

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Maestría en Ingeniería Eléctrica



TESIS

MODELADO DE DESCARGAS PARCIALES EN SUBESTACIONES INDUSTRIALES EN SF6 PARA MEJORAR LA CONFIABILIDAD DEL SERVICIO UTILIZANDO PREDICCIÓN BASADA EN INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA

**Que para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería Eléctrica**

**Presenta
ING. ESTEBAN ALBERTO ALEJOS ORENDAY
G10070510**

**Director de Tesis
DR. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ**

**Co-Director de Tesis
M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ**



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO

Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cd. Madero, Tams., a **29 de Mayo de 2019**

OFICIO No.: U2.036/19
ÁREA: DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN
DE TESIS.

ING. ESTEBAN ALBERTO ALEJOS ORENDAY
NO. DE CONTROL G10070510
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. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
VOCAL:	M. C. HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS
SUPLENTE:	M. C. JOSÉ DE JESÚS DURÓN MENDOZA
DIRECTOR DE TESIS:	DR. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"MODELADO DE DESCARGAS PARCIALES EN SUBESTACIONES INDUSTRIALES EN SF6 PARA MEJORAR LA CONFIABILIDAD DEL SERVICIO UTILIZANDO PREDICCIÓN BASADA EN INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA"

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

Excelencia en Educación Tecnológica.
"Por mi patria y por mi bien"


DR. JOSÉ AARÓN MELO BANDA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



c.c.p.- Archivo
Minuta
JAMB 'RCG' jar



Av. 1º de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz Col. Los Mangos, C.P. 89440, Cd. Madero, Tam.

Tel. 01 (833) 357 48 20, e-mail: dir01_cdmadero@tecnm.mx

www.tecnm.mx | www.cdmadero.tecnm.mx

DEDICATORIAS

A mis padres:

Esteban Alejos Alvarado

Rosa Delia Orenday León

A mi esposa:

Cristell Aradillas Montalvo

A mi asesor de tesis:

Dr. Gastón Hernández Martínez

A mis familiares y amigos.

A cada uno de ellos por su apoyo incondicional en cada momento de mi carrera profesional.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a **DIOS**, por la vida que me ha dado y por haberme permitido lograr esta meta.

Agradezco a mis padres y mi esposa

Por estar a mi lado, apoyándome siempre y motivándome a seguir a delante en los buenos y malos momentos.

Agradezco a mi asesor

Por su apoyo, tiempo, conocimiento y amistad brindada durante mi la maestría para poder alcanzar este objetivo profesional.

Agradezco a mis amigos y compañeros de la maestría por la motivación que me dieron.

Modelado de Descargas Parciales en Subestaciones Industriales en SF₆ para Mejorar la Confiabilidad del Servicio Utilizando Predicción Basada en Interferencia Electromagnética.

Ing. Esteban Alberto Alejos Orenday

Resumen

En el presente trabajo de investigación se analiza el comportamiento de una descarga parcial en una subestación encapsulada en gas SF₆, mediante el uso del software ATP-DRAW, con el cual se pretende modelar la subestación GIS, implementando también, la construcción del modelo de una descarga parcial, este modelo esta basado en una combinación de herramientas del software llamada TACS (Transient Analysis Control Systems)

El modelo del arco eléctrico será utilizado, puesto que, se sabe que se produce un arco eléctrico, el cual sucede durante el lapso que dura la descarga parcial.

Modeling of partial discharges in industrial substations in SF6 to improve service reliability using electromagnetic interference-based prediction.

Abstract

In the present research work particle discharge behavior in Gas Insulated Station (GIS) is analyzed through the use of ATP-DRAW software, with which is intended to model the GIS, also implementing, the model construction a partial discharge, this model is based on a combination of software tools named TACS (Transient Analysis Control Systems).

The model of electric arc will be used, since, it is known that an electric arc is produced, which happens during the period that lasts the partial discharge.

Contenido

	<i>Página</i>
Resumen.....	i
Abstract	ii
Lista de Figuras	v
Lista de Tablas	vii
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Hipotesis.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivos específicos.....	3
1.4 Justificación.....	4
1.5 Ventajas y limitaciones.....	5
1.5.1 Ventajas.....	5
1.5.1 Limitaciones.....	5
1.6 Referencias.....	6
Capítulo 2: Marco teórico.....	7
2.1 Antecedentes.....	8
2.2 Características principales del gas SF ₆	9
2.3 Componentes de una subestación GIS.....	10
2.4 Configuración de una subestación GIS.....	16
2.5 Introducción a los transitorios.....	18
2.6 Fenómenos transitorios en subestaciones GIS.....	20
2.6.1 Transitorios ultra-rápidos (VFTO) (origen y propagación)	20
2.6.2 Origen y propagación del VFTO.....	21
2.6.3 Aumento transitorio de potencial a tierra (TGPR).....	22
2.7 Descarga parcial (PD)	23
2.7.1 Clasificación de descargas parciales más comunes	23
2.7.2 Causas principales que originan una descarga parcial.....	25
2.7.3 Métodos para detectar descargas parciales	25
2.8 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 subestación.....	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-DRAW.....	36
3.6	Modelado final en ATP-DRAW de la subestación GIS a 245 KV.....	40
3.7	Referencias.....	41
 Capítulo 4: Modelado de una descarga parcial.....		42
4.1	Origen y evolución del fenómeno de la DP.....	43
4.2	Patrón de DP en AC.....	44
4.3	Condiciones que definen una DP.....	44
4.4	Efectos que provocan las DPs.....	45
4.5	Clasificación de las DPs en CD.....	45
4.6	Modelos de clasificación de las DPs.....	47
4.7	Modelo ABC para una DP.....	49
4.8	Implementación del modelo ABC mediante ATP-DRAW.....	50
4.9	Referencias.....	51
 Capítulo 5: Simulación de la descarga parcial en la GIS a 245 KV		52
5.1	Simulación de la descarga parcial en la GIS a 245 KV sin carga.....	53
5.2	Simulación de la descarga parcial en la GIS a 245 KV implementando el modelo de la descarga parcial.....	55
	5.2.1 Caso número 1: Simulación de la GIS con la descarga parcial en el nodo de interfaz con la bahía	55
	5.2.2 Caso número 2: Simulación de la GIS con la descarga parcial en el nodo de la salida de la bahía 3.....	57
	2.6.3 Caso número 2: Simulación de la GIS con la descarga parcial en el cable de alimentación.....	59
5.3	Resultados de cada uno de los casos	61
 Capitulo 6: Conclusiones y recomendaciones.....		64

Lista de figuras

	<i>Página</i>
Figura 1.1	Modelo ABC para una descarga parcial (DP)..... 4
Figura 2.1	Primera subestación GIS de 800 kv (sistema de American Electric Power (USA)..... 8
Figura 2.2	Código de colores para una subestación GIS..... 10
Figura 2.3	Partes de una subestación GIS a 115 KV..... 10
Figura 2.4	Interruptor de potencia y cámara de extinción de auto soplado..... 11
Figura 2.5	Transformador de corriente principal de una subestación Gis..... 12
Figura 2.6	Transformador de tensión principal de una subestación GIS..... 13
Figura 2.7	Seccionador y seccionador de puesta a tierra combinados..... 13
Figura 2.8	Seccionador de puesta a tierra rápido..... 14
Figura 2.9	Modulo de conexiones de cables y terminales SF ₆ -Aire..... 15
Figura 2.10	Esquema unifilar de juego de barras simple..... 16
Figura 2.11	Esquema unifilar de juego de barra doble..... 16
Figura 2.12	Esquema unifilar de juego de barra simple más bypass de interruptor..... 17
Figura 2.13	Esquema unifilar de juego de barras en anillo..... 17
Figura 2.14	Esquema unifilar de interruptor y medio..... 17
Figura 2.15	Transitorio impulsivo por una descarga parcial..... 18
Figura 2.16	Transitorio oscilatorio por un banco de capacitores..... 19
Figura 2.17	Clasificación de transitorios electromagnéticos..... 20
Figura 2.18	Origen y propagación de los VFT'S..... 21
Figura 2.19	Mecanismo de generación de TEV de alta frecuencia..... 22
Figura 2.20	Descarga superficial..... 23
Figura 2.21	Descarga interna o en cavidades..... 24
Figura 2.22	Descarga por efecto corona o gaseosa..... 24
Figura 3.1	Diagrama unifilar de un Gis en SF ₆ a 245 KV..... 33
Figura 3.2	Red eléctrica equivalente de un Gis en SF ₆ 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 TI..... 39
Figura 3.10	Modelado en ATP-DRAW de la subestación GIS a 245 KV..... 40
Figura 4.1	Campo eléctrico en un sistema de aislamiento..... 43
Figura 4.2	Fenómeno de Descargas parciales..... 43
Figura 4.3	Patrón de descargas parciales en elipse..... 44
Figura 4.4	Magnitud de la DP durante un aumento gradual de la tensión de prueba..... 46
Figura 4.5	Representación de la magnitud de las DPs en función del tiempo para cuatro efectos distintos..... 47
Figura 4.6	Representación de la densidad de probabilidad de las DPs en función de la magnitud de estas para cuatro efectos distintos..... 48
Figura 4.7	Modelo ABC para una descarga parcial..... 49

Figura 4.8	Circuito para generar una DP.....	50
Figura 4.9	Modelo final de la DP.....	50
Figura 5.1	Subestación GIS a 245 KV en ATP-DRAW.....	53
Figura 5.2	Efecto producido por las capacitancias.....	54
Figura 5.3	Voltaje inducido.....	54
Figura 5.4	DP en la entrada a la bahía 3 de la GIS a 245 KV.....	55
Figura 5.5	DP en la entrada a la bahía 3 de la GIS a 245 KN tomada de GIS-CABLE....	56
Figura 5.6	DP en la entrada a la bahía 3 de la GIS a 245 KN tomada de BUS-LINK.....	56
Figura 5.7	DP en la salida a la bahía 3 de la GIS a 245 KV.....	57
Figura 5.8	DP en la salida a la bahía 3 de la GIS a 245 KN tomada de GIS-CABLE....	58
Figura 5.9	DP en la salida a la bahía 3 de la GIS a 245 KN tomada de BUS-LINK.....	58
Figura 5.10	DP en el cable de alimentación de la GIS a 245 KV.....	59
Figura 5.11	DP en la entrada a la bahía 3 de la GIS a 245 KN tomada de GIS-CABLE....	60
Figura 5.12	DP en la entrada a la bahía 3 de la GIS a 245 KN tomada de BUS-LINK.....	60

Lista de tablas

		<i>Página</i>
Tabla 2.1	Propiedades físico-químicas de gas SF6 (USA).....	9
Tabla 3.1	Modelado de algunos elementos típicos de subestaciones aisladas en SF6	30
Tabla 3.2	Capacitancias sugeridas para algunos elementos de una subestación GIS	32
Tabla 3.3	Representación equivalente de los componentes de un GIS	34
Tabla 4.1	Clasificación de DPs de acuerdo a su naturaleza	45
Tabla 5.1	DP a la entrada de la bahía 3.....	61
Tabla 5.2	DP a la salida de la bahía 3.....	61
Tabla 5.3	DP en el cable de alimentación.....	61
Tabla 6.1	Resultados de la DP para cada caso simulado	63

Capítulo

1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo presentan principalmente los puntos importantes de esta investigación tales como; el planteamiento del problema, que es el punto principal y el motivo por el cual se inició con este proyecto, justificación y los objetivos que se han propuesto para este trabajo.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

No es fácil detectar una posible falla en una Subestación GIS ante una descarga parcial, hoy en día existen aparatos de medición para descarga parcial, estos son costosos.

Cada Subestación GIS está diseñada con distintos parámetros de acuerdo con las necesidades del cliente, este tipo de subestaciones son muy costosas, su mantenimiento es costoso, tienen la ventaja de que el mantenimiento es a largo plazo, sin embargo, al presentarse una descarga parcial en el sistema, podemos decir que su tiempo de vida útil se reduce.

Una subestación encapsulada, el gas SF₆ (hexafluoruro de azufre), siendo este el medio aislante, ante estas descargas va perdiendo sus propiedades, ya que al existir una descarga parcial puede desprenderse una pequeña parte metálica del encapsulado, produciendo una falla a tierra, también estas descargas pueden provocar desgastes en los contactos entre sus componentes, lo que produce descargas coronas y posteriormente rompimiento del dieléctrico.

En la actualidad ya existen softwares industriales, los cuales nos permiten realizar estudios virtuales de simulación, pero ninguno de Subestaciones GIS, por lo que modelando apropiadamente la subestación en un software flexible y gratuito y de acuerdo con los resultados arrojados, se puede determinar el daño causado por una descarga parcial, ya que este tipo de estudios solo son para casos específicos de cada subestación.

1.2 HIPÓTESIS.

A partir del análisis del espectro electromagnético de radiofrecuencia producida por arco eléctrico microscópico, se podrá identificar y predecir la presencia de descargas parciales.

1.3 OBJETIVOS

Objetivo general:

- Desarrollar un modelo computacional para simular el fenómeno de descarga parcial en una Subestación GIS, donde se interactúe con cada uno de sus componentes para predecir la falla de línea a tierra empleando el análisis del espectro electromagnético de radiofrecuencia.

Objetivos específicos:

- Utilizar un software gratuito para el modelado de una descarga parcial.
- Observar el comportamiento de una subestación GIS ante una descarga parcial y analizar el espectro de radiofrecuencia para predecir la ocurrencia de una falla severa.

1.4 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad se han creado diversos softwares para aplicaciones industriales, los cuales son una gran ventaja el ámbito industrial, ya que con estos softwares se logra una descripción amplia de lo que sucede internamente en el sistema que se modela, la utilización de los software forman parte de mantenimiento predictivo, el cual es muy importante en cualquier industria o empresa, ya que con este método se logra un mejor desempeño en sus equipos y maquinaria, como consecuencia de una mayor eficiencia en sus procesos en general.

En este caso estaremos realizando estudios en una Subestación encapsulada (GIS), donde el mantenimiento predictivo es muy importante, porque de acuerdo con los resultados que se obtendrán, se determinará el grado de contaminación que podría generar las descargas parciales y consecuentemente una falla de línea a tierra.

Se utilizará el siguiente circuito equivalente como modelo de referencia para entender el comportamiento básico de una descarga parcial conocido como modelo ABC:

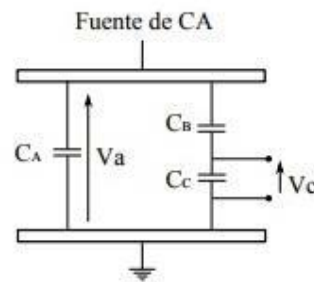


Figura 1.1 Modelo ABC para una descarga parcial (DP). [1]

Para comprobar los resultados de este proyecto se utilizarán como referencia artículos y publicaciones que están relacionadas con las descargas parciales, ya que este proyecto presentará simulaciones, se compararán las gráficas obtenidas en las publicaciones con los resultados que se obtendrán en este trabajo.

1.5 VENTAJAS Y LIMITACIONES

1.5.1 VENTAJAS

- Con los resultados obtenidos en las simulaciones, se podrá identificar y predecir una descarga parcial, dejando a un lado la antena UHF, la cual tiene un costo muy elevado, y con este proyecto se reducirá el costo de este elemento, comparando los resultados de la simulación con el equipo real.

1.5.2 LIMITACIONES

- Este estudio incluirá sistemas eléctricos de una subestación GIS.
- Se realizará el estudio mediante el software gratuito ATP.
- Únicamente se analizará un caso en específico.
- Solo es válido para el tiempo y periodo de los casos que se presentaran.
- No podrá llevarse a cabo en una subestación real debido a que debe diseñarse una antena apropiada y el sistema de recepción de la radiofrecuencia.

1.6 Referencias

- [1] Detección y localización de descargas parciales en devanados de transformadores de potencia usando modelos de alta frecuencia
M.C. Daniel Guillén Aparicio (Tesis Doctoral)
Universidad Autónoma de Nuevo León.

Capítulo

2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta la investigación teórica de la base de este proyecto, desde los datos históricos y componentes de una subestación encapsulada, así como también, se muestran los fenómenos transitorios, entre ellos la descarga parcial y la interacción con la subestación GIS.

2.1 ANTECEDENTES [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:

- 1) El auge de la técnica empleada para el corte del arco en los interruptores de alta tensión que utilizan el gas SF₆.
- 2) El intenso desarrollo informático alcanzado para los medios de cálculo y la utilización de modelos de diseño y por la técnica de corte de arco eléctrico basada en la expansión térmica y ayuda a la apertura.

