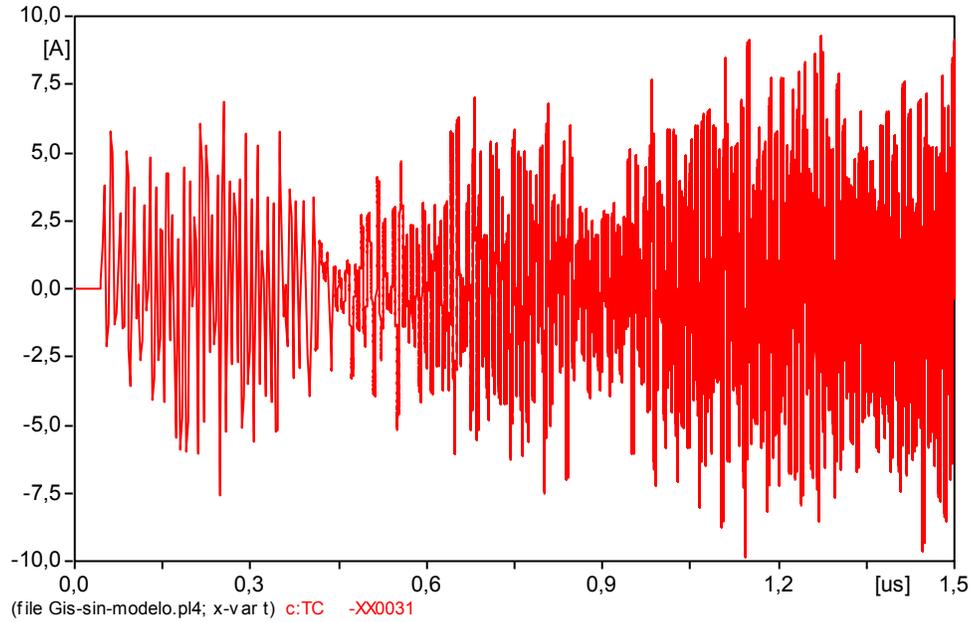


Figura 5.42 Gráfica de corriente en el TC para SW3

En las figuras 5.42, 5.43 y 5.44 se presentan las gráficas de corriente en la unión GIS-cable, bus link y el transformador de corriente, donde se puede observar que los valores de corriente no toman valores más allá de 10 Amperes.

De esta manera se determina que para la operación de cierre SW3 sin incluir ningún modelo de arco no se presenta el VFCTC en el modelo de la subestación.

5.2.8. Operación de cierre SW3 incluyendo el modelo general de arco.

Con las mismas condiciones de operación de cierre SW3 se ha incorporado el modelo de arco al modelo de la subestación para el análisis del VFTC.

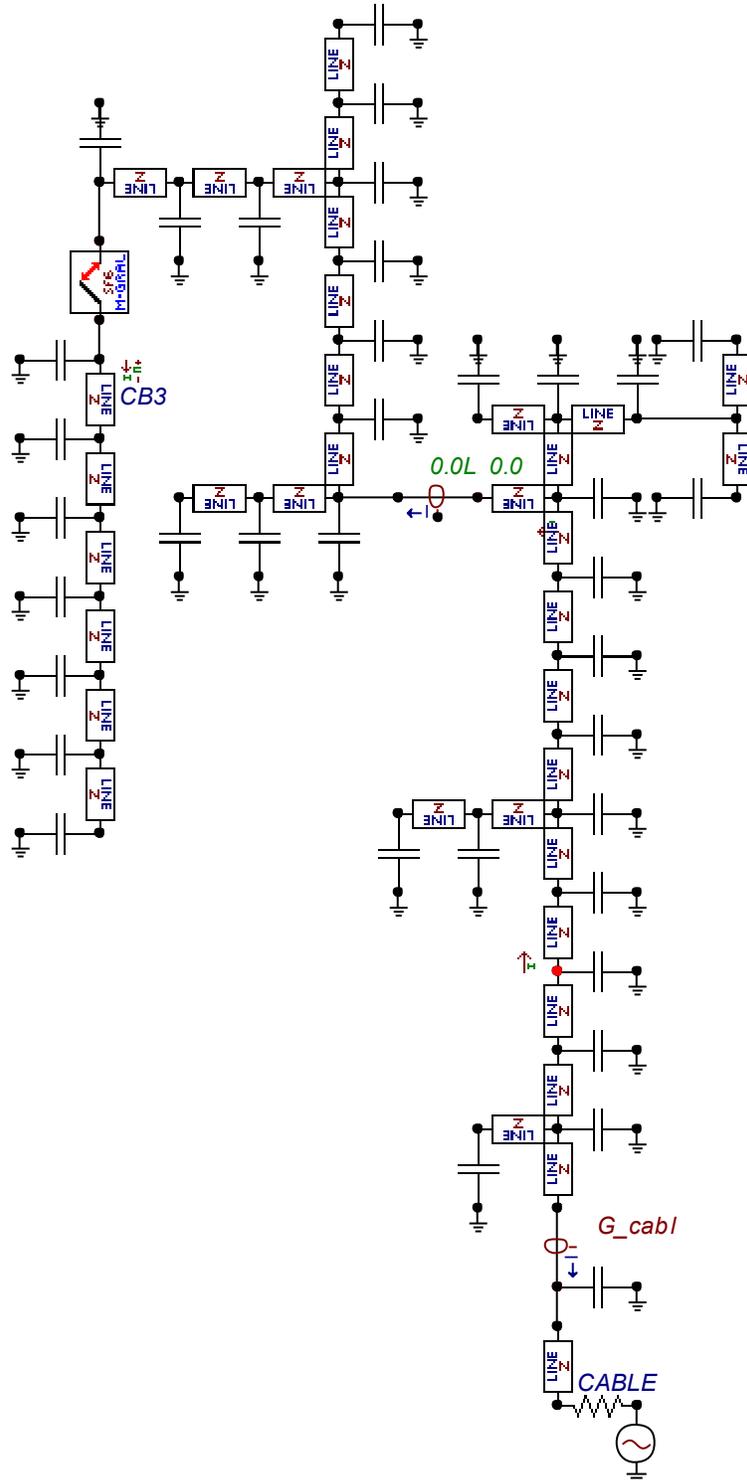


Figura 5.43 Modelo de la subestación GIS para SW3 incluyendo el modelo de arco general

Las siguientes gráficas (figura 5.46, 5.47 y 5.48) muestran el VFTC que se genero para la simulación de operación de cierre SW3 en la unión GIS-cable, bus link y el transformador de corriente (TC).

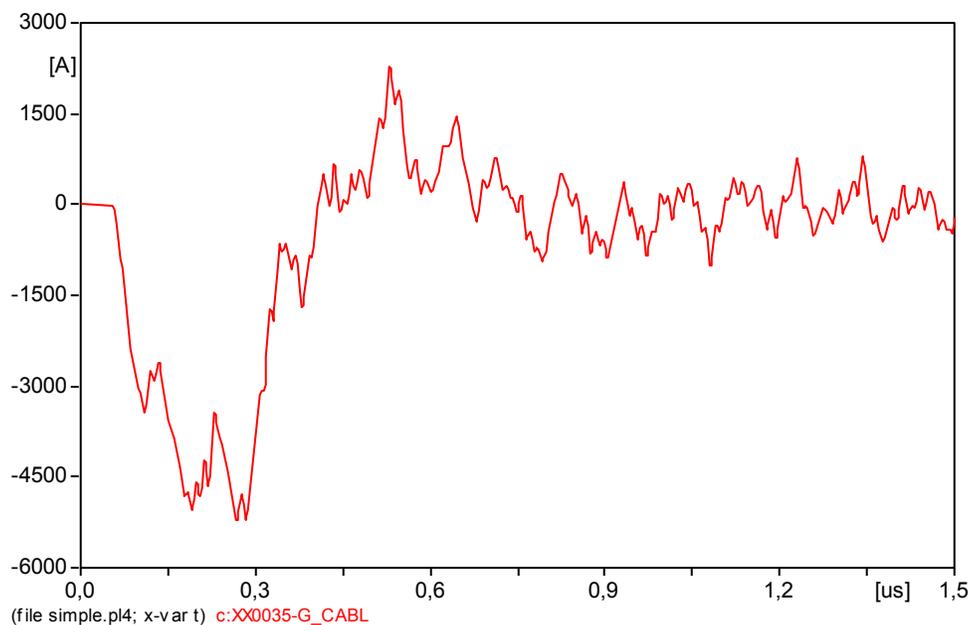


Figura 5.44 VFTC en la unión GIS-cable para SW3 incluyendo el modelo general de arco