Se consiguen así espacios reducidos que utilizan la energía de resortes, de forma similar a las cámaras de los interruptores de media tensión. En efecto, el conocimiento de los fenómenos involucrados en el arco eléctrico 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 arco, de simulación de redes para el estudio del arco asociado con una red, etc.

Así, se llega a las GIS modernas, de muy reducidas dimensiones, de alta confiabilidad, con materiales de alto rendimiento y durabilidad y de muy bajo mantenimiento. Los costos cada vez más atractivos 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.



Figura 2.1 Primera Subestación GIS de 800 kV (Sistema de American Electric Power (USA))

2.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL GAS SF₆ [1]

La fórmula química del gas hexafluoruro de azufre es: SF₆

Tabla 2.1 *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 (25 °C, 1 atm)	0,0001 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 primera época, se comprueba la excelente estabilidad química del SF₆ sometido a un arco eléctrico. Este acontecimiento permite prever el éxito posterior que tendrá 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 se logra especialmente debido a que su disociación es reversible y, además, a que posee una gran estabilidad termina

2.3 COMPONENTES DE UNA SUBESTACIÓN GIS

A CONTINUACIÓN, SE MUESTRAN LOS COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA SUBESTACIÓN GIS [2]

Para una subestación GIS, se tiene su propio código de colores para diferenciar cada uno de sus componentes, sean internos o externos. Mostrados en la figura 2.2



Figura 2.2 Código de colores para una subestación GIS

Las Subestaciones GIS tienen sus partes bajo tensión aisladas en gas hexafluoruro de azufre (SF₆), en lugar de aislación en aire como en las Subestaciones AIS. Cada equipo de alta tensión, incluyendo las barras principales o colectoras, está encapsulado independientemente en un compartimiento 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:

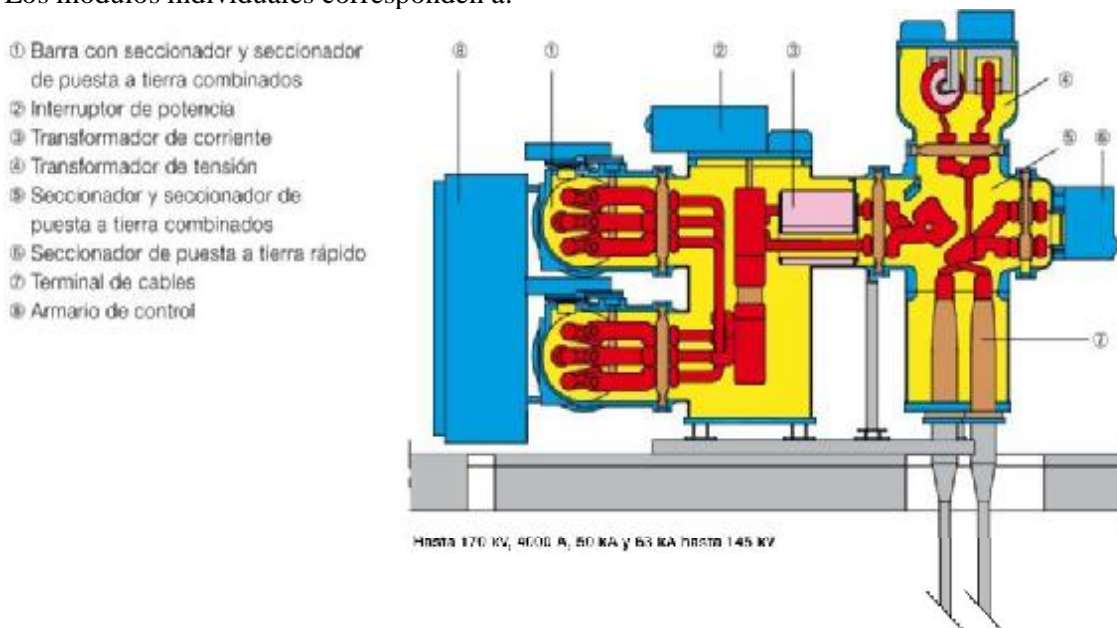


Figura 2.3 Partes principales de una subestación GIS a 115 KV.

1) Barra con seccionador y seccionador de puesta a tierra combinados [2].

Este módulo contiene los conductores de barra y seccionador / seccionador de puesta a tierra de barra. Esto permite al seccionamiento y la puesta a tierra segura del interruptor de potencia asociado.

2) Interruptor de potencia [2]:

Los interruptores de potencia son los módulos más importantes de una subestación. Su gran flexibilidad influye de forma considerable en la posibilidad de ahorro de espacio de toda la subestación.

Estos poseen básicamente una cámara de extinción bajo el principio de auto soplado con una cámara de interrupción por polo. Necesitan muy poco mantenimiento y una mínima energía para su operación.

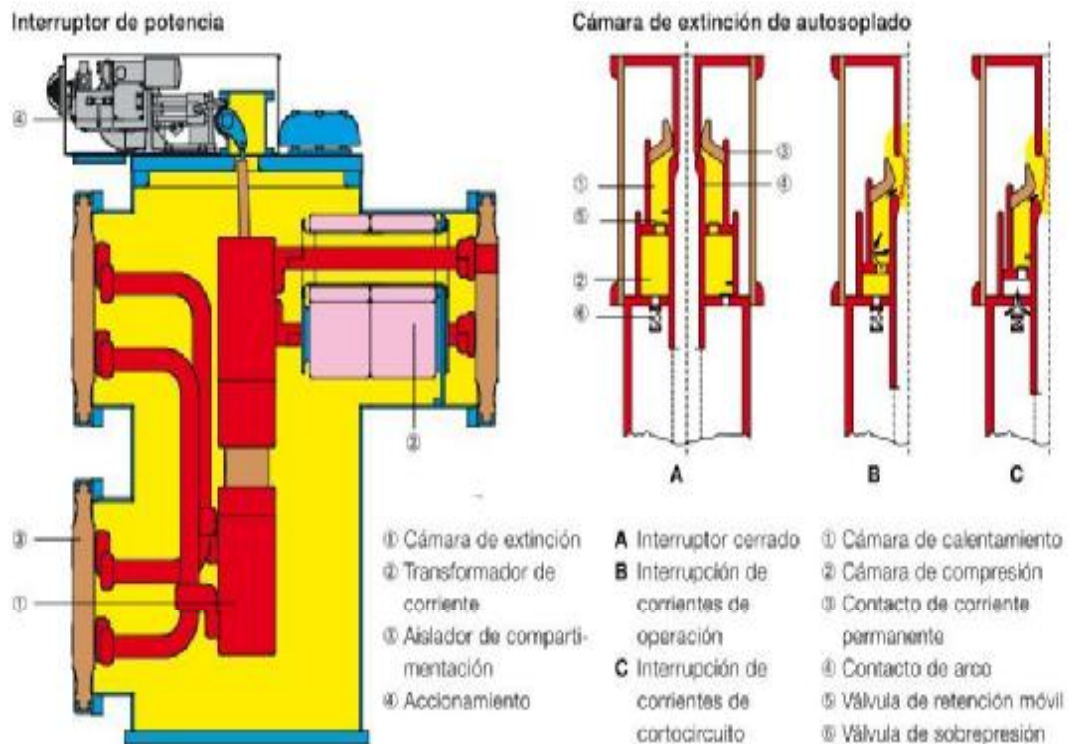


Figura 2.4 Interruptor de potencia y cámara de extinción de auto soplado

3) Transformador de corriente [2]:

El transformador de corriente está diseñado para baja tensión. Las relaciones de transformación, potencias secundarias y clases de precisión disponibles cumplen con las exigencias normales de la tecnología de medida y protección.

Los transformadores de corriente están diseñados como transformadores toroidales y pueden ser montados según el concepto de protección, antes o después del interruptor de potencia. Generalmente están integrados en la brida de salida del interruptor de potencia. En caso de potencias especialmente grandes se dispone de tres diferentes envoltentes con bridas de conexión de diferentes tamaños.

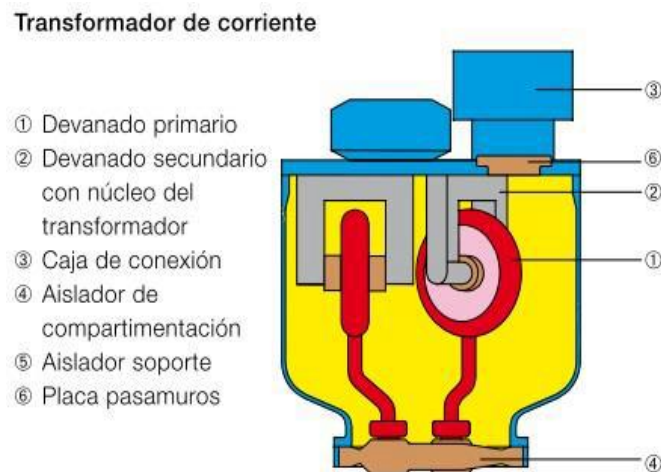


Figura 2.5 Transformador de corriente principal de una subestación GIS

4) Transformador de tensión [2]:

La línea de transformadores de tensión abarca además de la ejecución estándar variantes con elementos de amortiguación para evitar resonancias férricas, como transformadores de tensión con desconectador integrado.

Además del dispositivo de desconexión accionado por motor también se dispone de un dispositivo manual. Los transformadores de tensión con dispositivo de desconexión integrado son usados comúnmente cuando se requiera realizar una prueba de alta tensión del cable y el transformador de tensión esté conectado del lado del cable.

En el lado secundario del transformador de tensión se pueden prever devanados de medida y un devanado en triángulo abierto para la detección de fallas a tierra.



Figura 2.6 Transformador de tensión principal de una subestación GIS

5) Seccionador y seccionador de puesta a tierra combinados [2]:

El módulo de seccionador / seccionador de puesta a tierra permite la conexión de un transformador de tensión. Según las necesidades, esta conexión eléctrica se puede realizar antes o después del seccionamiento, de forma que la tensión medida sea del lado de la subestación o del lado de la salida. La brida de conexión para el transformador de tensión sirve a su vez como brida de conexión para equipos de prueba de alta tensión o para pruebas de cables de potencia. Por lo general, el módulo seccionador / seccionador de puesta a tierra es combinado con un transformador de tensión, un seccionador de puesta a tierra rápido, un módulo de conexión de cables de alta tensión o con un conducto y terminales SF₆-Aire para conexión a línea aérea. El módulo de seccionador / seccionador de puesta a tierra puede ser equipado con contacto a tierra aislable.

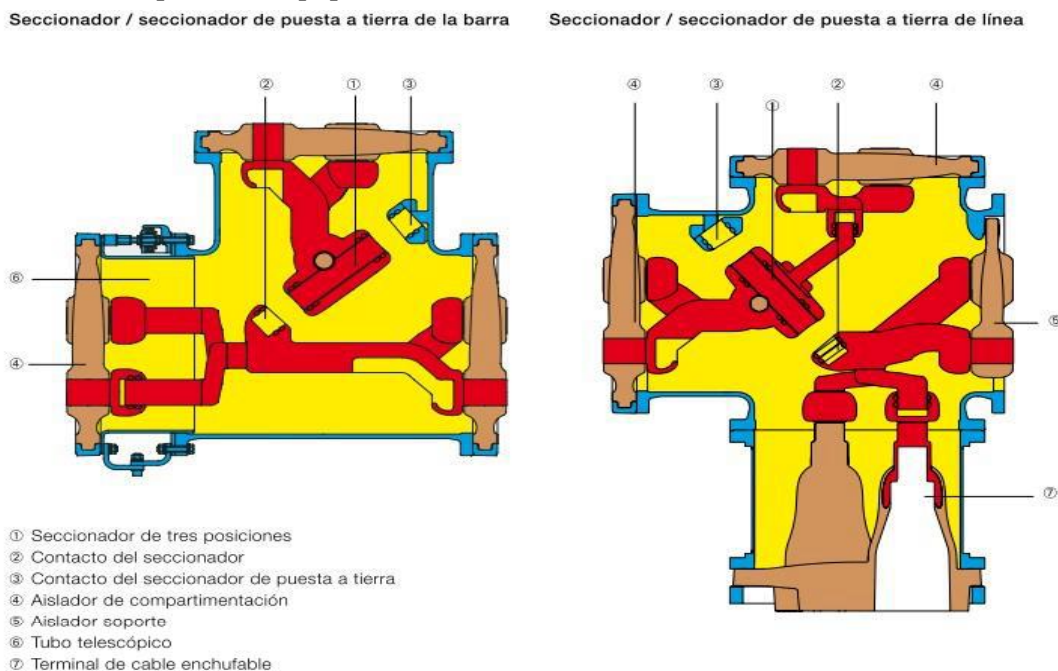


Figura 2.7 Seccionador y seccionador de puesta a tierra combinados

6) Seccionador de puesta a tierra rápido [2]:

El seccionador de puesta a tierra rápido puede operar de forma segura toda la corriente de cortocircuito. Este puede ser colocado tanto del lado de la barra como del lado de la línea, reduciendo de esta manera los efectos de una maniobra indebida.

El seccionador de puesta a tierra rápido está equipado con un accionamiento a resorte, que consigue una alta velocidad de operación de los tres contactos móviles. El accionamiento es tensado por medio de un motor eléctrico y contiene todos los componentes necesarios para una operación mecánica segura y funciones de enclavamiento fiables.

Al igual que en el seccionador / seccionador de puesta a tierra combinado, los indicadores de posición y los interruptores auxiliares están integrados al accionamiento. Por esta razón siempre se obtiene una información precisa de la posición del equipo. Por medio de una manivela, el seccionador de puesta a tierra rápido también puede ser operado manualmente.

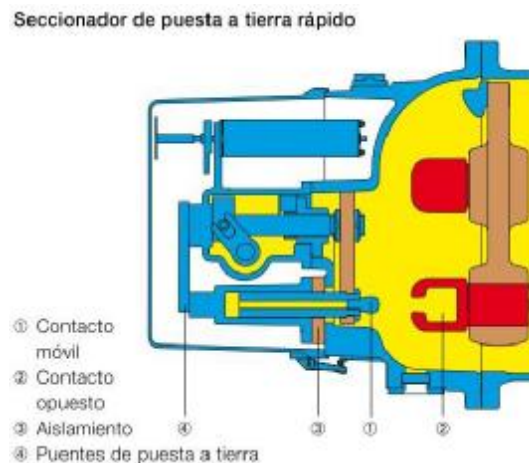


Figura 2.8 Seccionador de puesta a tierra rápido

7) Botella terminal de cables (Modulo de conexiones de cables y terminales SF₆-Aire) [2]:

Los módulos de conexión de cables permiten la conexión de cualquier tipo de cable. Se dispone de módulos de conexión adecuados para la conexión de cables (XLPE) o cables con aislamiento líquido.

Las terminales de cables estándar cumplen por supuesto con la norma CEI 62271-209. Esta garantiza compatibilidad con los terminales de cable, independientemente de cuál sea el fabricante. Para cables especiales ofrecemos otros tipos de terminales de cables. Las terminales SF₆-AIRE permiten la conexión de la subestación encapsulada a líneas aéreas o a transformadores de potencia. Preferiblemente se utilizan terminales SF₆-AIRE con aisladores de material sintético. Estos son fabricados con un tubo de fibras reforzadas en resina epóxica y recubierto con una funda con aletas de silicona. Estos terminales son irrompibles, no explosivos, fáciles de manejar y gracias al material aislante hidrofóbico presentan un comportamiento muy estable ante agentes externos.



Figura 2.9 *Modulo de conexiones de cables y terminales SF₆-Aire*

8) Armario de control [2]:

En los armarios de control se encuentran los dispositivos auxiliares eléctricos necesarios para el control del de mando, notificación de eventos, enclavamientos, etc. Las funciones fundamentales de un armario de control abarcan:

- 1) Control local e indicación de los estados de operación por medio de dispositivos de control e indicadores de posición.
- 2) Realización de funciones de enclavamiento para la protección de la subestación y del personal de servicio.
- 3) Registro e indicación de valores operacionales (corriente, tensión).
- 4) Visualización de alarmas y avisos de fallos, como también contadores de operaciones.

2.4 CONFIGURACIÓN DE UNA SUBESTACION GIS

ENTRE LAS MÁS COMUNES SE ENCUENTRAN: [3]

1) Juego de barra simple

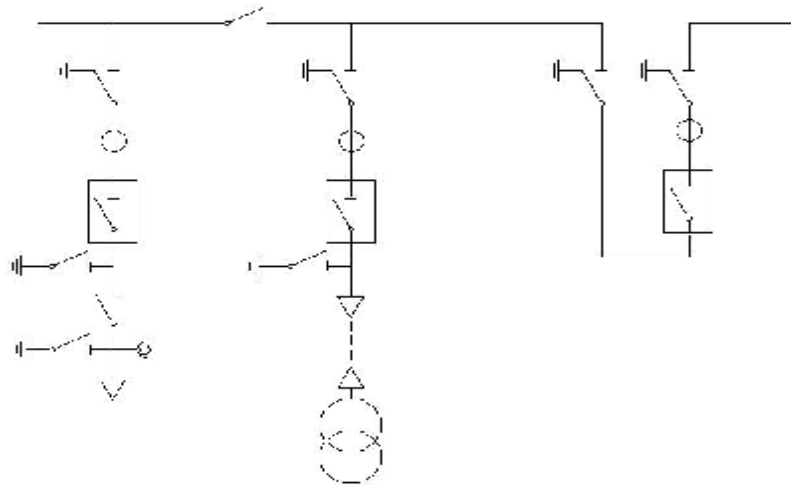


Figura 2.10 Esquema unifilar de juego de barra simple

2) Juego de barras dobles

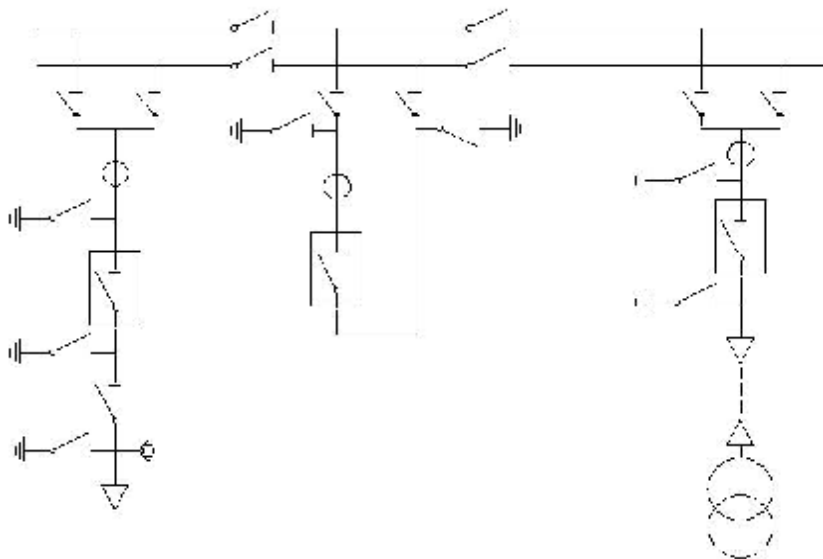


Figura 2.11 Esquema unifilar de juego de barra doble

3) Juego de barra simple más bypass de interruptor

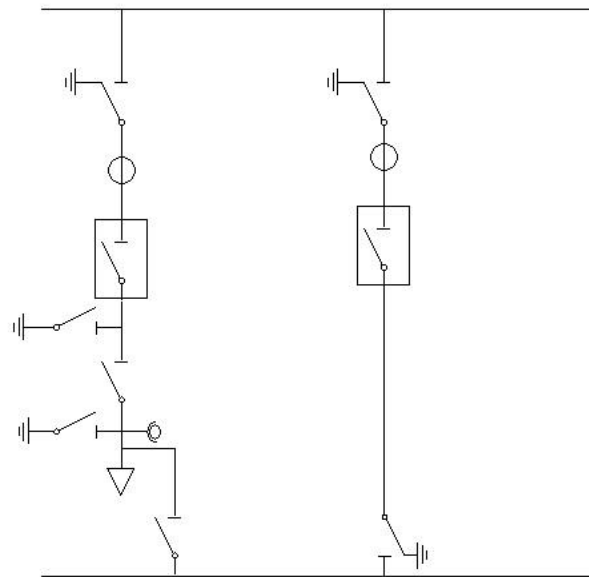


Figura 2.12 Esquema unifilar de juego de barra simple más bypass de interruptor

4) Juego de barras en anillo

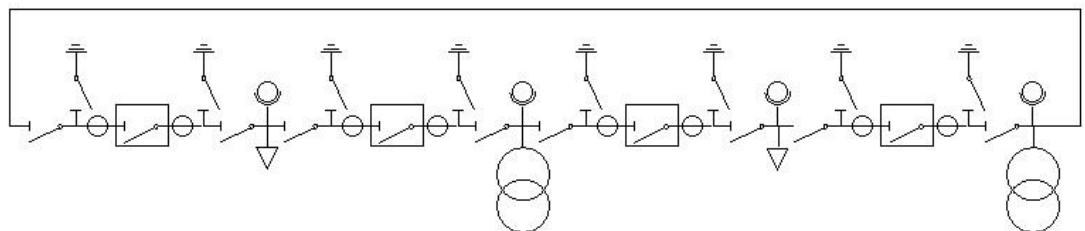


Figura 2.13 Esquema unifilar de juego de barras en anillo

5) Interruptor y medio

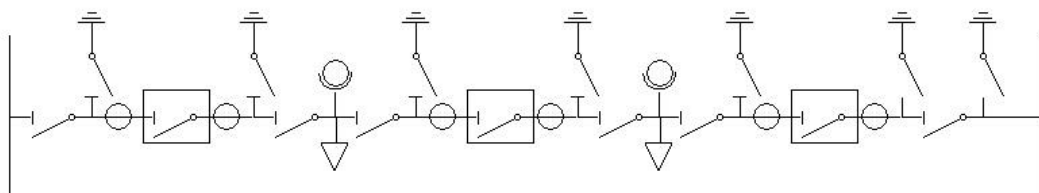


Figura 2.14 Esquema unifilar de interruptor y medio

2.5 INTRODUCCIÓN A LOS TRANSITORIOS [4]

Los transitorios, que son potencialmente el tipo de perturbación energética más perjudicial, se dividen en:

2.5.1 Impulsivos: los cuales son eventos repentinos de cresta alta que elevan la tensión y/o los niveles de corriente en dirección positiva o negativa. Estos tipos de eventos pueden clasificarse más determinadamente por la velocidad a la que ocurren (rápida, media y lenta). Pueden ser eventos muy rápidos (5 nanosegundos [ns]) de tiempo ascenso desde estado estable hasta la cresta del impulso) de una duración breve (menos de 50 ns).

Las causas principales de estos eventos incluyen rayos, puesta a tierra deficiente, encendido de cargas inductivas, liberación de fallas de la red eléctrica y ESD (descarga electrostática).

Las consecuencias pueden ir desde la pérdida de datos, hasta el daño físico de los equipos, de todas estas causas el rayo es probablemente la más perjudicial.

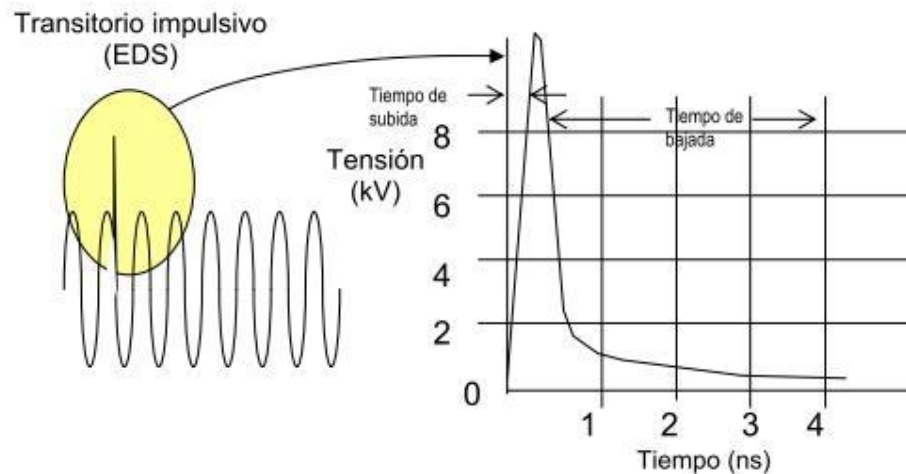


Figura 2.15 Transitorio impulsivo por una descarga electrostática

2.5.2 Oscilatorios: es un cambio repentino en la condición de estado estable de la tensión o la corriente de una señal, o de ambas, tanto en los límites positivo como negativo de la señal, que oscila a la frecuencia natural del sistema. En términos simples, el transitorio hace que la señal de suministro produzca un aumento de tensión y luego una bajada de tensión en forma alterna y muy rápida. Estos suelen bajar a cero dentro de un ciclo.

Estos eventos ocurren cuando uno conmuta una carga inductiva o capacitiva, como un motor o un banco de capacitores, otro ejemplo de este transitoria es que un sistema de distribución grande puede actuar como un oscilador cuando se conecta o desconecta el suministro, dado que todos los circuitos poseen alguna inductancia inherente y capacitancia distribuida que brevemente se energiza en forma descendente.

Cuando los transitorios oscilatorios aparecen en un circuito energizado, generalmente a consecuencia de operaciones de conexión de la red eléctrica (especialmente cuando los bancos de capacitores se conectan automáticamente al sistema), pueden ser muy perturbadores para los equipos electrónicos.

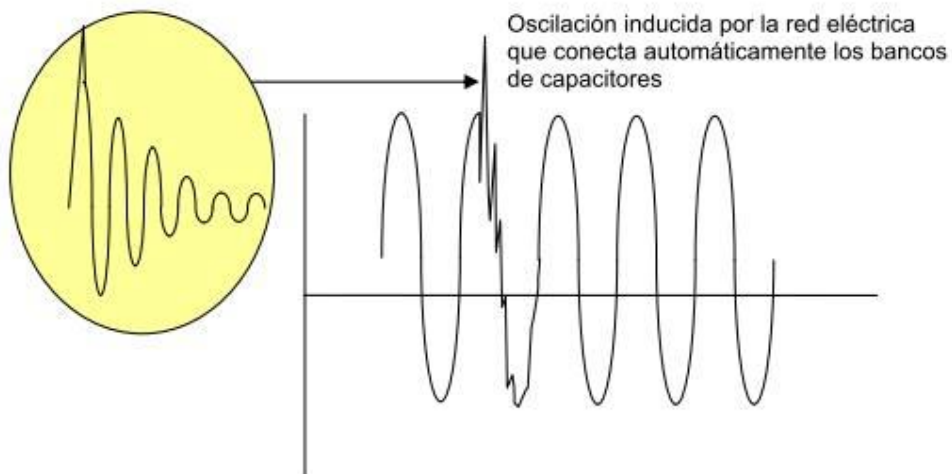


Figura 2.16 Transitorio oscilatorio por un banco de capacitores

2.6 FENÓMENOS TRANSITORIOS EN SUBESTACIONES GIS

Esta parte del capítulo está enfocado en los transitorios más importantes al hablar de subestaciones aisladas en gas SF₆, que son los transitorios ultra-rápidos de sobrevoltaje (very fast transient overvoltaje por sus siglas en ingles VFTO), aumento transitorio de potencial a tierra (transient ground potential rise por sus siglas en ingles TGPR).

2.6.1 Transitorios ultra-rápidos (VFTO) (origen y propagación) [5]

Los VFTO pertenecen a la gama de frecuencia más alta de transitorios en sistemas de potencia. Modelos de componentes que se utilizan en simulaciones de transitoria ultra rápidos, y deben ser adecuados para frecuencias que varían desde 100KHz hasta 50MHz, dichos valores se encuentran en la figura 2.17.

Clases de sobrevoltajes	Baja Frecuencia		Transitorios		
	Permanente	Temporal	Frente lento	Frente Rápido	Frente Muy Rápido
Forma de onda de voltajes y sobrevoltajes					
Rango de formas de onda de voltajes y sobrevoltajes	$f = 50 \text{ Hz}$ or 60 Hz $T_1 \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_1 \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_1 \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Parámetros de voltaje estandarizado					Ø
	$f = 50 \text{ Hz}$ or 60 Hz $T_1 = "$	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	Ø
Ensayo de voltaje tolerado normalizado	Ø	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo de impulso tipo manobra	Ensayo de impulso tipo rayo	Ø

Figura 2.17 Clasificación de transitorios electromagnéticos [6]

2.6.2 Origen y propagación del VFTO [5].

Se originan en las subestaciones encapsuladas en Gas SF₆ de alta tensión como consecuencia directa de las operaciones de maniobras de seccionadores e interruptores y también son originados por descargas dieléctricas en el Gas SF₆, o sea, son resultados de la disrupción (abrupta) del Gas SF₆ aislante bajo los efectos del arco eléctrico. Estos transitorios generalmente tiene un tiempo muy breve, en el intervalo de 4 a 100 ns, y normalmente seguido de oscilaciones que tienen frecuencias en el rango de 1 a 50 MHz. Su magnitud es en el rango de 1,5 a 2,5 p.u. del voltaje de línea a neutro, pero también pueden alcanzar valores altos como 2,5 p.u.

La propagación de estos transitorios, se extienden a lo largo de la subestación GIS, ya que se pueden producir sobretensiones internas y externas, la principal preocupación son las sobretensiones internas en el conductor central y la carcasa, una sobretensión externa puede ser peligrosa para equipos secundarios y adyacentes. Esta propagación se realiza bajo los conceptos de la teoría de propagación de ondas viajeras en conductores eléctricos, reflejando y refractándose en los puntos de discontinuidades eléctricas de las subestaciones encapsuladas, por tanto, su comportamiento depende de la configuración donde ocurre el evento.

La figura 2.18 muestra de forma resumida cómo los transitorios rápidos se originan y se propagan en la Subestación y equipos adyacentes.

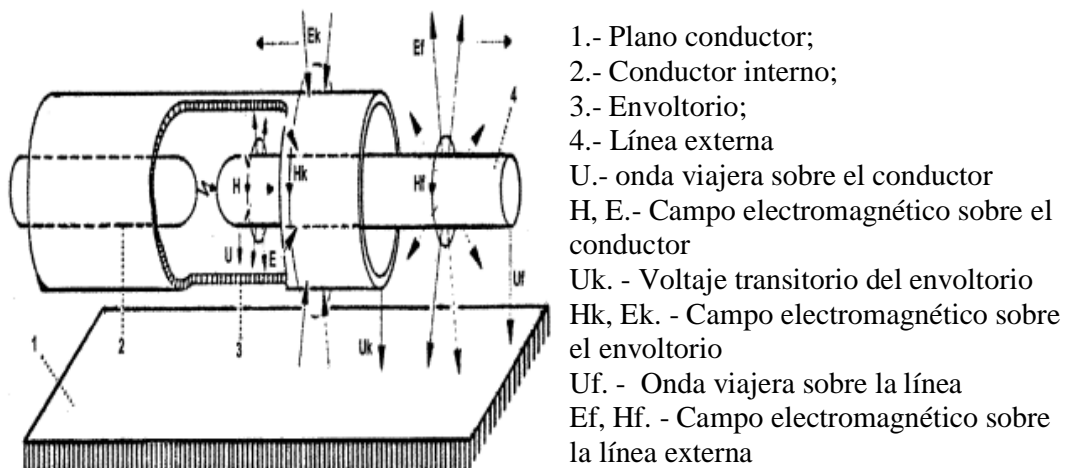


Figura 2.18 Origen y propagación de los VFT'S

2.6.3 Aumento transitorio de potencial a tierra (TGPR) [5].

Es un fenómeno transitorio muy rápido, el cual es un VFT externo y se encuentra en las carcasas metálicas aterrizadas de los sistemas de las GIS. Típicamente, las tierras conducidas son demasiado grandes (inductivas) a la frecuencia de interés para prevenir efectivamente la ocurrencia de un TEV. El fenómeno también se conoce como el aumento transitorio de tierra (TGR) o como el aumento transitorio de potencial a tierra (TGPR).

El TEV (transitorio encapsulado de voltaje), 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 la 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 representarse con oscilaciones de baja y de alta frecuencia. Usualmente las oscilaciones de alta frecuencia son más comunes. Los TEV's puede también aparecer en otros puntos del encapsulado tales como los espaciadores para TC's y en partes de inspección visual.