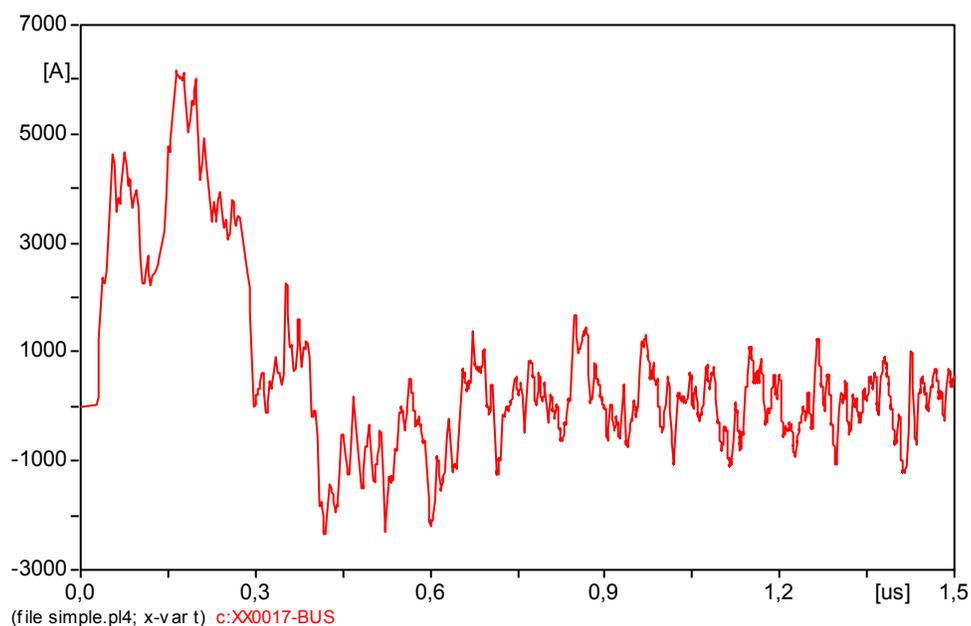


Figura 5.45 VFTC en el bus link para SW3 incluyendo el modelo general de arco

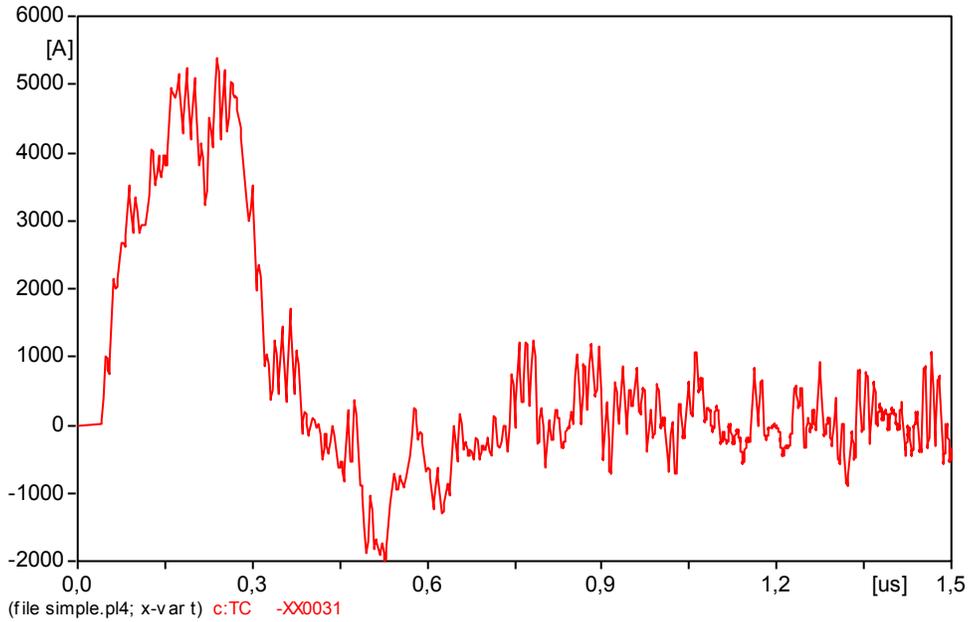


Figura 5.46 VFTC en el TC para SW3 incluyendo el modelo general de arco

En la gráfica 5.46 que corresponde a la unión GIS-cable, el valor de sobre-corriente alcanza un valor máximo de 5.1 kA en un tiempo de 0.02 ns. En la gráfica 5.47 se observa un valor máximo de sobre-corriente de 6 kA en un tiempo de 0.01 ns y el VFTC que se genera en el transformador de corriente tiene una magnitud pico de 5.3 kA en un tiempo de 0.02 ns.

Con la implementación del modelo general de arco podemos observar el VFTC que se genera en algunos puntos de la subestación, los cuales toman valores en el rango de los 6 kA.

5.3 SIMULACIÓN DEL ESPECTRO DE FRECUENCIA DEL VFTC

Como ya se ha analizado en los puntos anteriores acerca del transitorio de sobrecorriente ultra-rápido (VFTC); este presenta parámetros característicos tales como la amplitud del transitorio y la atenuación de dicha amplitud. Otro de los parámetros a analizar a continuación son los componentes de frecuencia dominante que contiene el VFTC y su variación con respecto al tiempo.

Tomando como referencia los valores del VFTC obtenidos en las simulaciones anteriores se analizará el espectro de frecuencia el cual ha sido calculado a partir de la técnica de transformada rápida de Fourier (FFT).

5.3.1. Espectro de frecuencia del VFTC para la simulación SW1

En base a los resultados obtenidos del VFTC realizados en la operación de cierre SW1, el espectro de frecuencia es encontrado con la ayuda de MATLAB, aplicando la técnica de transformada rápida de Fourier (fft).

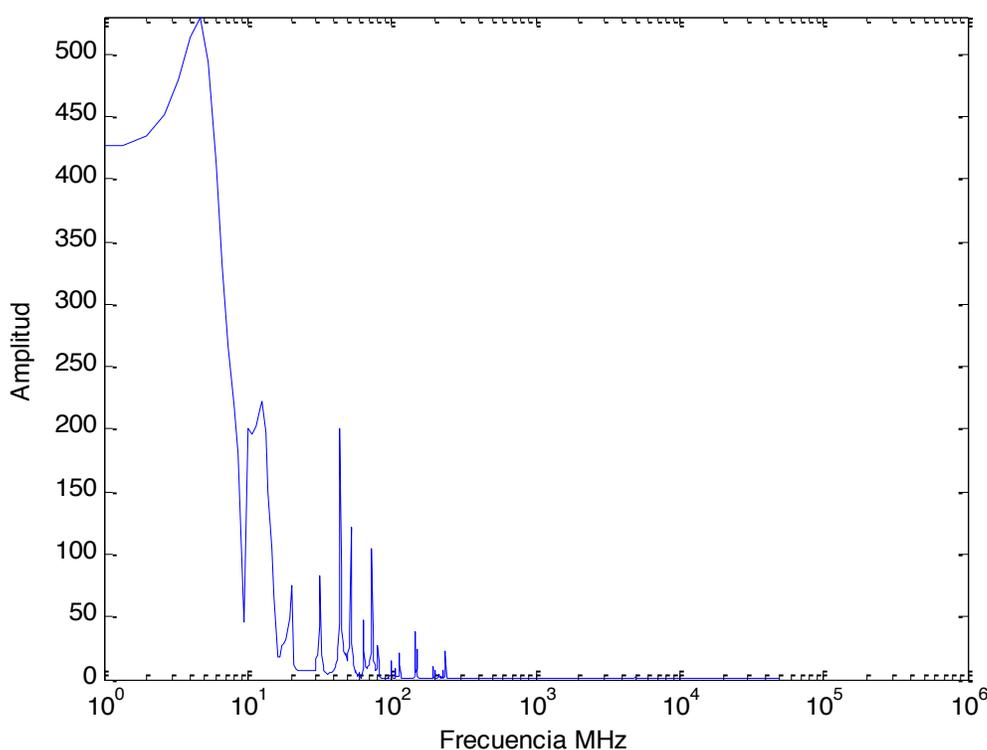


Figura 5.47 Espectro de frecuencia para SW1 en la unión GIS-cable

En la figura 5.49 se muestra el espectro de frecuencia obtenido con el modelo de Cassie en la unión GIS-cable, dentro de las cuales se encuentran frecuencias de 4.6 MHz, 6 MHz, 10 MHz, 12 MHz, 44 MHz, 52 MHz, 73.3 MHz siendo estas las más representativas del VFTC.

En la siguiente figura 5.50 se muestra el espectro de frecuencia que corresponde al VFTC en el bus link, el cual toma valores de frecuencias desde 9.33 MHz, 20 MHz, 44 MHz, 73 MHz, 170 MHz, 224 MHz.

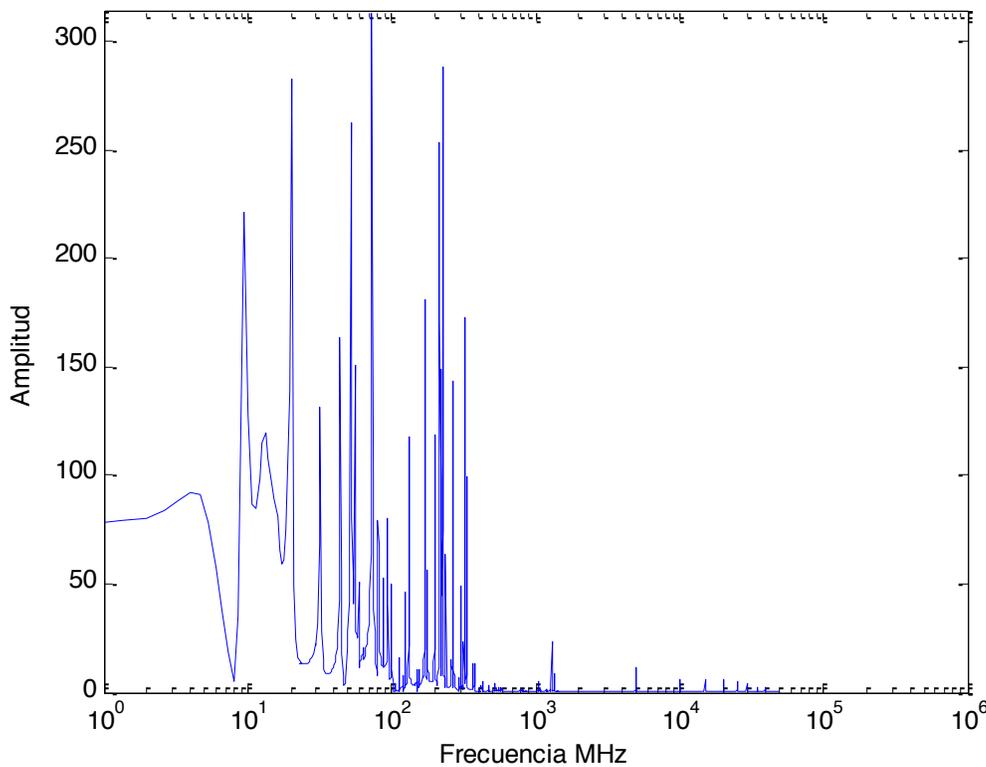


Figura 5.48 Espectro de frecuencia para SW1 en el bus link

A continuación en la figura 5.51 se encuentra el espectro de frecuencia del VFTC correspondiente al transformador de corriente (TC), con valores de frecuencia desde 4.6 MHz, 20 MHz, 44 MHz, 52 MHz, 133 MHz y 237.3 MHz, los cuales son más relevantes.

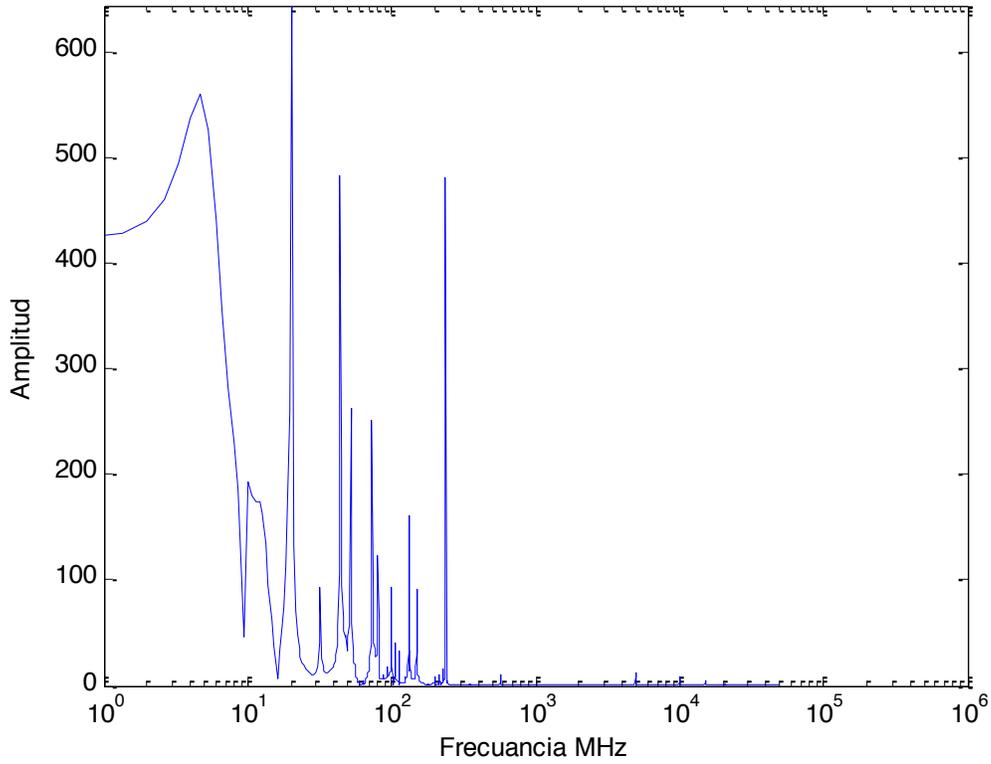


Figura 5.49 Espectro de frecuencia para SW1 en el TC

5.3.2 Espectro de frecuencia del VFTC para la simulación SW2

Para la operación de cierre SW2 se analizó el modelo de arco de Cassie-Mayr. Las siguientes gráficas muestran el espectro de frecuencia con dicho modelo en los mismos puntos de la subestación en el cual fue analizado el VFTC.

La figura 5.52 muestra el espectro de frecuencia del VFTC en la unión GIS-cable; el cual toma valores desde 6.6 MHz, 7.33 MHz, 14 MHz, 26.6 MHz, 30 MHz, 52.2 MHz, 66 MHz y 72.6 MHz

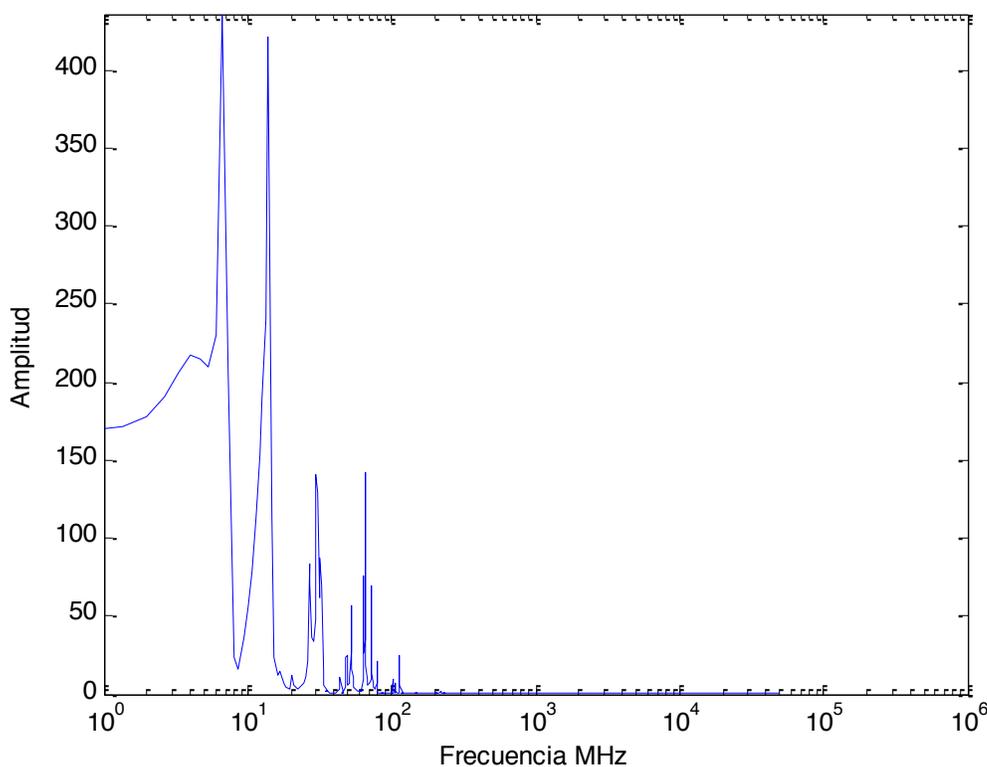


Figura 5.50 Espectro de frecuencia para SW2 en la unión GIS-cable

El bus link es otro de los puntos de la GIS donde se analizó el VFTC y la gráfica 5.52 muestra el espectro de frecuencia de este transitorio, el cual toma valores de frecuencia desde 6.6 MHz, 8 MHz, 14 MHz, 20 MHz, 26.6 MHz, 66 MHz, 79.3 MHz, 220 MHz, 326.6 MHz.

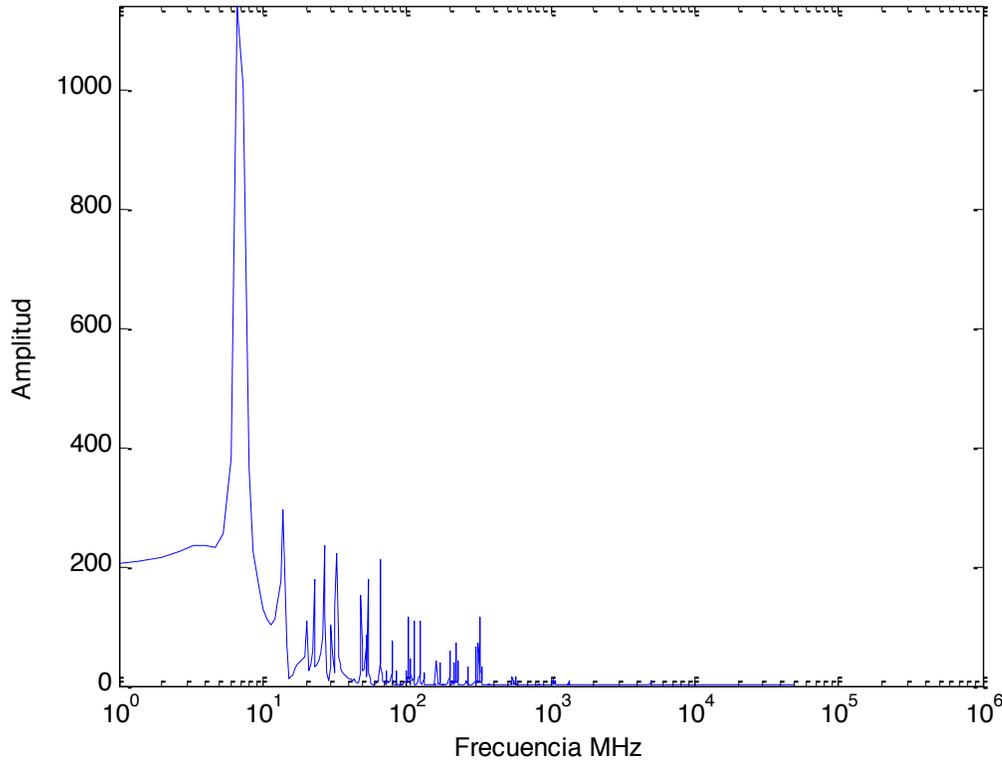


Figura 5.51 Espectro de frecuencia para SW2 en el bus link

El espectro de frecuencia del VFTC en el transformador de corriente (TC) mostrado en la figura 5.53 toma valores de frecuencia desde 6.6 MHz, 14 MHz, 20 MHz, 30 MHz, 32 MHz, 52.6 MHz, 72 MHz, 102 MHz, siendo estas las frecuencias más significantes.