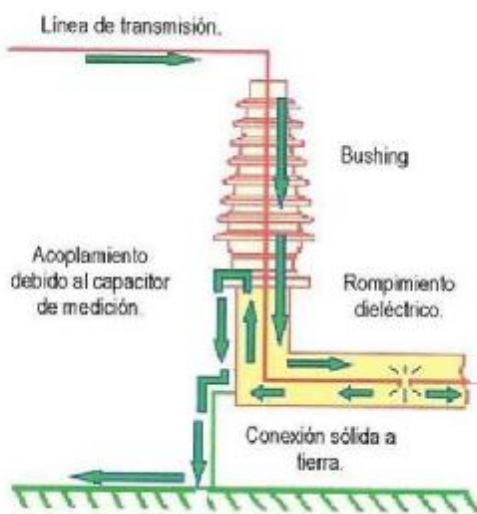


Figura 2.19 Mecanismo de generación de TEV de alta frecuencia

2.7 DESCARGA PARCIAL (PD) [7]

Una descarga parcial, la cual está definida por la norma IEC 60270 como:

"Es un pulso eléctrico de corriente o de voltaje que cortocircuita de forma parcial el aislamiento entre conductores y puede presentarse entre conductores adyacentes o en un conductor aislado y tierra."

Las descargas parciales en general son consecuencia de las concentraciones locales de tensión eléctrica en el aislamiento o en la superficie del aislamiento. En general, tales descargas aparecen como pulsos que tienen una duración de mucho menos de 1 μ s.

2.7.1 Clasificación de descargas parciales más comunes [8]

Las descargas parciales se clasifican comúnmente en tres tipos los cuales son:

1. Descargas parciales superficiales.

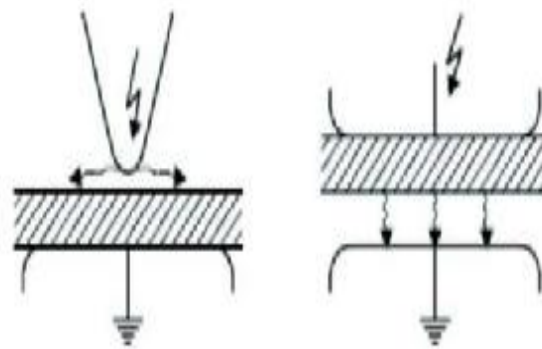


Figura 2.20 Descarga superficial

Se presenta en materiales laminados con diferentes interfaces de materiales eléctrico, tal como en interfaces de gas/liquido, donde la permeabilidad relativa del gas se estresa más que la del material sólido.

2. Descargas parciales internas o en cavidades.

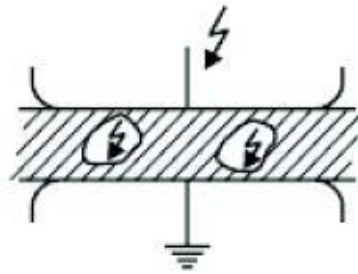


Figura 2.21 Descarga interna o en cavidades

Cuando las cavidades se forman en un material aislante sólido o líquido, el gas en la cavidad sobre el nivel de estrés y como resultado se produce la descarga.

3. Descargas parciales por efecto corona o gaseosa

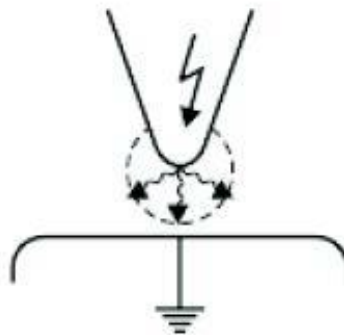


Figura 2.22 Descarga por efecto corona o gaseosa

Estas descargas ocurren en un campo eléctrico no uniforme, en donde los conductores presentan bordes afilados y están a alta tensión, especialmente cuando el aislamiento proporcionado es aire, gas o líquido.

Definir la clasificación de descargas parciales es compleja, ya que, debido a los diferentes tipos de aislamiento a los cuales el conductor o electrodo se ve sometido, pueden inclusive presentarse diversos tipos de descargas parciales al mismo tiempo o bien en el mismo aislamiento.

2.7.2 Causas principales que originan una descarga parcial.

1. El estrés eléctrico se asocia a los cambios repentinos en el campo eléctrico, el cual produce un cambio rápido de carga debido a la actividad eléctrica.
2. El estrés mecánico está ligado a la resistencia mecánica, la cual influye en la torsión y compresión del material aislante.
3. El estrés térmico se refiere, este depende de la temperatura ambiente máxima y mínima de trabajo, así como la temperatura máxima permitida para su adecuado funcionamiento.
4. El estrés químico, involucra el entorno al que está sujeto el aislante, por ejemplo, la corrosión química, humedad y radiación.

2.7.3 Métodos para detectar descargas parciales. [9]

De entre los métodos principales que se utilizan se encuentran los siguientes:

1. Ultrasonidos o acústica.

Estos métodos se aplican principalmente para pruebas a transformadores, ya que, al estar llenos de aceite, hace posible colocar sensores de ultrasonidos al exterior de la carcasa, para poder medir los pulsos que se generan con las descargas parciales, instalando sensores que obtienen coordenadas de procedencia de los pulsos de la DP.

La banda de emisión se encuentra entre 20kHz y 250 kHz, también hay emisiones en el rango audible (entre 100 Hz y 20 kHz) [10], este método está regulado por la guía IEEE de 2007 [11] y la norma IED 62478 [10], donde se definen la metodología para detectar las DP's en transformadores, recomendaciones de filtros y sistemas de localización.

Con este mismo método, se pueden realizar pruebas en accesorios de cables, tales como terminaciones o empalmes, o en una GIS (gas insulated systems). Donde se colocan sensores principalmente para detección de descargas parciales corona, que suelen ser generadas en cables aéreos, herrajes de alta tensión y aisladores.

La desventaja de este método es que no permite la calibración, sin embargo, en contrapresión tiene la ventaja de ser inmune al ruido electromagnético.

2. Detección eléctrica. [7]

Este método este definido en la norma IEC 60270 [7] y consiste en introducir en la red un condensador de acoplo que permite medir la carga de las descargas parciales (en pC) mediante sensores eléctricos en serie con el condensador.

Las ventajas de este método es la detección de la señal de una DP de forma inmediata, ya que está basado en la detección de las corrientes conducidas de los pulsos de DP's que circulan por el circuito de medida, permitiendo identificar el tipo de DP, y poder calibrar para calcular la carga aparente de la DP y utilizar en cualquier tipo de máquina.

3. Electromagnéticos o Radio frecuencia. [8]

El principio de funcionamiento se basa en detectar la radiación electromagnética producida por las DP's, debido a que una DP es capaz de generar ondas electromagnéticas, las cuales se propagan a través del tanque de un transformador, se subdivide en tres categorías, métodos de alta frecuencia (HF, de 3 a 30MHz), muy alta frecuencia (VHF, de 30 a 300MHz, y de ultra alta frecuencia (UHF, de 300 MHz a 3GHz), estos valores están incluidos en la norma IEC 62478 [10].

Tiene la ventaja de la economía del equipo de medición, y se utilizan en GIS, interruptores aislados con gas, en el rango de UHF, y en transformadores de forma similar a los ultrasonidos.

También tiene la ventaja de que no es invasiva ya que permite detectar las DP's mediante antenas y receptores sin estar en contacto con el dispositivos bajo estudio, aunque tiene la desventaja de que no puede medir desde el exterior las radiaciones producidas dentro de cubas eléctricas, así como también, la alta atenuación que sufre la señal electromagnética antes de llegar a la antena de detección, y el ruido por interferencia electromagnética producido por los sistemas de telecomunicaciones en el rango de UHF. [9]

REFERENCIAS

- [1] Subestaciones eléctricas de alta tensión aisladas en gas
Ing. Julio Sosa Escalante. Octubre 2007

- [2] Catálogo de productos de ABB
Subestación aislada en gas tipo ELK-04
Sistema modular hasta 170 kV, 4000 A, 63 kA.

- [3] Subestaciones aisladas por gas hasta 550 kV, 63 kA, 4000 A tipo 8DQ1
SIEMENS Power transmission and Distribution

- [4] Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico
Informe interno 18, APC by Schneider electric
Joseph Seymour and Terry Horsley

- [5] Very Fast Transients in GIS, 1989 IEEE J. Meppelink, K. Feser, K. Diererich

- [6] IEC 60071-2 International Standard.
Insulation co-ordination part 2 application guide.

- [7] IEC-60270 International Standard.
High-voltage test techniques measurements, 2000.

- [8] Detección y localización de descargas parciales en devanados de transformadores de potencia usando modelos de alta frecuencia
M.C. Daniel Guillén Aparicio (Tesis Doctoral)
Universidad Autónoma de Nuevo León.

- [9] Nueva metodología de la medida de descargas parciales en cables de alta tensión.
Armando Rodrigo Mor, Universitat Politècnica de València, UPV, Departamento de Ingeniería Eléctrica, DIE, Instituto de Tecnología Eléctrica, ITE

- [10] "IEC TS 62478: High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods," IEC (International Electrotechnical Commission), 2016.

- [11] "IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors, "IEEE Std C57.127-2007 (Revision of IEEE Std C57.127-2000), pp. c1-47, 2007.

Capítulo

3

MODELADO DE UNA SUBESTACIÓN GIS A 245 KV

A lo largo de este capítulo, se muestran los modelos principales para una descarga parcial, así como también, se realiza el modelo de cada uno de los componentes de una subestación gis descritos en el Capítulo 1 partiendo de cada uno de los componentes de esta. Basado en la información encontrada en la literatura y la aplicación de esta en el software ATP-DRAW, para la implementación del fenómeno de la descarga parcial.

3.1 INTRODUCCIÓN [1].

Las subestaciones GIS han revolucionado el manejo de alta tensión a nivel mundial, así mismo han ido evolucionando con el paso de los años, siendo de mucha importancia, ya que reducen considerablemente las dimensiones de la infraestructura, y también, los mantenimientos a dichas subestaciones son a largo plazo, siendo estos mismos cada 2 o hasta 5 años.

En el capítulo anterior se mostraron los distintos tipos de transitorios y consecuencias que pueden presentarse dentro de una subestación GIS.

Hablando del modelado de una subestación GIS y descargas parciales, primeramente, se toman como puntos de referencia las características y valores reales principales de cada elemento a modelar, puesto que, son fundamentales para que modelo funcione correctamente, así mismo, estudios previos que se tomaron en cuenta para este proyecto.

3.2 CONSIDERACIONES PARA EL MODELADO DE LOS ELEMENTOS DE UNA SUBESTACIÓN GIS. [2]

El modelado debe ser preciso, ya que es fundamental en la simulación de transitorios electromagnéticos en subestación aisladas en SF₆ (GIS), de ello depende en gran manera la exactitud del análisis o estudio que se requiera con dicho modelado.

De entre toda la información que podemos encontrar en la literatura, que puede ser de gran ayuda, que en la mayoría de los casos dicha información es apropiada para describir la configuración física y el cálculo de parámetros eléctricos de una 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 aisladas 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 5 Ω . 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 caso de transitorios ultrarrápidos (0.5 μs) la característica de protección se corrige en referencia a la característica de la sobretensión de 8/20 μs . 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
---------------------------	-------------------------------------	---	--

Antes de poder modelar cada elemento de una subestación GIS, se contemplaron los valores de la capacitancia a tierra, puesto que, es una parte importante dentro del comportamiento transitorio, así mismo, la capacitancia equivalente en un sistema tipo Gis produce una simulación más 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 LAS SUBESTACIONES AISLADAS EN GAS SF₆ A 245 Kv [3]

Por otro lado, para el modelado de una Gis, se tomó en cuenta el circuito equivalente de los componentes de una GIS y el canal de la chispa que se crea entre los contactos del interruptor, que son esenciales para el cálculo de los niveles de corriente transitoria.

Como se puede observar en la figura 3.1 se muestra el diagrama en línea de una fase de una GIS a 245 Kv utilizado para el estudio del 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 8 M de longitud y el transformador de potencia (T1) se suponen como el lado fuente y lado de carga del interruptor siendo operado, respectivamente.

Figura 3.1 Diagrama unifilar de una Gis en SF₆

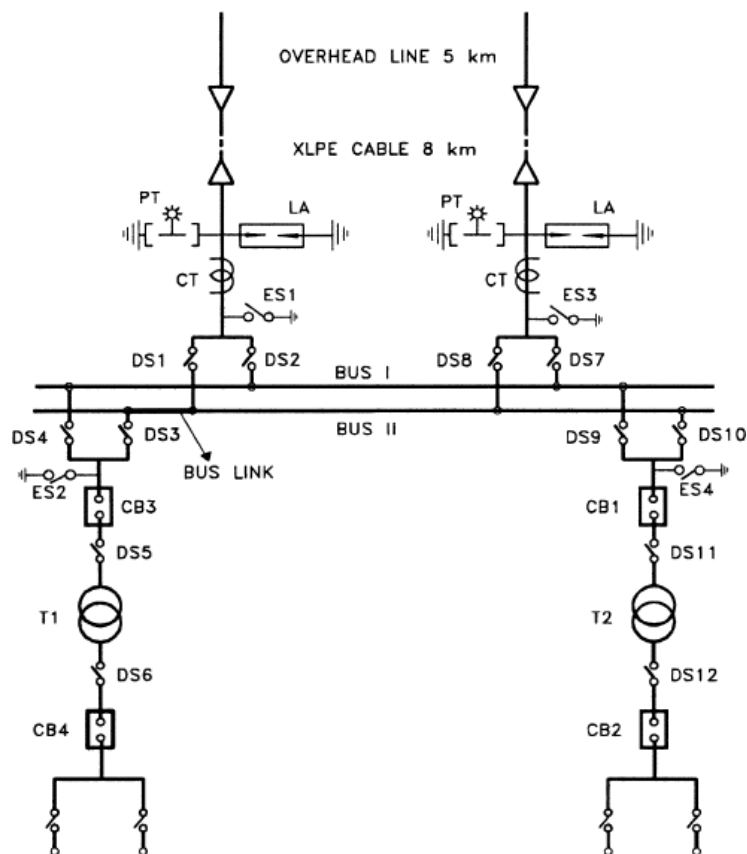


Figura 3.1. Diagrama unifilar de un GIS en SF₆.

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

3.1. 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

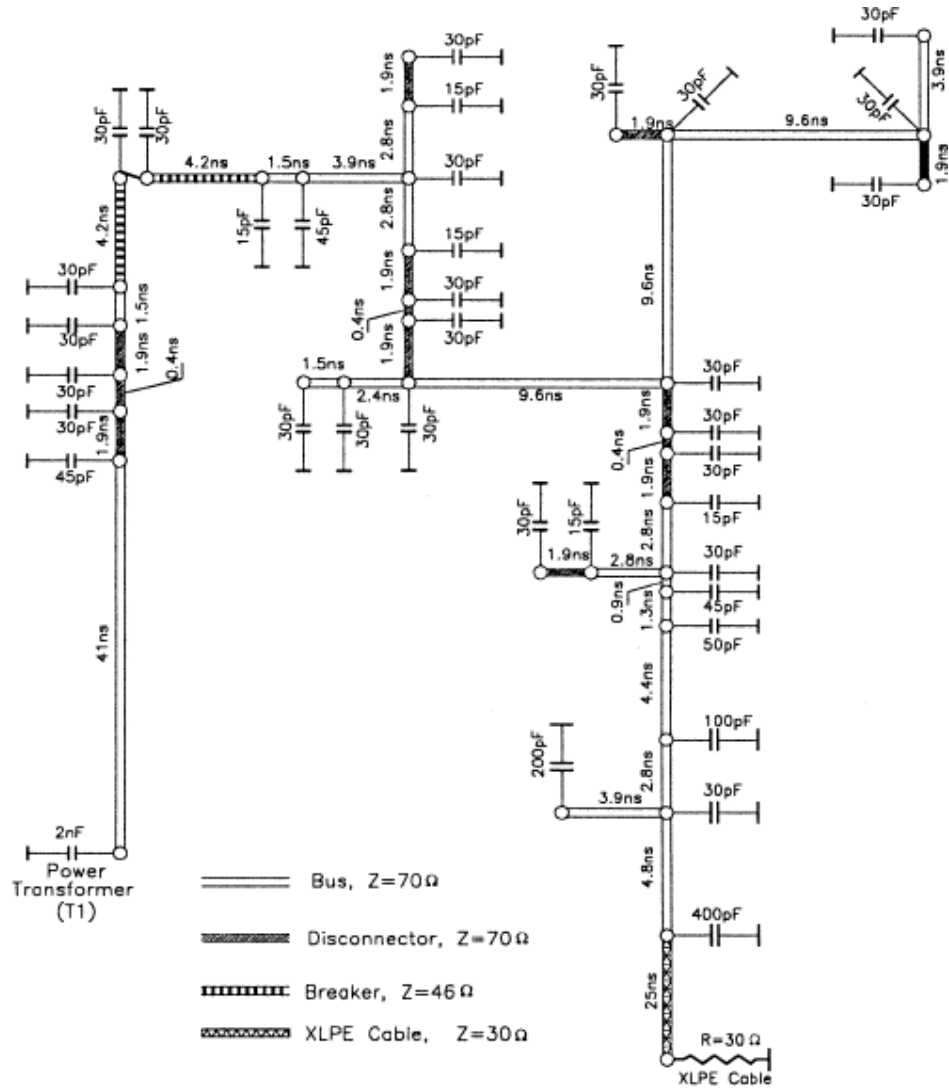


Figura 3.2. Red eléctrica equivalente de un GIS en SF₆ a 245kV.