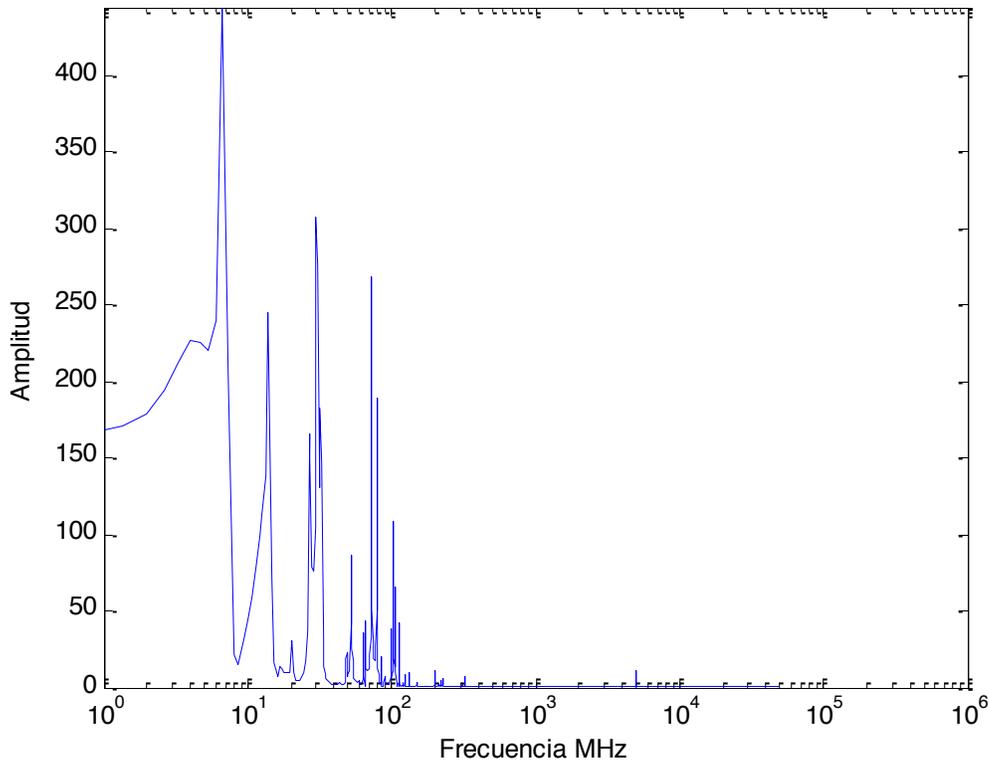


Figura 5.52 Espectro de frecuencia para SW2 en el TC

5.3.3 Espectro de frecuencia del VFTC para la simulación SW3

En la operación de cierre SW3 se incorporó el modelo de arco general, en el cual se analizó el VFTC. Estos datos son tomados para el análisis del espectro de frecuencia del transitorio de corriente ultra-rápido.

En la gráfica de la figura 5.54 se muestra el espectro de frecuencia del VFTC que se encuentra en la unión GIS-cable. Este toma valores de frecuencia desde 1.3 MHz, 2 MHz, 4 MHz, 6 MHz, 10 MHz, 17.3 MHz, 28 MHz, 44 MHz y 72 MHz que son las frecuencias más significativas.

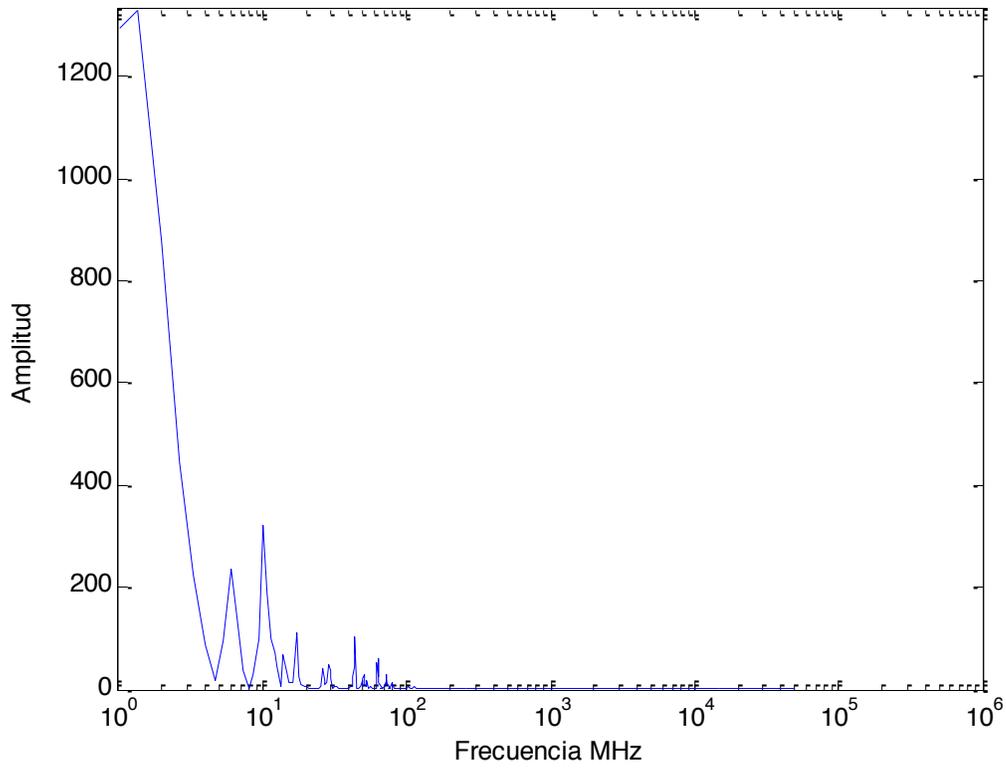


Figura 5.53 Espectro de frecuencia para SW3 en la unión GIS-cable

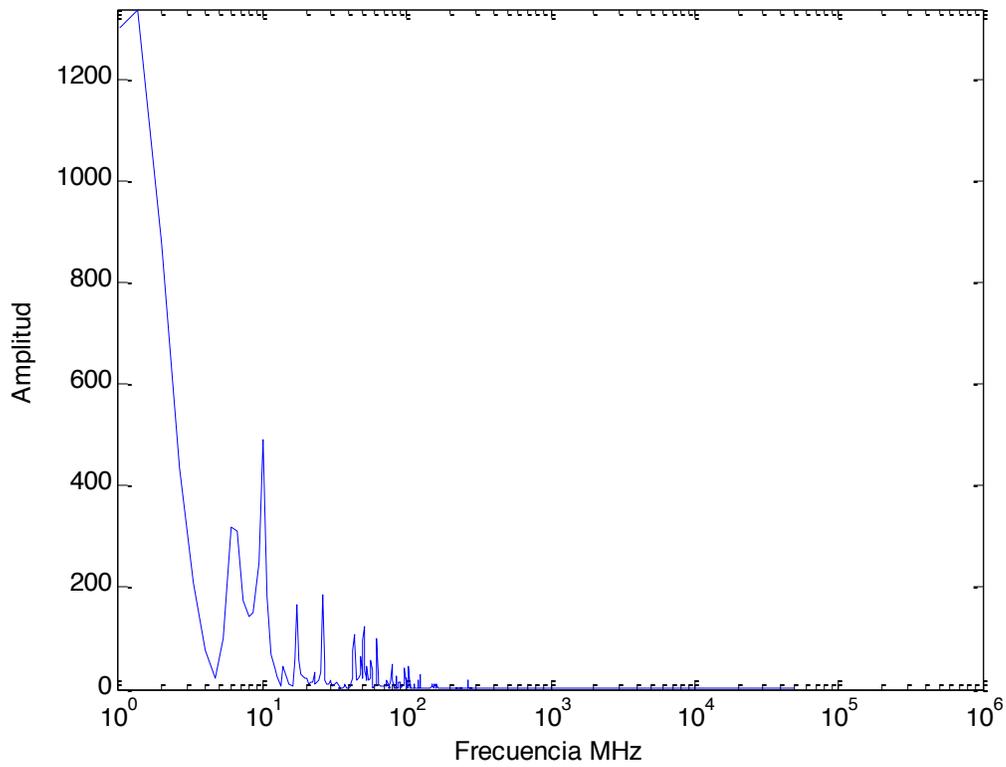


Figura 5.54 Espectro de frecuencia para SW3 en el bus link

En la figura 5.55 se muestra el espectro de frecuencia del VFTC en el bus link, el cual tiene valores de frecuencia desde 1.3 MHz, 2 MHz, 6 MHz, 8 MHz, 10 MHz, 12 MHz, 14 MHz, 17.3 MHz, y 26 MHz, siendo estas las más significativas.

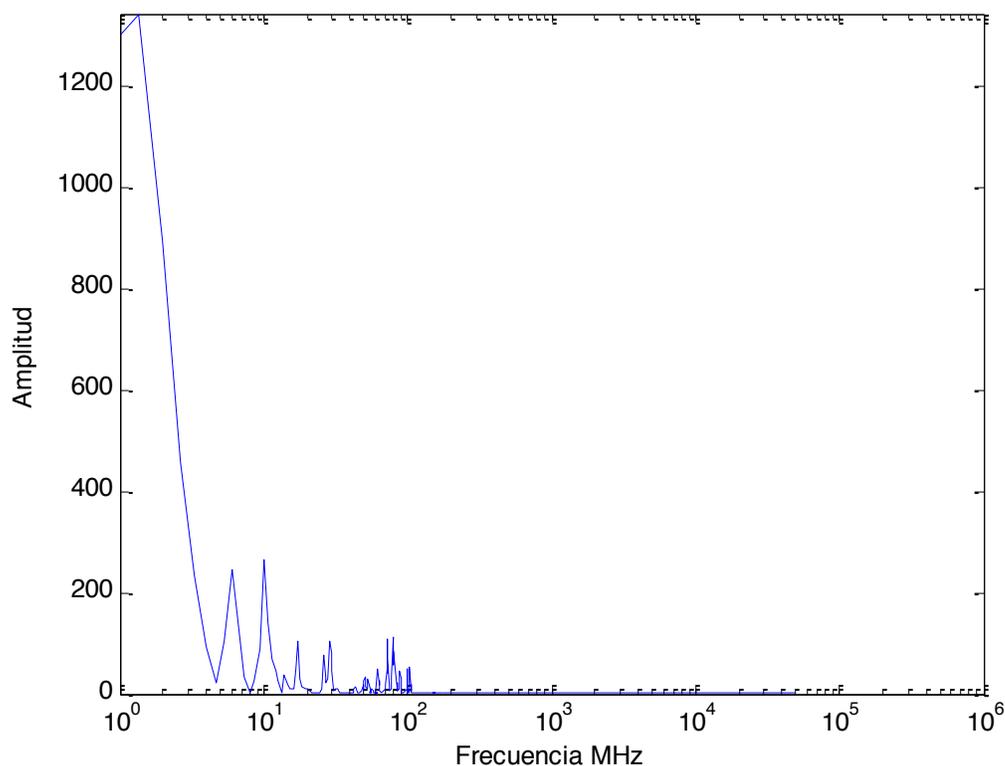


Figura 5.55 Espectro de frecuencia para SW3 en el TC

La figura 5.5 contiene la gráfica del espectro de frecuencia del VFTC en el transformador de corriente (TC), que toma valores de frecuencia desde 1.3 MHz, 2 MHz, 6 MHz, 10 MHz, 17.3 MHz, 28.6 MHz y 72 MHz, siendo estos valores de frecuencia los más significativos.

5.3 RESULTADOS DE LAS OPERACIONES DE CIERRE

En las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3 se muestran los resultados de las simulaciones que corresponden a las operaciones de cierre SW1, SW2 y SW3. Estas contienen los valores pico que alcanza el transitorio de sobre-corriente ultra-rápido (VFTC) en los diferentes puntos de la subestación GIS en las cuales fueron realizadas las simulaciones.

Los modelos de arco que fueron implementados son: Modelo de Cassie, Modelo de Mayr, Modelo Cassie-Mayr y Modelo General.

Tabla 5.1 Resultados del VFTC para SW1

Modelo de arco	Operación de cierre SW1		
	Unió GIS-cable	Bus link	TC
Cassie	7.06	3.3	7.8
Mayr	6	2.8	6.8

* Los resultados de la tabla están en kA

Tabla 5.2 Resultados del VFTC para SW2

Modelo de arco	Operación de cierre SW2		
	Unió GIS-cable	Bus link	TC
Cassie-Mayr	3	4.9	3.7
Mayr	3.1	4.7	3.5

* Los resultados de la tabla están en kA

Tabla 5.3 Resultados del VFTC para SW3

Modelo de arco	Operación de cierre SW2		
	Unión GIS-cable	Bus link	TC
Modelo general	5.1	6	5.3

* Los resultados de la tabla están en kA

Capítulo **6** *Conclusiones*

En este capítulo se encuentran algunos de los resultados del trabajo desarrollado, los cuales ayudan a formar una conclusión del tema, mostrando de manera clara si los objetivos planteados se lograron y cuales fueron resultados de mayor importancia para esta investigación.

De acuerdo con los objetivos planteados, se determinó en base a los resultados obtenidos en las simulaciones que los modelos de arco eléctrico; que fueron implementados son capaces de representar el transitorio de sobre-corriente ultra-rápido que contiene esta subestación en particular. Así mismo este trabajo queda como base para el análisis de algún tipo de subestación GIS con una configuración diferente.

En base a las diversas simulaciones realizadas en el capítulo 5, fue posible observar cómo se generaba el VFTC ante la implementación de un determinado modelo de arco eléctrico, y como en la ausencia del mismo, los valores de sobre-corriente no eran tan significantes.

Las siguientes figuras (6.1 y 6.2) muestran una breve comparación de los valores de corriente generados desde un punto de observación de la subestación ante una operación de cierre, de tal modo que para la misma operación de cierre (SW1) la primera simulación no contiene el modelo de arco y en la segunda si ha sido incorporado.

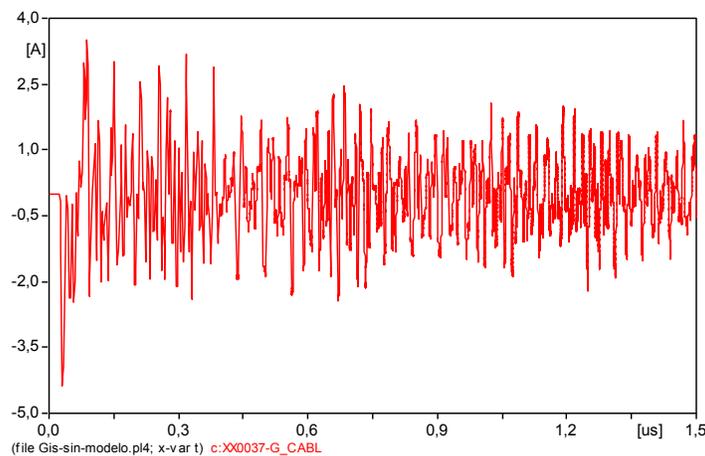


Figura 6.1 Gráfica de corriente para SW1 en la unión GIS-cable sin modelo de arco

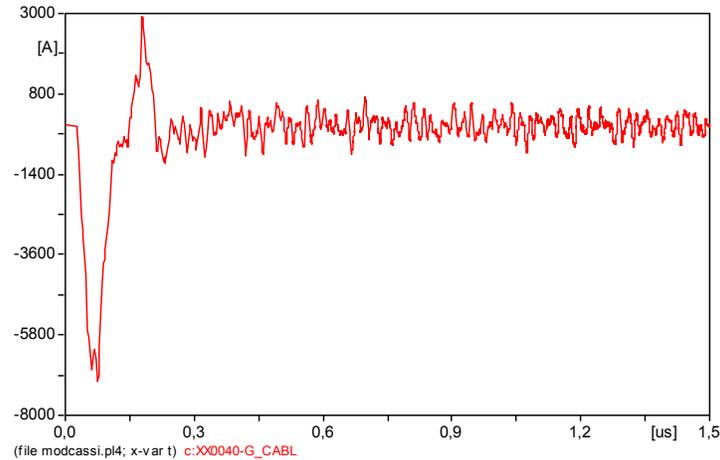


Figura 6.2 VFTC para SW1 en la unión GIS-cable incluyendo el modelo de Cassie

Como se puede observar en las figuras 6.1 y 6.2, los valores de corriente varían significativamente. En la figura 6.1 los valores de corriente se encuentran dentro de los 5 A mientras que en la figura 6.2 presenta valores de sobre-corriente en el rango de los kA. Para esta operación de cierre SW1 el modelo de arco eléctrico implementado fue el modelo de Cassie. Significa que el modelo del arco juega un papel importante el modelado del fenómeno de sobrecorriente, lo cual fue objetivo de esta tesis.

Dentro de las simulaciones correspondientes a la operación de cierre SW1 se implementó otro modelo de arco (modelo de Mayr), en el cual también se pudo observar el transitorio de sobre-corriente. El VFTC observado con el modelo de Mayr presenta una forma similar con respecto al modelo de Cassie, no obstante valores máximos de corriente presentan una pequeña variación de corriente comprendida en algunos pocos Amperes como lo mostró la tabla 5.1.

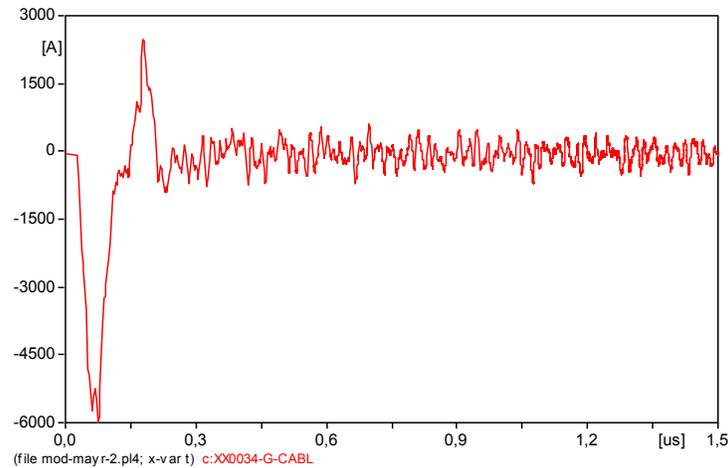


Figura 6.3 VFTC para SW1 en la unión GIS-cable incluyendo el modelo de Mayr

Otro de los modelos de arco implementado al modelo de la subestación GIS para el análisis de los VFTC's fue el modelo Cassie-Mayr, el cual según la teoría de modelos de arco eléctrico combina las características de ambos modelos.