3.2. MODELADO DE LOS COMPONENTES DE LA GIS EN EL SOFTWARE ATP-DRAW

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:

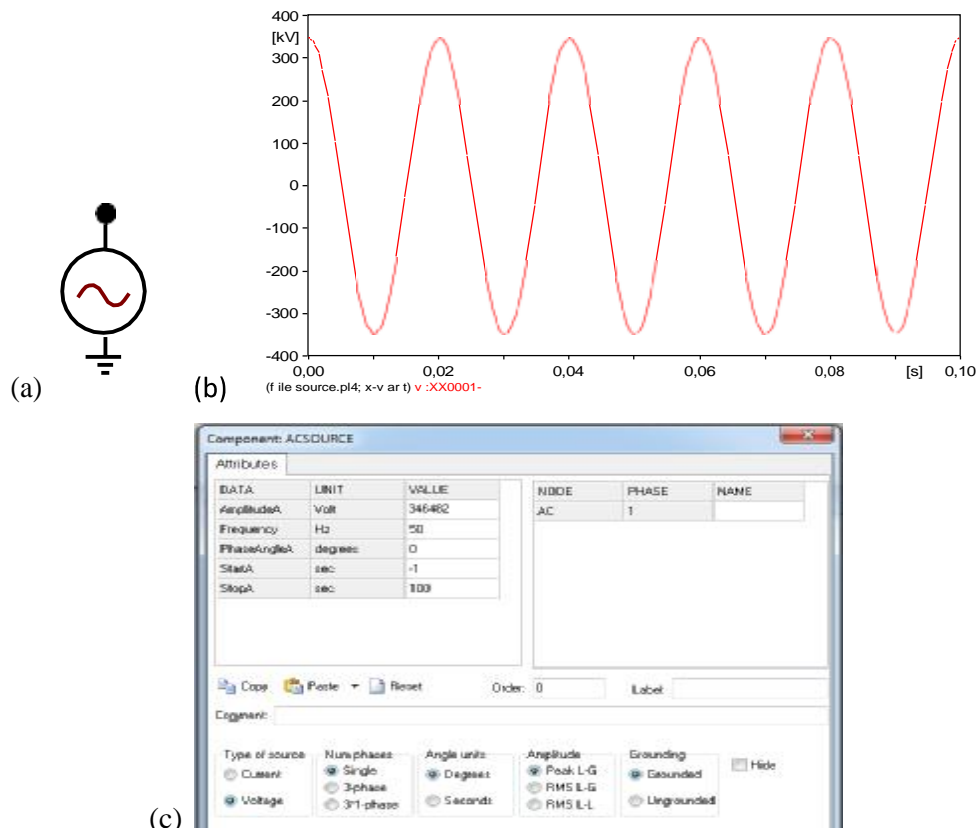


Figura 3.3. Modelado de la fuente (a) Fuente AC, (b) señal de voltaje de la fuente, (c) ventana de dialogo del componente

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.

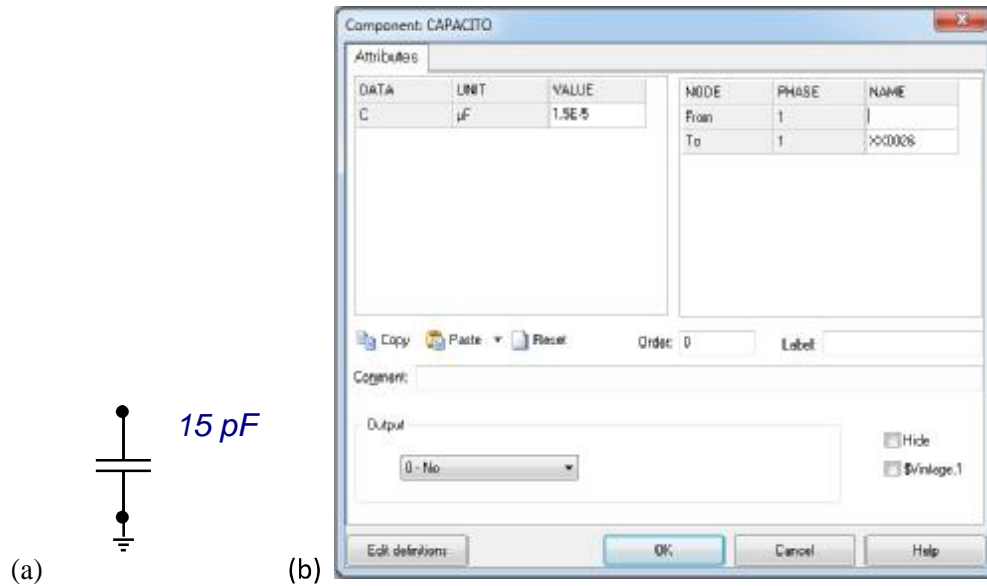


Figura 3.4. Modelado del espaciador (a) Capacitor, (b) ventana de dialogo del componente.

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.

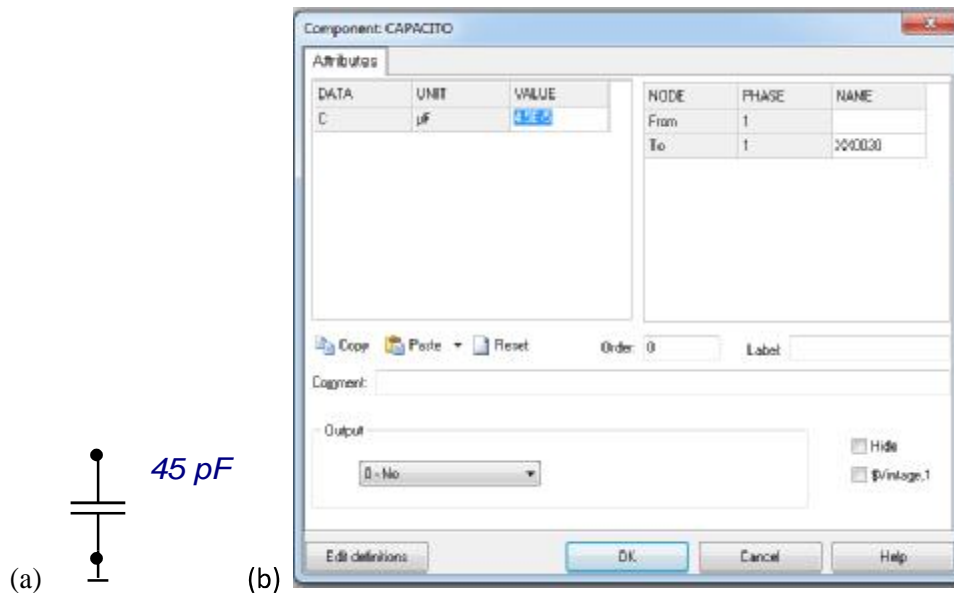


Figura 3.5 Modelado del interruptor a) Capacitor b) cuadro de dialogo del componente

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.

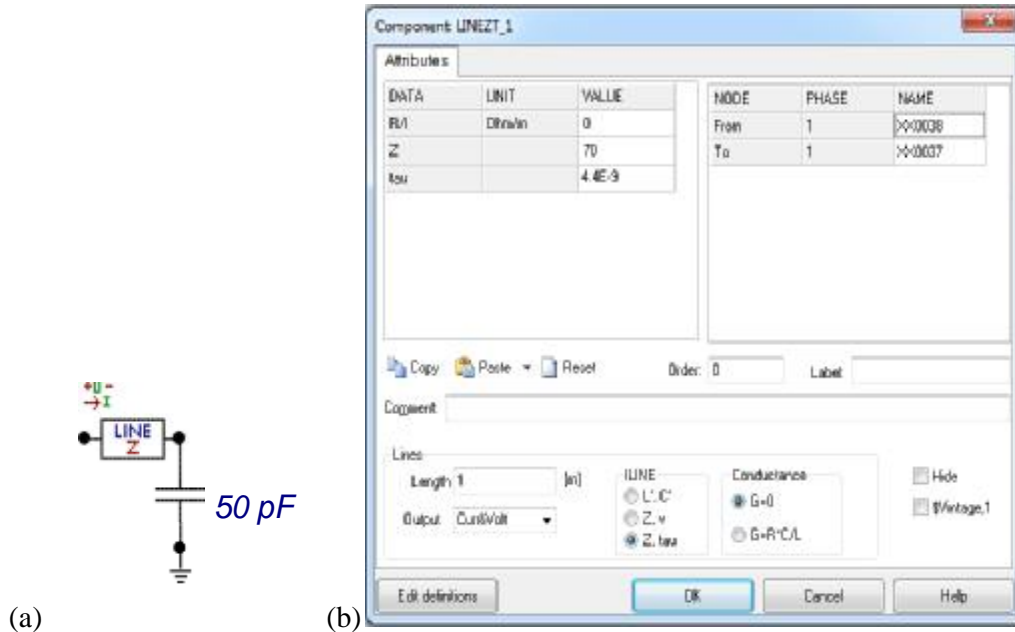


Figura 3.6 Modelado del TC a) Representación del TC b) cuadro de dialogo del componente

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 $70\ \Omega$ 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.

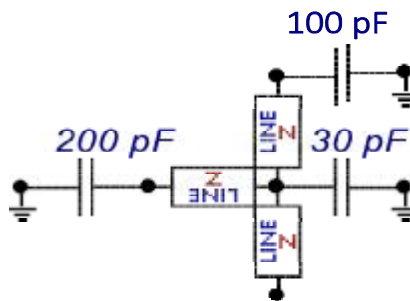


Figura 3.7 Representación equivalente del TP

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

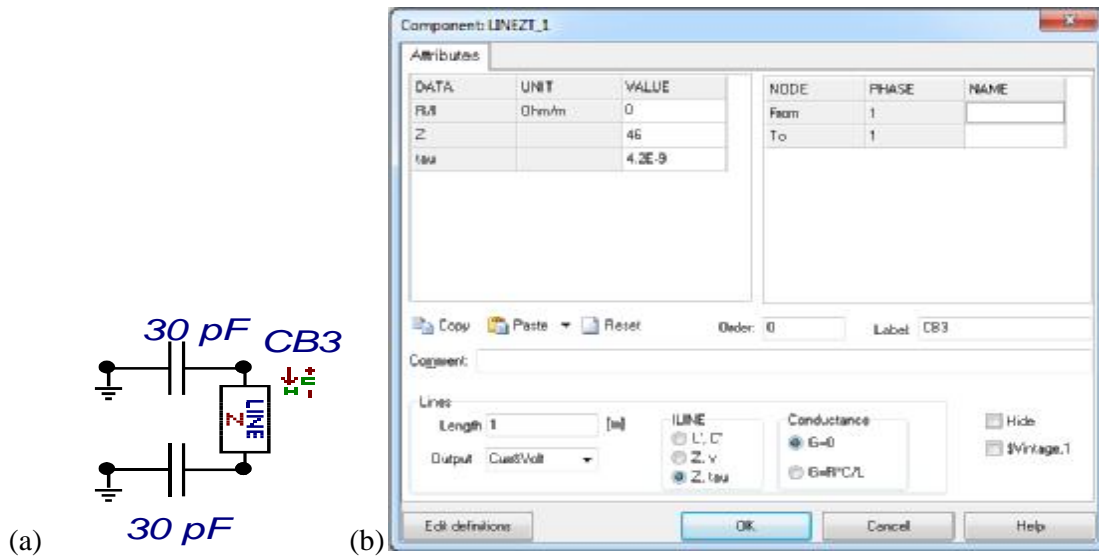


Figura 3.8 Modelado del CB a) Representación equivalente del CB b) ventana de dialogo del componente

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.

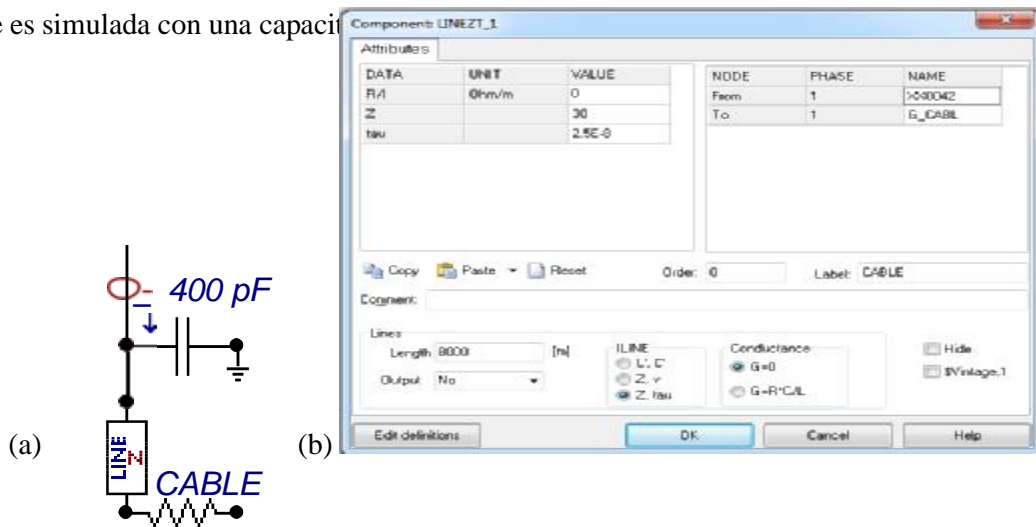


Figura 3.9 Modelado del T1 a) Representación equivalente de cable XLPE b) ventana de dialogo.

3.3 MODELADO DE LOS COMPONENTES DE LA GIS EN EL SOFTWARE ATP-DRAW

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.

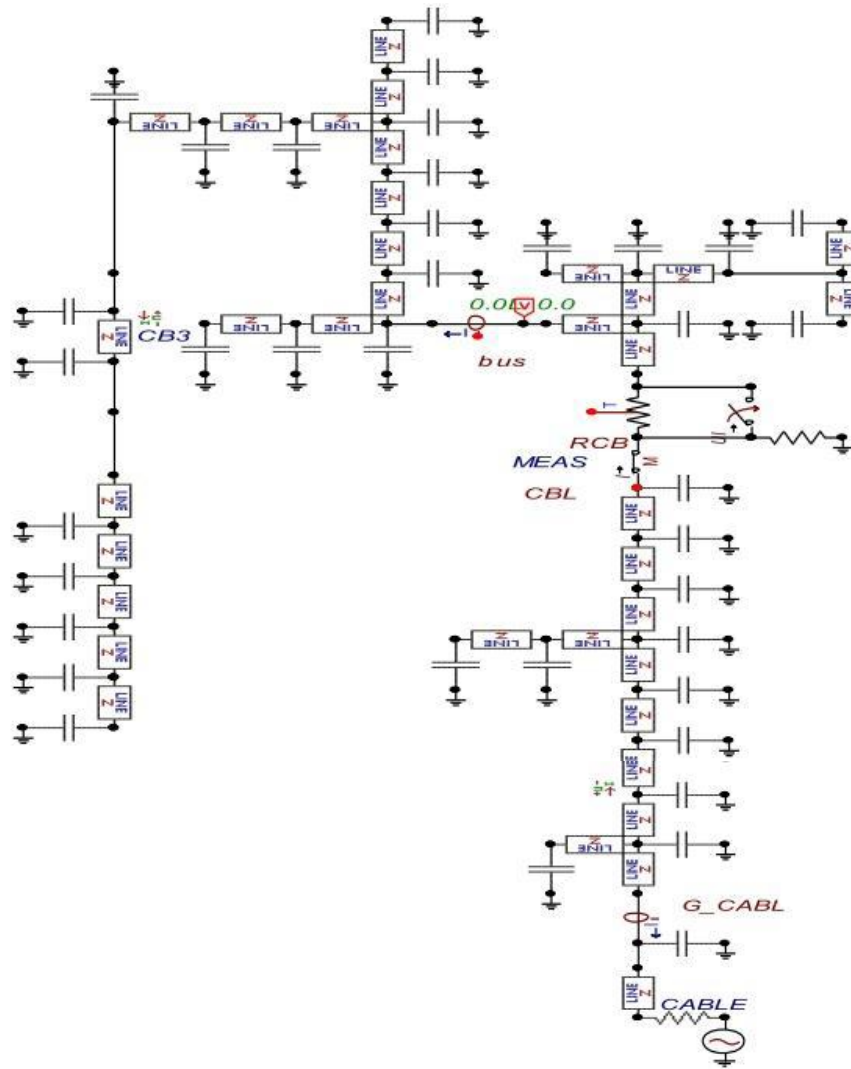


Figura 3.10 Modelo en ATP-DRAW de la subestación GIS a 245kV

REFERENCIAS

- [1] More Accurate Modeling of Gas Insulated Substation Components in Digital Simulations of Very Fast Electromagnetic Transients. 1991 IEEE Z.H, S. Carsímamovic.
- [2] Análisis, Simulación y Control de Transitorios Electromagnéticos en Subestaciones Aisladas en SF& 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 un GIS en SF& a 245 KV y su Interacción con los Armonicos Provenientes de la Red de Distribución. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. José Alfonso Sánchez Cortez. Diciembre 2008.