La figura 6.4 muestra la gráfica del VFTC que se generó para una operación de cierre SW2, el cual fue observado en el bus link de la GIS. Se puede apreciar una sobrecorriente máxima cercana a los 5 kA.

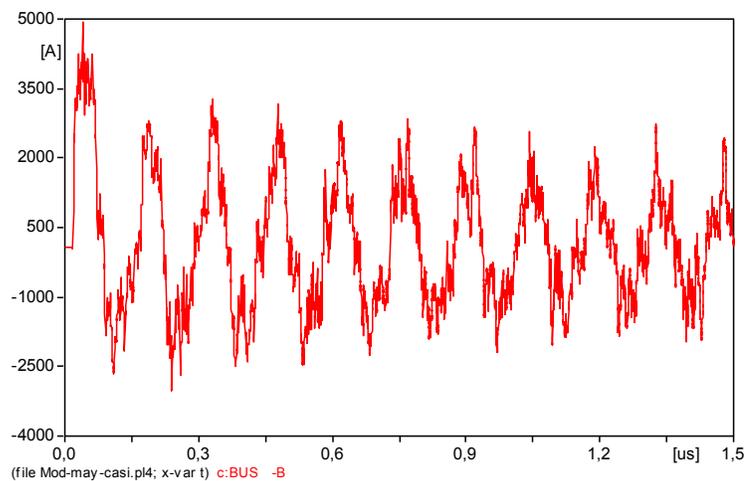


Figura 6.4 VFTC para SW2 en el bus link incluyendo el modelo de Cassie-Mayr

El último modelo de arco el cual fue desarrollado para el análisis de VFTC's fue el modelo general de arco, el cual fue implementado en la operación de cierre SW3. En la figura 6.5 se muestra la forma del transitorio y sus valores máximos de corriente, los cuales fueron registrados en el transformador de corriente del modelo de la subestación GIS.

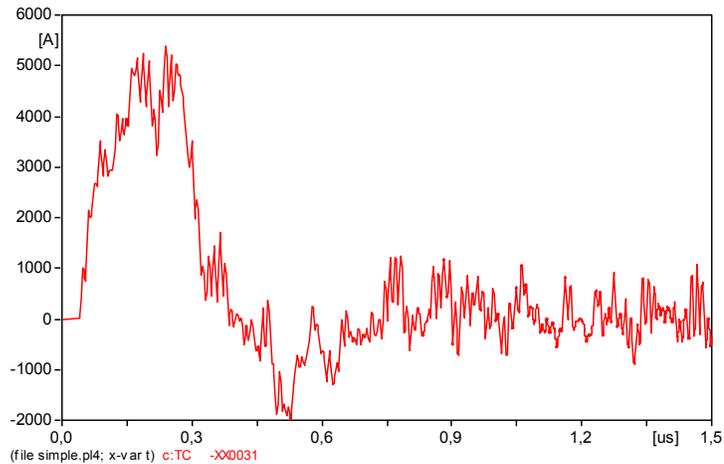


Figura 6.5 VFTC para SW3 en el TC incluyendo el modelo general de arco

A continuación en la tabla 6.1 se muestra una comparación de los modelos de arco implementados y los valores máximos del VFTC, la cual hace referencia los resultados obtenidos en la operación de cierre SW1.

Tabla 6.1 Comparación de valores del VFTC entre los modelos de arco

Modelo de arco	Operación de cierre SW1		
	Unión GIS-cable	Bus link	TC
Cassie	7.06	3.3	7.8
Mayr	6	2.8	6.8
Cassie-Mayr	5.9	3.4	6.8
M. General	6	3.4	6.8

* Los valores están en kA

En la tabla 6.1 se puede observar que los valores pico del transitorio de sobrecorriente ultra-rápido son muy similares entre cada modelo para una misma operación de cierre (SW1), este resultado lleva a la conclusión que la configuración de esta subestación

GIS contiene un VFTC el cual puede ser observado mediante la implementación de cualquiera de estos modelos de arco eléctrico.

En el capítulo anterior se obtuvo el espectro de frecuencia de los VFTC's en base a los resultados obtenidos, en el cual tomaba valores en MHz, de manera que algunos de estos valores de frecuencia toman importancia debido a la reflexión y refracción de las ondas viajeras y su velocidad de propagación la cual es muy alta en distancias de cambio de impedancias pequeñas.

Una de las recomendaciones más relevantes para este trabajo es el de encontrar valores de constante de tiempo θ más aproximados o con mayor precisión, que se ajusten mejor al modelo de arco el cual se desee implementar. Sin embargo esto debe estar apoyado no solo en el uso de un software si no también en pruebas físicas, lo cual hace más difícil la obtención de este parámetro.

Apéndice

A

Generalidades del software EMTP-ATP

En este apéndice se encuentra la descripción del software empleado en este proyecto, el cual comprende desde una breve descripción del software, la descripción de los elementos TACS, los cuales son de mucha relevancia para este trabajo, así como la construcción paso a paso de uno de modelos de arco eléctrico. Por otro lado también se describe de manera detallada el uso de las herramientas *comprimir*, la cual fue empleada dentro de la construcción del modelo de arco.

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.

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.

A.2. COMPONENTES TACS Y CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE ARCO ELÉCTRICO

El algoritmo de TACS fue escrito originalmente para la simulación de controles de convertidores de sistemas HVDC. Por primera vez, los sistemas transitorios de potencias y los sistemas de control pudieron ser modelados simultáneamente para el estudio de su interacción dinámica. El “sensor” toma señales del sistema de potencia (a menudo llamado la red) para la entrada del sistema de control (a menudo llamado TACS). Los comandos son compartidos del sistema de control al sistema de potencia como se muestra en la figura A2.1.

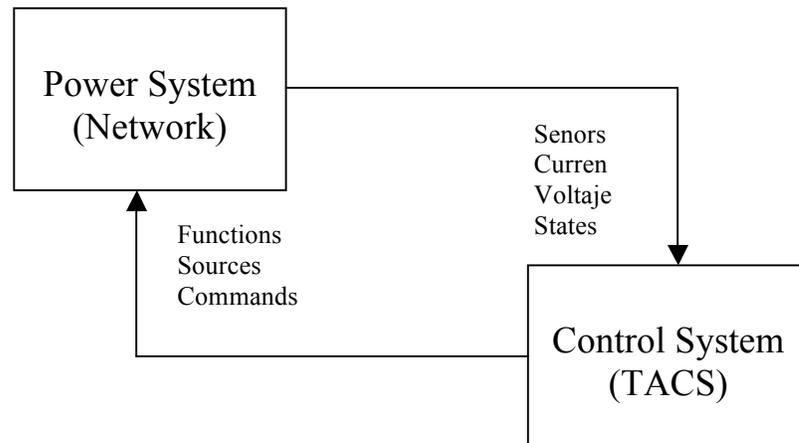
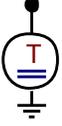
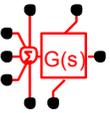


Figura A2.1 Interacción entre el sistema de potencia (red) y el sistema de control (TACS).

Para este proyecto se implementó el uso de TACS para la construcción de modelos de arco eléctrico, debido a que las ecuaciones matemáticas que componen dichos modelos de arco (ecuaciones lineales) solo pueden ser leídas por el software ATP-DRAW en bloques lógicos que se encuentran en el lenguaje FORTRAN.

A continuación en la Tabla A2.1 se muestran algunos de los elementos utilizados en la construcción de los modelos de arco, así como una breve descripción.

Tabla A2.1 Descripción de los componentes TACS

Componente TACS	Descripción
	Fuente de CD: Es la que proporcional el voltaje inicial al modelo de arco.
	Fortran statement: Este elemento realiza la matemática de la ecuación de la ecuación del modelo de arco.
	Función de transferencia: Aquí se encuentra el operador “s” de Laplace que contiene la ecuación del modelo de arco.
	Lector de TACS: Este elemento enlaza los valores de la red eléctrica a un nodo de TACS.
	Probador de TACS: Este elemento muestra los valores de las señales de salida de TACS en el graficador.
	Interruptor de tiempo controlado: Este interruptor es el que realiza la operación de cierre el cual es necesario para obtener los valores transitorios ya que cuenta con la opción de “recierre”.
	Resistencia controlada por TACS: Por medio de este elemento se enlaza al circuito el valor de la resistencia generada en el modelo de arco. Se conecta en paralelo con el interruptor para hacer la operación de cierre.

En base a los componentes TACS ya descritos, se procede a realizar la construcción del modelo de arco de Mayr; el cual comienza a diseñarse a partir de la ecuación de Mayr que se desarrolló en el capítulo 5. Dicha ecuación se llevó al dominio de Laplace para posteriormente ser implementada en el software ATP-DRAW con ayuda de los bloques lógicos.

A continuación se muestra un diagrama de bloques el cual descompone la ecuación de Mayr, que posteriormente será introducida en los bloques lógicos de TACS.

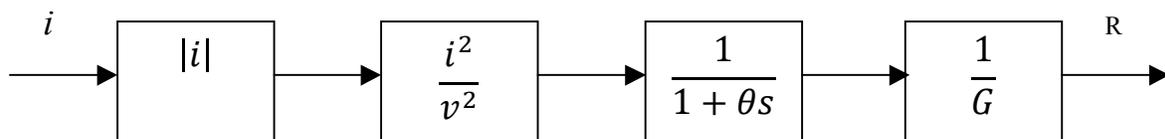


Figura A2.2 Diagrama de bloques de la ecuación de Mayr.

De acuerdo al diagrama de bloques de la figura A2.2 se procede a introducir cada una de las partes de la ecuación, como se muestra a continuación.