Capítulo

4

MODELADO DE UNA DESCARGA PARCIAL.

Dentro de este capítulo, se contemplan el modelo ABC para una descarga parcial, así mismo, cada uno de los componentes desarrollados dentro del software ATP-DRAW, también se muestran algunas pruebas de simulación de los modelos, para posteriormente integrarse y aplicarse en el modelo de la subestación GIS que se desarrolló en el capítulo anterior.

4.1 ORIGEN Y EVOLUCIÓN DEL FENÓMENO DE DP

Al aplicar tensión a un sistema de aislamiento se genera un campo eléctrico (E_a), el mismo que se distribuye de manera uniforme siempre y cuando posea un material en perfectas condiciones constructivas y homogéneo, caso contrario, el campo eléctrico (E_c) aumenta dentro de las imperfecciones que el aislamiento presente por consecuencia de las condiciones de frontera perpendiculares, en la Figura 4.1 se detalla este fenómeno. [1]

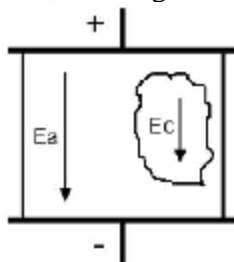


Figura 4.1 Campo eléctrico en un sistema de aislamiento

El campo eléctrico existente en el pequeño volumen de la imperfección del aislamiento produce un fuerte estrés eléctrico teniendo como consecuencia la ruptura de la rigidez dieléctrica y de esta manera dando lugar al fenómeno de descargas parciales. [2]

El fenómeno de descarga parcial se produce cuando el voltaje dentro de la falla ($U_{cl}(t)$ con DP) supera los valores de tensión de ignición ($+U_{cli}$) y desaparece cuando dicho voltaje se encuentra por debajo de la tensión de extinción ($+U_{cle}$), la tensión en la vacuola sigue su forma normal hasta un próximo encuentro con los niveles de tensión de ignición y extinción, en donde, al superar dichos niveles de tensión se produce nuevamente el fenómeno de descargas parciales, de igual manera sucede con la parte negativa de la onda, ya que al superar los niveles de tensión tanto de ignición ($-U_{cli}$) como de extinción ($-U_{cle}$) se producen las descargas parciales solo que con otra polaridad, en la Figura 4.2 se puede observar lo antes mencionado. [2] [3]

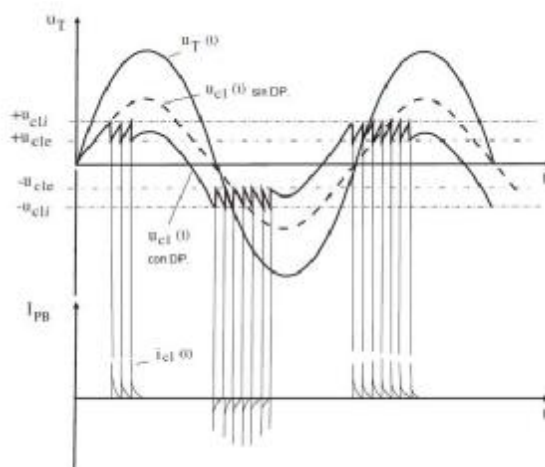


Figura 4.2 Fenómeno de Descargas Parciales [3]

4.2 PATRÓN DE DP EN AC.

En la Figura 4.2 se puede observar el número y amplitud de las descargas parciales que se producen, tanto en el semiciclo positivo y negativo, estas varían, debido a que los defectos que posee cada aislante son distintos, siendo esto muy importante para poder identificar los distintos fenómenos individuales que ocurren en el sistema de aislamiento, a esta figura también se la conoce como patrón de descargas parciales, por las razones antes mencionadas la detección de descargas parciales es considerada como una técnica selectiva y sensible para analizar el estado del dieléctrico del sistema de aislamiento [4].

El patrón de descargas parciales también puede ser interpretado mediante una elipse, como se observa en la Figura 4.3, donde, el semiciclo positivo es representado por la parte superior de la elipse y el semiciclo negativo por la parte inferior, el cruce es representado por el semieje mayor. [4]

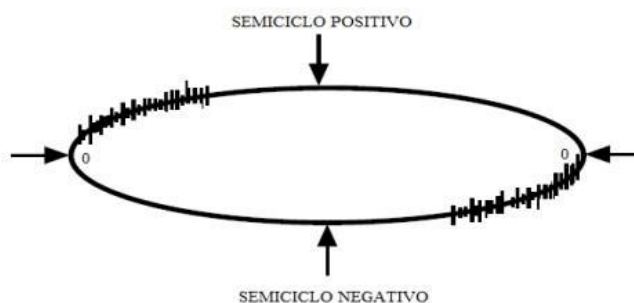


Figura 4.3 Patrón de descargas parciales en elipse.

4.3 CONDICIONES QUE DEFINEN UNA DP [5]

Al hablar de una descarga parcial dentro de una subestación GIS, podemos darnos cuenta de la capacidad que tiene el gas SF₆ como medio aislante, ya que sus propiedades ayudan para que el arco eléctrico producido durante una apertura o cierre de un interruptor pueda extinguirse rápidamente.

En el capítulo 2 se definieron los tipos de descargas parciales principales que podemos encontrar, sin embargo, una descarga parcial podemos definirlas con base a su naturaleza la cual podemos observar en la tabla 4.1

Tabla 4.1 Clasificación de DPs de acuerdo a su naturaleza

Tipo	Defecto o naturaleza
Descarga superficial	Partículas fijas expuestas a un potencial flotante
	Partículas conductoras rodantes en una superficie conductora
Descarga corona	Partículas que se mueven libremente
Descarga en vacío o cavidad	Daño en el material aislante sólido
	Desgaste en el medio aislante

4.4 EFECTOS QUE PROVOCAN LAS DESCARGAS PARCIALES

El monitoreo de DPs es fundamental en una GIS, ya que éstas son capaces de generar una serie de eventos encadenados a causa de su presencia. Los efectos más comunes que éstas provocan se describen a continuación:

- Provocan que el sistema de aislamiento se degrade con mayor rapidez.
- Dan origen a la descomposición del gas SF₆, generando partículas químicas, las cuales pueden provocar una reacción grave.
- Pueden ocasionar falles a tierra, las cuales pueden ser muy perjudiciales para la propia subestación, ya que pueden provocar explosiones.
- Pueden inducir una salida de operación inesperada.

Lo anterior da lugar a investigar las principales características de las DP's, por ejemplo, se han presentado modelos que simulan la estructura del aislamiento y el efecto en la cavidad, uno de los mas comunes es el modelo ABC.

4.5 CLASIFICACIÓN DE LAS DESCARGAS PARCIALES EN CD

Para explicar el comportamiento de una descarga parcial en corriente continua, vamos a describir una descarga originada en el interior de una cavidad gaseosa, ya que se considera una de las más perjudiciales para el aislamiento, [6].

La distribución del campo eléctrico en corriente continua depende en gran medida de la condición de funcionamiento del sistema de aislamiento. Cuando se aplica tensión, el campo es considerado completamente capacitivo, y se considera resistivo después de que todos los procesos de polarización hayan tenido lugar. En la Figura 4.4 se observa cómo durante la polarización del aislamiento, es decir, al inyectar tensión, se produce un incremento de la conductividad que se traduce en descargas parciales de gran magnitud.

En este momento, la tasa de repetición de descargas parciales es muy alta, al igual que ocurre durante la despolarización. La actividad de estas descargas disminuye al estabilizarse la tensión, aumentando, de igual forma, cuando se produce incremento o decrecimiento de tensión. A partir de 8 kV, la actividad de descargas parciales es mucho más estable.

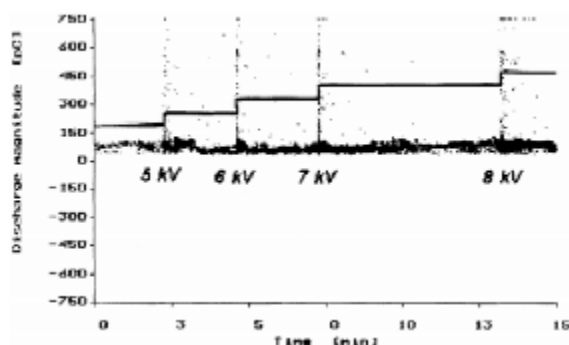


Figura 4.4 Magnitud de la DP durante un aumento gradual de la tensión de prueba [6]

Las descargas parciales en corriente continua dependen en gran medida de la temperatura y el gradiente de temperatura del sistema de aislamiento. Esto se debe a que la tasa de repetición de descargas parciales está directamente relacionada con el incremento de la conductividad, y dicha conductividad varía cuando la temperatura se eleva entre la temperatura ambiente y la de operación.

En sistemas de aislamiento papel-aceite, esta influencia es doble. Un incremento de temperatura, en este tipo de aislamientos, produce un incremento en la tasa de repetición de descargas parciales, y una redistribución del campo eléctrico. Esta redistribución provoca, a su vez, la desaparición de las descargas parciales en algunos puntos y la aparición de estas en otros distintos, [6].

En corriente continua, tanto la tasa de repetición como la magnitud de las descargas parciales son menores con respecto a las obtenidas en corriente alterna. La magnitud de la descarga parcial está estrechamente relacionada con la magnitud del campo eléctrico en el momento en que se detecta la presencia del electrón libre y se inicia el proceso de ionización, [6].

En principio, para la detección de descargas parciales en corriente continua no es necesario contar con instalaciones específicas. Dependiendo del objeto, uno puede elegir entre distintos sistemas de detección.

Como la tasa de repetición en corriente continua es baja, la toma de datos basta con realizarla durante 30 o 60 minutos. Los cambios en el comportamiento de las DP se observan cuando se prolonga durante mucho tiempo la actividad de estas descargas.

4.6 MODELOS DE CLASIFICACIÓN DE LAS DPs [6]

Se pueden obtener varios gráficos a partir de un conjunto de datos ($q, \Delta t$), que pueden resultar de gran utilidad a la hora de clasificar las descargas parciales. La elección de un gráfico u otro depende de su aplicación, [6]. Mediante estos gráficos es posible analizar las descargas parciales que se hayan producido en los objetos de ensayo y establecer patrones que puedan utilizarse para la generación de defectos de las descargas. Mediante la comparación de patrones se puede llegar a reconocer defectos desconocidos, [7].

A continuación, se presentan varias representaciones que sirven para identificar los distintos tipos de descargas parciales:

- Representación de las magnitudes de las DP en función del tiempo $q(t)$: Normalmente, este tipo de representación suele ser el más sencillo. Un ejemplo de esto es la Figura 4.5, en la que se diferencian varios tipos de descargas parciales.

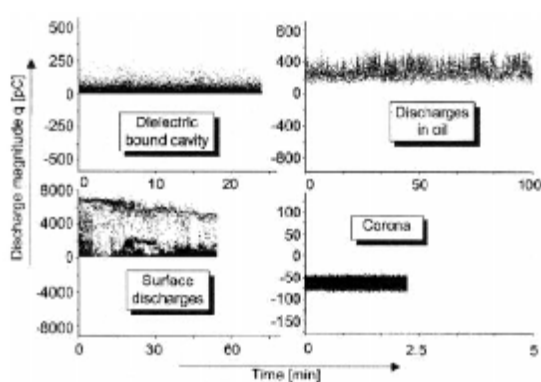


Figura 4.5 Representación de la magnitud de las DPs en función del tiempo para cuatro defectos distintos

En esta figura se observa cómo la actividad de descargas parciales producidas por el Efecto Corona se concentra en un corto periodo de tiempo (0 - 2.5 min), adquiriendo un valor negativo prácticamente constante. Esto se debe a que, como ya se ha mencionado anteriormente, estas descargas se originan en el semiciclo negativo de la tensión. Casi todas las descargas parciales producidas en una cavidad adquieren una magnitud de entre 0 y 125 pC, y se originan durante los primeros veinte minutos. El tiempo de obtención de descargas parciales en aceite aumenta con respecto a los dos tipos de descargas descritos anteriormente. En cambio, las magnitudes que alcanzan estas descargas son mucho mayores (200 - 400 pC). La actividad de descargas parciales superficiales se mantiene durante 1 hora, aproximadamente, alcanzando magnitudes de entre 0 y 7000 pC).

- Representación mediante Histogramas $H(q)$: Consiste en la representación de la densidad de probabilidad de las DP en función de sus magnitudes. A partir de la Figura 4.6 vemos cómo, en el caso de las descargas producidas en cavidades, existe una menor probabilidad de que ocurran conforme aumenta la magnitud de estas entre 0 y 120 pC, aproximadamente. Esto tiene sentido, puesto que, a mayor magnitud, mayor tiempo de recuperación del aislamiento. Algo parecido ocurre en el caso de las descargas parciales superficiales, pero alcanzan magnitudes de entre 0 y 2800 pC. La probabilidad de que ocurran descargas de tipo corona es muy alta solo cuando las DP adquieren valores de entre 26 y 33 pC. Para magnitudes de 200 a 400 pC, la probabilidad de que se produzcan descargas parciales en aceite va aumentando, en cambio, para valores de entre 400 y 600 pC, la probabilidad va disminuyendo, tal y como se puede observar en la Figura 4.6.

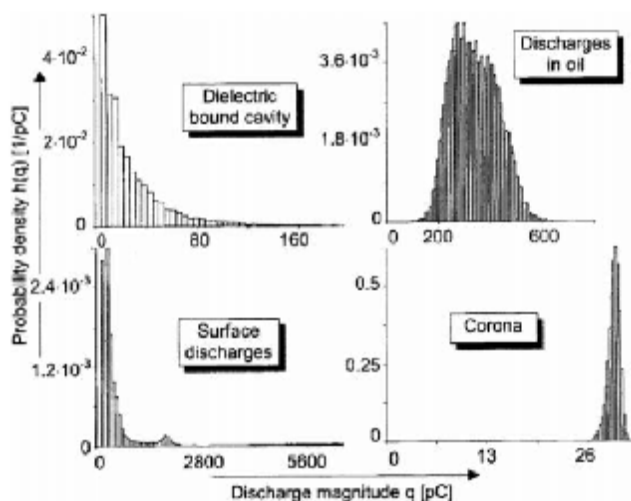


Figura 4.6 Representación de la densidad de probabilidad de las DPs en función de la magnitud de estas para cuatro defectos distintos.

4.7 MODELO ABC PARA UNA DP

Podemos modelar una descarga parcial mediante un circuito de capacitancias, donde existen tres capacitancias, tal como se muestra en la Figura 4.7. Este modelo ha sido uno de los más estudiados para entender el comportamiento básico de una descarga parcial y se le conoce como modelo ABC [5].

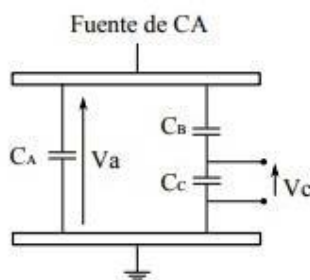


Figura 4.7 Modelo ABC para una descarga parcial (DP).

De acuerdo con la figura anterior, C_A es la capacitancia que no está afectada por el efecto (cavidad), C_B es la capacitancia del dieléctrico en serie con la cavidad y por último C_C representa la superficie de descarga (cavidad), donde la cantidad de carga depende del valor de la capacitancia y el voltaje aplicado a través de la capacitancia.

Una vez que se aplica un voltaje externo $V_C(t)$ y considerando que la descarga aún no se presenta, el voltaje en la capacitancia de DP $V_C(t)$ se puede expresar por [6]:

$$V_C(t) = \frac{C_B}{C_C + C_B} V_{CA}(t) \quad (4.7.1)$$

Entonces, en el instante que una DP se produce, su cantidad de carga estará ligada a la magnitud de la descarga y está definida por [8]:

$$Q = C_b V_C \quad (4.7.2)$$

Por otro lado, el modelo ABC es básico para entender el comportamiento de una descarga y también ha sido utilizado para el análisis de DPs en devanados de transformadores, subestaciones, motores, cables de alta tensión

4.8 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO ABC MEDIANTE ATP-DRAW

Modelar una descarga parcial mediante el software ATP-DRAW, nos lleva primeramente a retomar el modelo ABC, para este caso tenemos en la Figura 4.8 el modelo ABC en ATP-DRAW.

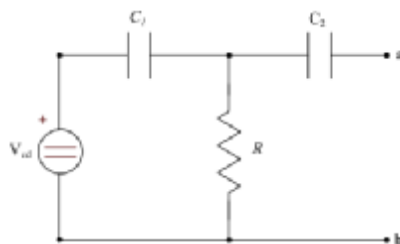


Figura 4.8 Circuito para generar una DP

Teniendo armado el circuito, se procede a comprimir mediante la herramienta (Compress), que se encuentra incorporada en el software ATP-DRAW, utilizada específicamente cuando se requiere mostrar la funcionalidad de un modelo, para poder implementarlo y realizar pruebas en el modelo de la subestación Gis mostrado con anterioridad en el capítulo 3. Cabe mencionar que los valores de cada elemento fueron encontrados mediante pruebas realizadas antes de generar el modelo final que podemos observar en la Figura 4.9.

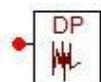


Figura 4.9 Modelo final de la DP

REFERENCIAS

- [1] W. Hayt. Engineering electromagnetics. Mc Graw Hill, New York, 2006
- [2] F. H. Kreuger. Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipments. Butterworths Londres, 1989.
- [3] Solid Dielectrics, their Sources, Properties, and Behavior in Electric Fields, Wiley IEEE, Press, 2011, pp. 319-370.
- [4] M Fernández, M García, G. A. J. Cano y J. Solares, Técnicas de mantenimiento y diagnósticos de máquinas eléctricas rotativas, Marcombo, Barcelona, 1998.
- [5] A. Cavallini, G. C. Montanari, and M. Tozzi. PD Apparent charge estimation and calibration: a critical review. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 17(1):198–205, 2010.
- [6] Peter H.F. Morshuis and Johan J. Smit, “Partial Discharges at dc Voltage: Their Mechanism, Detection and Analysis”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 2; pp. 328-340, 2005.
- [7] U. Fromm, “Interpretation of Partial Discharges at dc Voltages”; IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 2 No. 5, pp. 761-770, 1995.
- [8] Suwarno and H. Sutikno. Model and computer simulation of partial discharge patterns in natural liquid insulation for high voltage application. Int. J. Math. Model. Methods Appl. Sci.,5(5):966–973, 2011.

Capítulo

5

SIMULACIÓN DE LA DESCARGA PARCIAL EN LA GIS A 245 KV.

En este capítulo se desarrolla la implementación y simulación del modelo de la descarga parcial, así como también, el modelo de la subestación Gis a 245 KV, seguido de las gráficas correspondientes a cada simulación, las cuales se describirán más adelante.

5.1 SIMULACIÓN DE LA SUBESTACIÓN GIS A 245KV SIN CARGA.

En la Figura 5.1 podemos observar el modelo implementado en el software ATP-DRAW de la subestación Gis a 245kv, cabe mencionar que se ha corrido la simulación cuando la subestación esta sin carga, para poder comparar los valores al momento de colocar y apreciar el modelo de la descarga parcial.

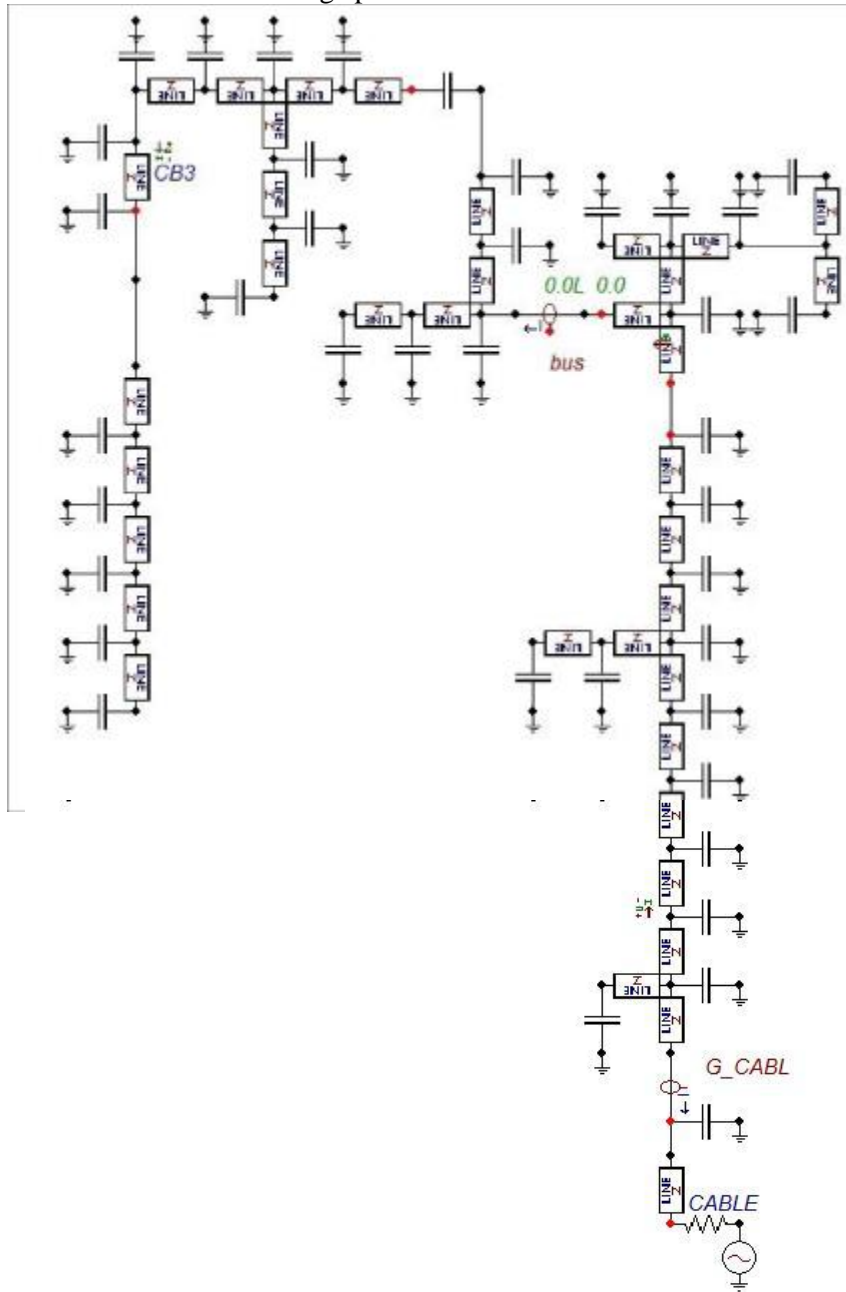


Figura 5.1 Subestación Gis a 245kv en ATP-DRAW

En la Figura 5.2 podemos observar que aparentemente existe una ligera corriente del orden de los (mA), la cual es manifestada por las propias capacitancias e impedancias de cada una de las secciones de la subestación GIS que han sido implementadas en el modelo.

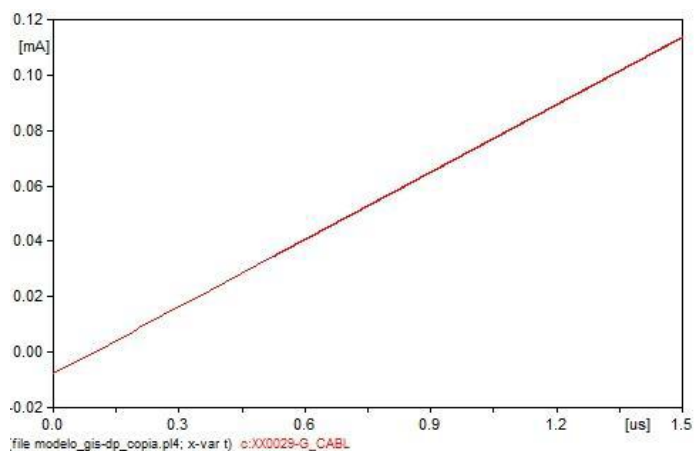


Figura 5.2 Efecto producido por las capacitancias

Así mismo, podemos observar en la Figura 5.3 voltajes inducidos del orden de los (μV) por el propio sistema, puesto que, la subestación esta sin carga alguna.

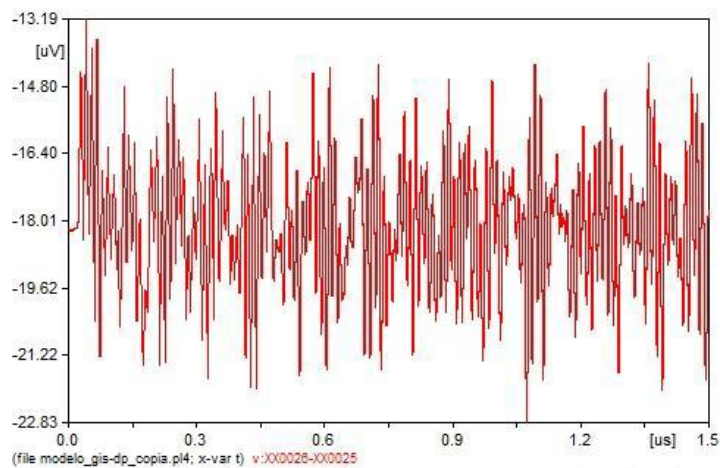


Figura 5.3 Voltaje inducido

5.2 SIMULACIÓN DE LA SUBESTACIÓN GIS A 245KV IMPLEMENTANDO EL MODELO DE LA DESCARGA PARCIAL.

La simulación se muestra en tres casos diferentes, en los cuales cada uno muestra la descarga parcial en diferente posición de la subestación GIS. Ya que así, se puede observar como es que una descarga parcial puede afectar al sistema aun estando sin carga.

5.2.1 CASO NÚMERO 1: SIMULACIÓN DE LA GIS CON LA DESCARGA PARCIAL EN EL NODO DE INTERFAZ CON LA BAHÍA 3

En la figura 5.4 podemos observar el modelo de la DP integrado al modelo de la subestación GIS a la entrada de la bahía 3.

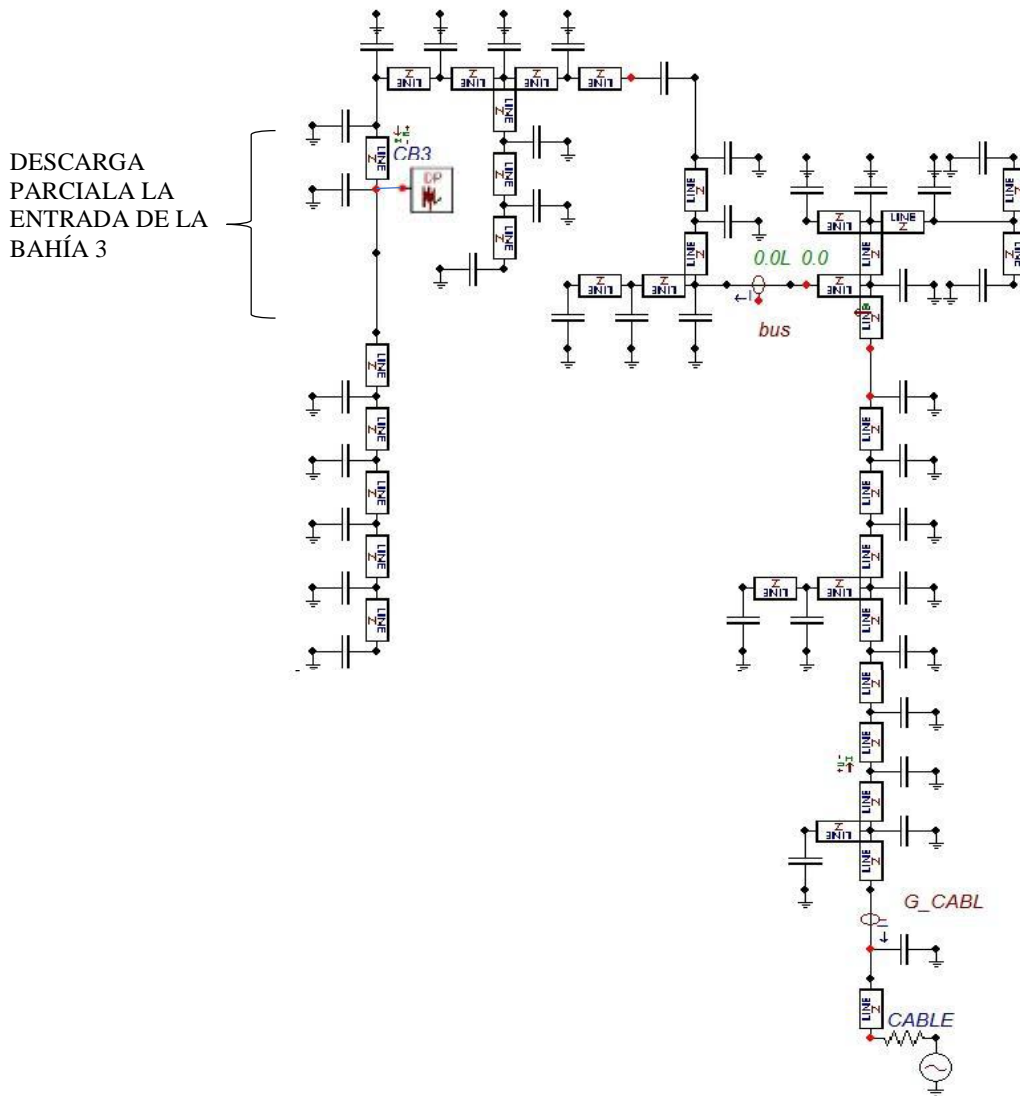


Figura 5.4 DP en la entrada a la bahía 3 de la GIS a 245 Kv

En esta simulación tomamos como puntos de observación: unión Gis-Cable y Bus-Link.

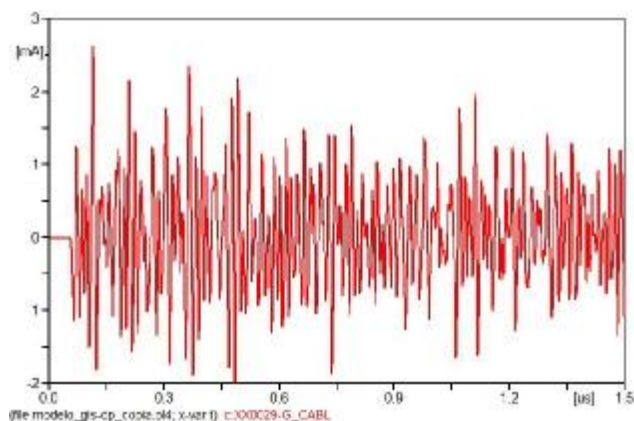


Figura 5.5 DP en la entrada a la bahía 3 de la GIS a 245 Kv tomada de GIS-Cable

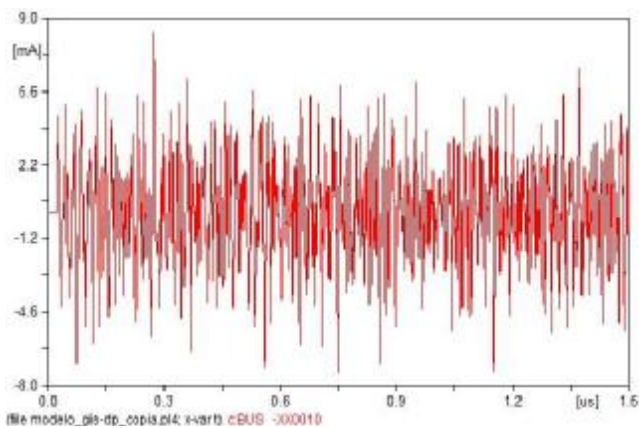


Figura 5.6 DP en la entrada a la bahía 3 de la GIS a 245 Kv tomada de Bus -Link

Las gráficas anteriores muestran el comportamiento de la descarga parcial para cada punto de observación, se puede apreciar que las corrientes son del orden de los (mA), con una frecuencia de 72.48 MHz y 123 MHz respectivamente, en un rango de 1.5 μ S.