En el primer paso se utiliza el bloque lógico que se encuentra en el submenú de TACS, “Fortran statement” y se elige el elemento denominado “General”. Este primer bloque toma el valor de la corriente de la red a través del elemento *Lector TACS* y es convertido a su valor absoluto como se muestra en la figura A2.3.

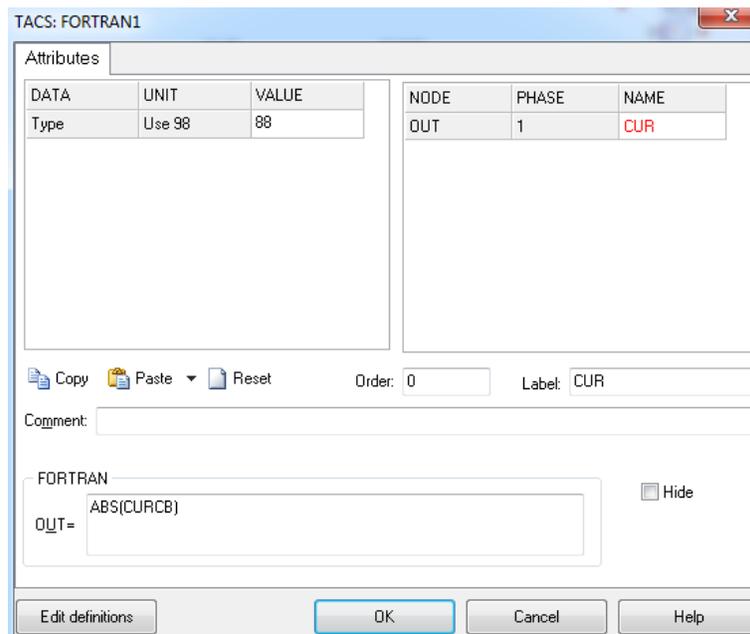


Figura A2.3 Primer bloque lógico FORTRAN

Siguiendo el diagrama de bloques, se introduce la fuente de voltaje (Figura A2.4), para cual se utiliza la fuente de CD mencionada en la Tabla A2.1., que inyectara el voltaje inicial de arco.

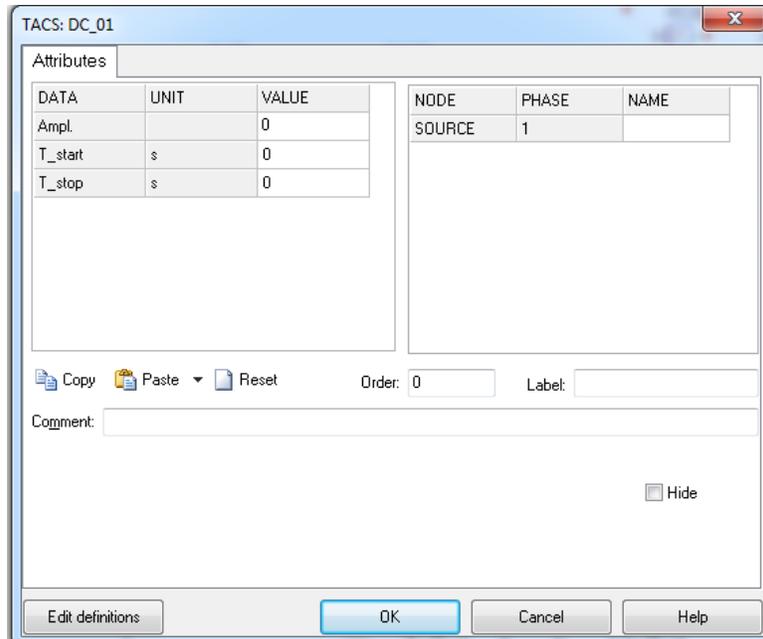


Figura A2.4 Ventana de ajustes de la fuente

En el segundo bloque FORTRAN se eleva al cuadrado el valor de la corriente y el voltaje obtenidos en los pasos anteriores así como se muestra en la figura A2.5.

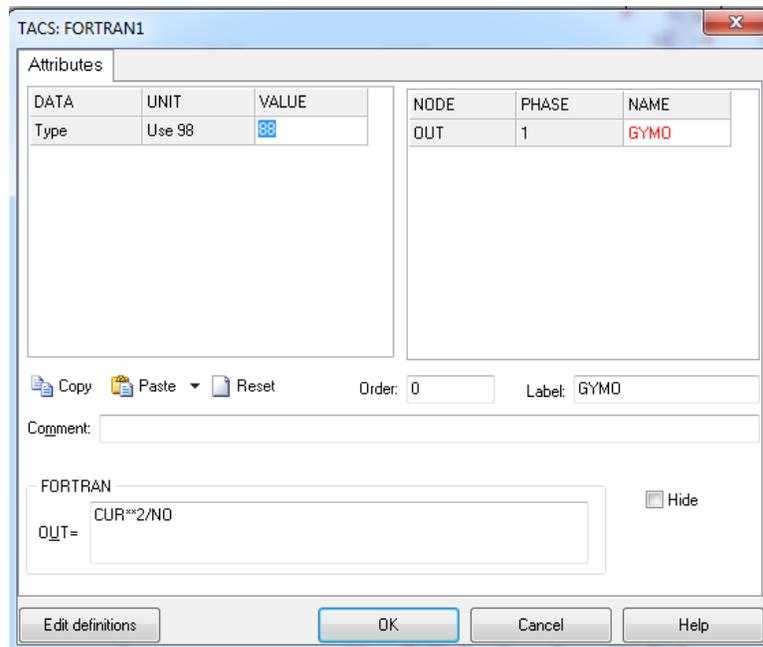


Figura A2.5 Segundo bloque lógico FORTRAN

En el siguiente paso se utiliza el elemento de función de transferencia, la cual define el valor de la constante característica del modelo de arco tal como se describe en el diagrama de flujo, tomando los valores del bloque anterior como se muestra en la figura A2.6.

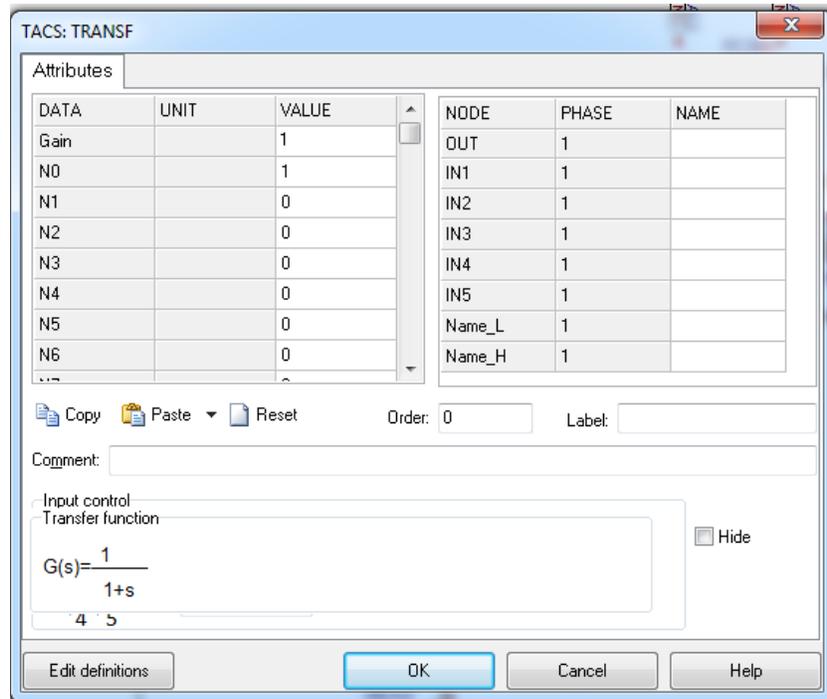


Figura A2.6 Ventana de ajustes de la función de transferencia

Como siguiente paso, se utiliza un bloque lógico FORTRAN (Figura A2.7) para obtener el inverso de la conductancia que fue calculada en el paso anterior y así obtener la resistencia de arco.

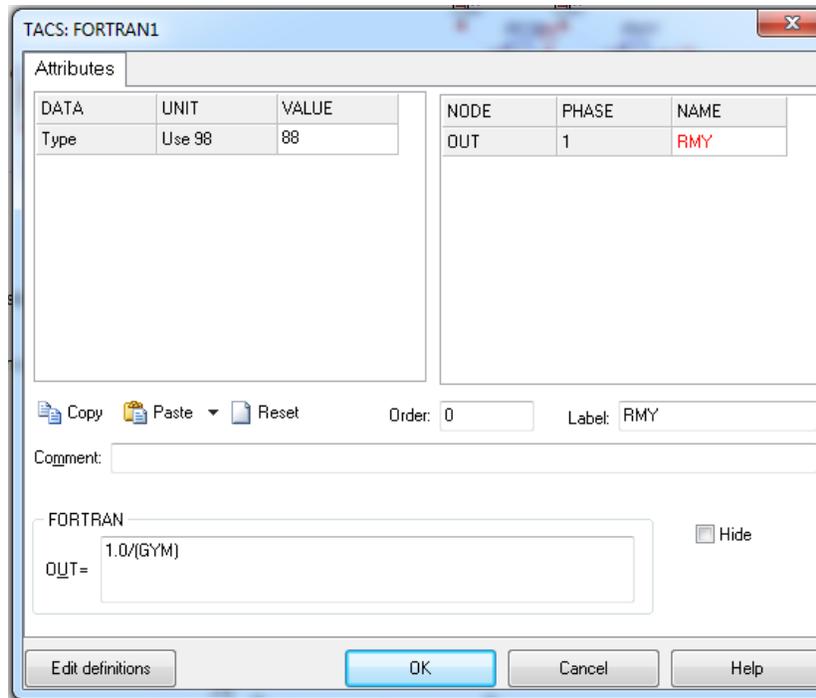


Figura A2.7 Tercer bloque lógico FORTRAN

Una vez construido el modelo de arco es necesario enlazar los valores obtenidos de los TACS a la red, para lo cual como ya se mencionó anteriormente es necesario utilizar una resistencia TACS, la cual debe ser correctamente direccionada en cada uno de sus nodos.