5.2.2 CASO NÚMERO 2: SIMULACIÓN DE LA GIS CON LA DESCARGA PARCIAL EN EL NODO DE LA SALIDA DE LA BAHÍA 3

En la figura 5.7 podemos observar el modelo de la DP integrado al modelo de la subestación GIS a la salida de la bahía 3.

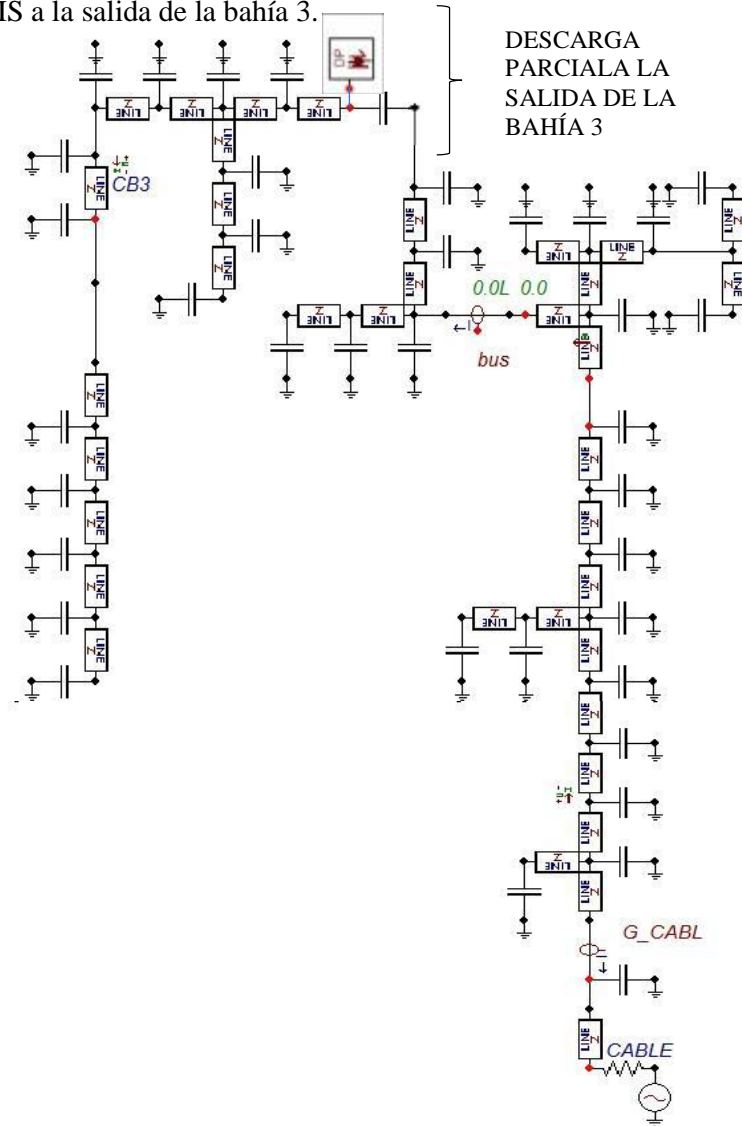


Figura 5.7 DP en la salida a la bahía 3 de la GIS a 245 Kv

Para esta simulación podemos observar en los siguientes puntos: unión Gis-Cable y Bus-Link, al igual que la simulación anterior.

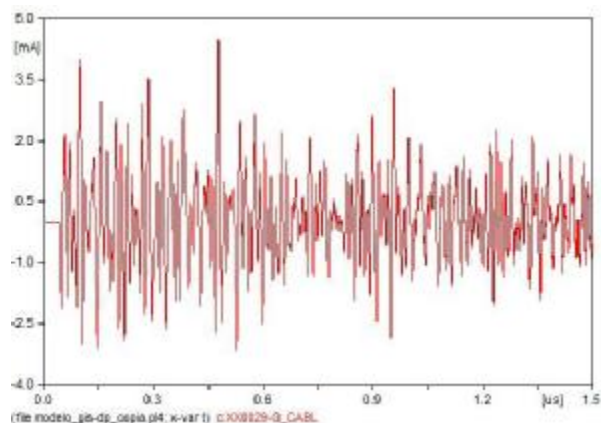


Figura 5.8 DP en la salida a la bahía 3 de la GIS a 245 Kv tomada de GIS-Cable

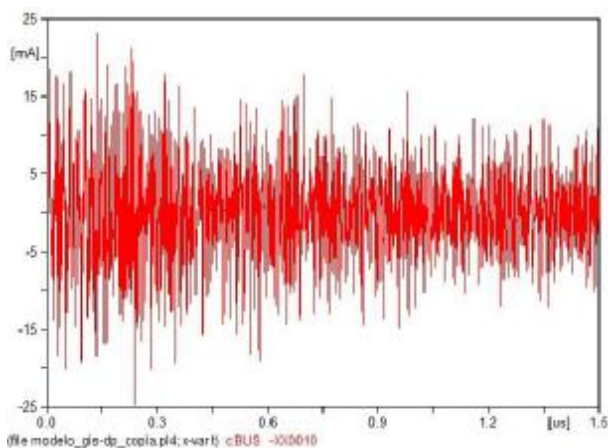


Figura 5.9 DP en la salida a la bahía 3 de la GIS a 245 Kv tomada de Bus-Link

Las gráficas anteriores muestran el comportamiento de la descarga parcial para cada punto de observación, se puede apreciar que las corrientes son del orden de los (mA), con una frecuencia de 72.18 MHz y 54 MHz respectivamente, en un rango de 1.5 μS, que al igual que la simulación anterior presenta valores similares.

5.2.3 CASO NÚMERO 3: SIMULACIÓN DE LA GIS CON LA DESCARGA PARCIAL EN EL CABLE DE ALIMENTACIÓN.

En la figura 5.10 podemos observar el modelo de la DP integrado al modelo de la subestación GIS en el cable de alimentación.

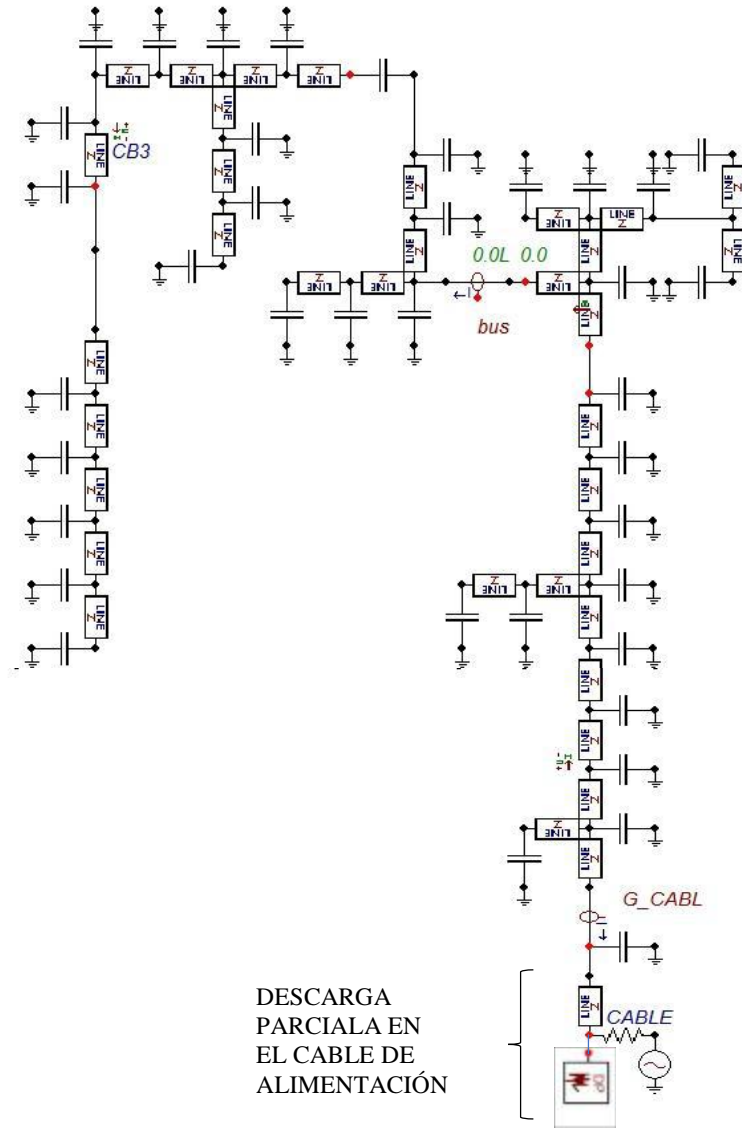


Figura 5.10 DP en el cable de alimentación de la GIS a 245 Kv

Como ultimo caso se observa en la simulación: unión Gis-Cable y Bus-Link, cada una de las gráficas siguientes.

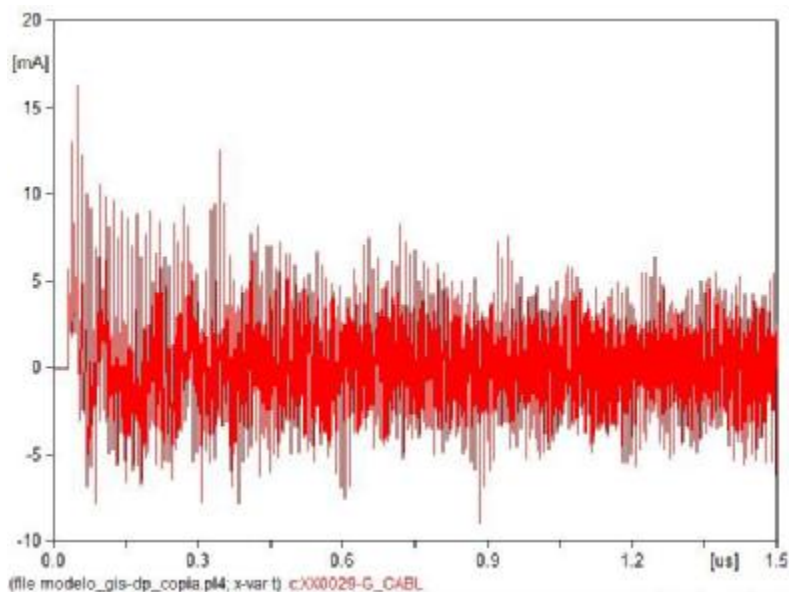


Figura 5.11 DP en el cable de alimentación de la GIS a 245 Kv tomada de GIS-Cable

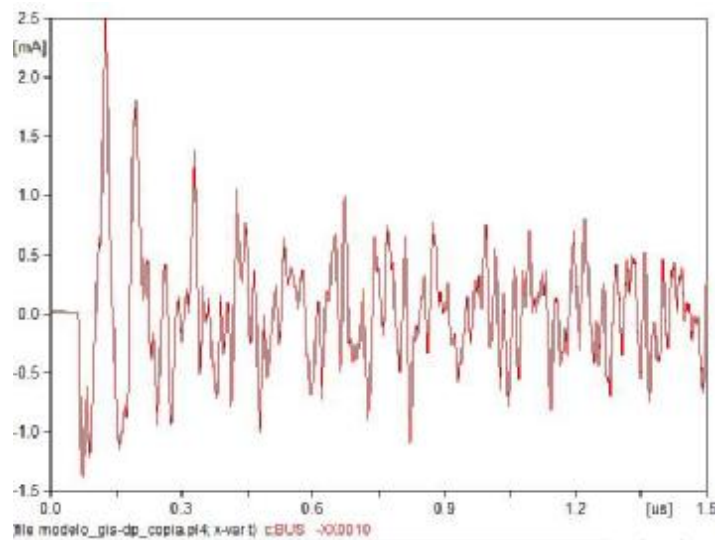


Figura 5.12 DP en el cable de alimentación de la GIS a 245 Kv tomada de Bus-Link

Al igual que los casos pasados se observan las gráficas anteriores muestran el comportamiento de la descarga parcial para cada punto de medición, así mismo, se puede apreciar que las corrientes son del orden de los (mA), con una frecuencia de 159 MHz y 36 MHz respectivamente, en un rango de 1.5 μ S.

5.3 RESULTADOS DE CADA UNO DE LOS CASOS

A continuación, se muestran en las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 los resultados obtenidos en la simulación para cada uno de los casos presentados en los diferentes puntos de la subestación GIS.

Tabla 5.1 DP a la entrada de la Bahía 3

<i>DP</i>	<i>PUNTO DE MEDICIÓN (OBSERVACIÓN)</i>	
	<i>Unión GIS-Cable</i>	<i>Bus-link</i>
	<i>2.62</i>	<i>7.96</i>

*Los resultados de la tabla están en mA.

Tabla 5.2 DP a la salida de la Bahía 3

<i>DP</i>	<i>PUNTO DE MEDICIÓN (OBSERVACIÓN)</i>	
	<i>Unión GIS-Cable</i>	<i>Bus-link</i>
	<i>4.47</i>	<i>18</i>

*Los resultados de la tabla están en mA.

Tabla 5.3 DP en el cable de alimentación

<i>DP</i>	<i>PUNTO DE MEDICIÓN (OBSERVACIÓN)</i>	
	<i>Unión GIS-Cable</i>	<i>Bus-link</i>
	<i>16</i>	<i>2.25</i>

*Los resultados de la tabla están en mA.

Capítulo

6

CONCLUSIONES

En este último capítulo están incluidos algunos de los resultados del proyecto desarrollado, los cuales muestran si se cumplieron los objetivos planteados, así como también, los resultados con mayor relevancia para esta investigación.

De acuerdo con los objetivos propuestos, se determinó en base a los resultados obtenidos en cada uno de los casos presentados con anterioridad en este trabajo, que fue posible representar una descarga parcial dentro de esta subestación en particular, así mismo, este trabajo queda como base para el análisis de algún tipo de subestación con una configuración diferente.

Con base a las simulaciones realizadas en el capítulo anterior, se pudo observar mediante las gráficas que la descarga parcial genera diferentes valores dependiendo donde este ubicada dentro de la subestación GIS.

También podemos comparar los valores contenidos en las tablas 5.1, 5.2 y 5.3, los cuales muestran valores distintos para cada posición de la descarga parcial.

En la tabla 6.1 podemos observar los valores de los tres casos simulados.

Tabla 6.1 Resultados de la DP para cada caso simulado

DESCARGA PARCIAL	PUNTO DE MEDICIÓN (OBSERVACIÓN)			
	Unión GIS-Cable		Bus-link	
	Corriente	Frecuencia	Corriente	Frecuencia
CASO 1	2.62	72.48	7.96	123
CASO 2	4.47	72.52	18	54
CASO 3	16	159	2.25	36

*Los resultados de la tabla para la corriente están en mA, y para la frecuencia en MHz.

De acuerdo con la tabla 6.1, observamos que entre mas cerca este la descarga parcial del punto de medición, la corriente aumenta, por lo tanto, entre más alejada este la descarga parcial del punto de medición, la corriente disminuye.

Del mismo modo podemos observar que las frecuencias tienen el mismo efecto para cada caso en las que la descarga parcial se encuentra mas cerca o mas lejos del punto de medición.

Cabe mencionar que los valores de las corrientes se encuentran en mA, puesto que, una descarga parcial normalmente se presenta en estas cantidades de corriente y su frecuencia suele ser del orden de los MHz, ya que, las DPs aparecen cuando el medio aislante sufre algún daño o desgaste, que en este caso es el gas SF6, siendo este uno de los mejores medios aislantes, no esta exento de la presencia de las DPs, de modo que, durante la apertura y cierre de un interruptor dentro de la GIS existe un arco eléctrico por mas mínimo que se genere, produce una descomposición insignificante del gas SF6, y esto, al hacerse repetitivo, hace que la descarga parcial tome un camino hacia una descarga a tierra o bien pueda producir problemas dentro de la misma subestación.

Una de las recomendaciones más relevantes para este trabajo es el de encontrar valores de constantes de tiempo θ más aproximados, así mismo, valores de las capacitancias con mayor precisión para poder implementar el modelo de la descarga parcial con valores aun mas reales, sin embargo, esto debe estar apoyado con pruebas físicas, lo cual hace aún más difícil la obtención de un parámetro y también la simulación en tiempo real.

En conclusión, podemos obtener los valores aproximados implementando el modelo de la descarga parcial en modelos distintos de la subestación GIS simulados en este trabajo, del mismo modo, podemos simular el efecto de la misma descarga parcial, modificando los valores del modelo por valores tomados de pruebas físicas, y lograr alcanzar valores más exactos.