Con respecto a la construcción de los modelos de arco restantes (Cassie, Cassie-Mayr y Modelo General) fueron construidos con la misma metodología que el modelo descrito en este apéndice.

A.3. AGRUPAR EL MODELO DE ARCO A TRAVÉS DE LA FUNCIÓN *COMPRESS*.

Una vez que el modelo de arco se encuentra construido en su totalidad y sus parámetros están correctamente incluidos, es posible comprimir cada uno de los elementos que intervienen en dentro del modelo de arco, tanto los componentes TACS como los elementos que no lo son como el interruptor de tiempo controlado.

Para esto se debe seleccionar cada uno de los componentes y posteriormente en el menú *edición* se selecciona la opción *comprimir*, la cual desplegará una ventana de opciones como la que se muestra en la figura A3.1

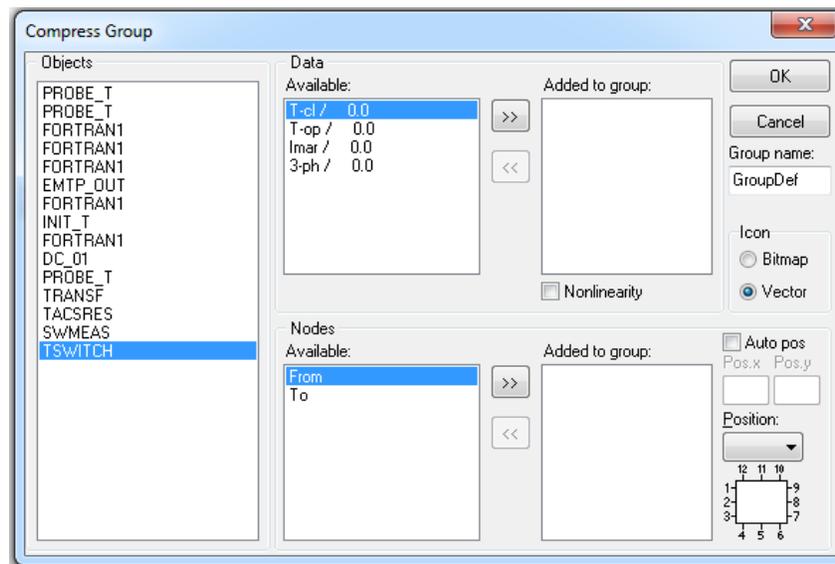


Figura A3.1 Ventana de ajustes de la herramienta *comprimir*

Esta ventana nos da la opción de agrega los parámetros o datos que se deseen agregar al nuevo elemento que se generará. En la figura A3.2 se muestran los parámetros más importantes para el modelo de arco tales como el tiempo de cierre del interruptor (T-cl), tiempo de apertura (T-op), la corriente máxima (Ima), el valor de la fuente de voltaje, y el valor de la constante de tiempo (θ).

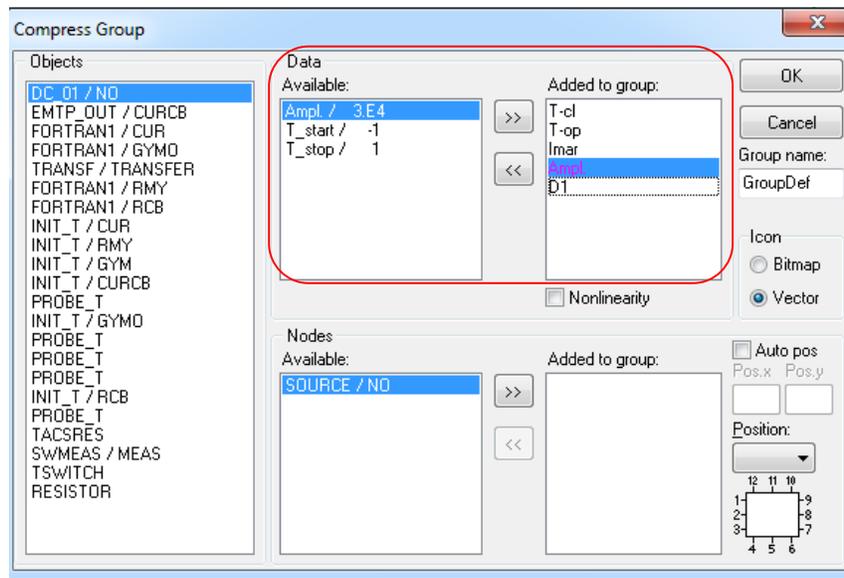


Figura A3.2 Ventana de ajustes para agregar variables

Un punto muy importante para que funcione correctamente este nuevo componente que representa el modelo de arco, es importante direccionar los nodos, es decir dentro del circuito o red la cual estamos analizando (modelo de la subestación GIS) debemos delimitar los nodos; desde donde queremos que inicie nuestro componente hasta el nodo en el cual se desea terminar. En la figura A3.3 se muestra dentro de la misma ventana de dialogo de herramienta *comprimir* el apartado *Nodos*.

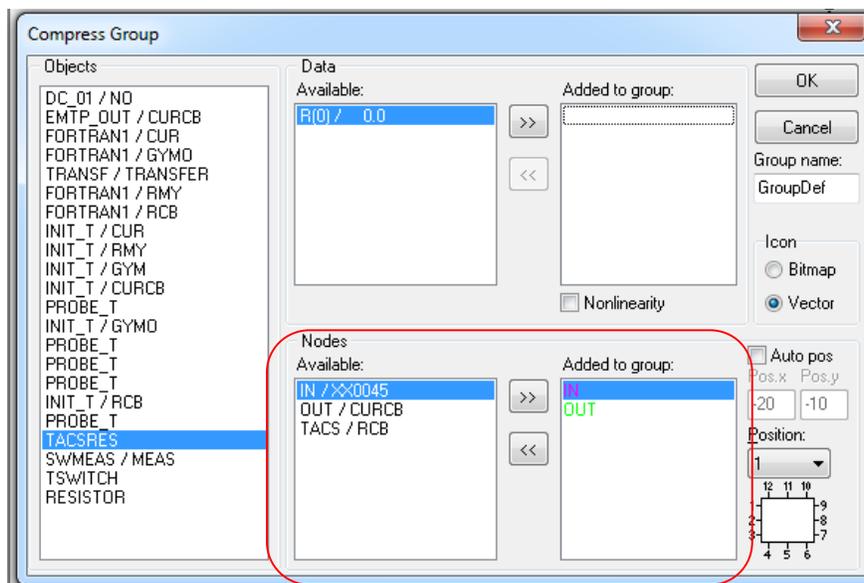


Figura A3.3 Ventana de ajustes para agregar los nodos

Una vez definidos los nodos de entrada y salida del componente es posible modificar la posición de dichos nodos, esta opción también es mostrada en la figura A3.3. Una vez terminadas estas modificaciones, podemos nombrar nuestro componente y oprimir *OK*, así de esta manera el software nos mostrará nuestro icono como muestra la figura A3.4



Figura A3.4 Icono representativo del modelo de arco

Este nuevo icono contiene todos los componentes que integran el modelo de arco, así mismo podemos acceder a su ventana de ajustes, como lo muestra la figura A3.5, la cual se puede modificar según la configuración que se le dio a este nuevo componente.

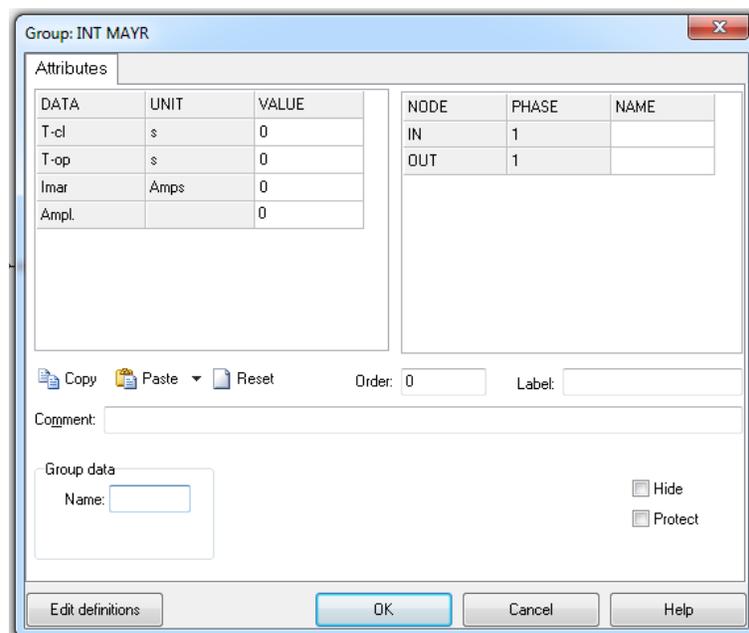


Figura A3.5 Ventana de ajustes del componente del modelo de arco.

Este nuevo componente puede ser modificado en la opción “*Edit definitions*” de la ventana de ajustes de la figura A3.5 y crear un icono con una figura diferente.