



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

"SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

***Respeto hacia sí mismo y hacia los demás***

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **ESTUDIO Y PROPUESTA DE UN TIPO DE INTERRUPTOR A SER IMPLEMENTADO EN LA LÍNEA DE 500 KV MEDIANTE MODELACIÓN EN ATP.**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA ELÉCTRICA**

**DAYSÍ PAOLA LANDAZURI MORENO**  
[landazuriday@yahoo.com](mailto:landazuriday@yahoo.com)

**MARTHA RUMIPAMBA YUNGAN**  
[martyk\\_rumimpamba05@hotmail.com](mailto:martyk_rumimpamba05@hotmail.com)

**DIRECTOR: Ing. LUIS RUALES**  
[luis.ruales@celec.com.ec](mailto:luis.ruales@celec.com.ec)

**Quito, Mayo 2011**

## DECLARACIÓN

Nosotras, Daysi Paola Landázuri Moreno y Martha Rumipamba Yungán, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaramos cedo nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Daysi Paola Landázuri Moreno

---

Martha Rumipamba Yungán

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Daysi Paola Landázuri Moreno y Martha Rumipamba Yungán, bajo mi supervisión.

---

Ing. Luis Ruales Corrales

---

Ing. Luis Dután Amay

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco infinitamente al ser celestial que día a día es la fuerza que me acompaña para seguir luchando en la vida, a mis padres Gonzalo Landázuri y Liliana Moreno, gracias por sus consejos, apoyo y amor incondicional, a mis hermanos, abuelitos y demás familiares por estar siempre a mi lado y ser parte de mi vida.*

*Mis más sinceros agradecimientos a las persona que hicieron posible el desarrollo de este proyecto, Ing. Luis Ruales e Ing. Luis Dután, quienes con sus conocimientos y experiencia supieron guiarnos y sugerirnos en favor de la tesis. Gracias por su confianza y valioso tiempo dedicado a este trabajo.*

*Agradezco también a mi amiga y compañera de tesis, Martha por haber compartido este proceso, a mis amigos y aquellas personas que contribuyeron con la realización de esta tesis.*

*Daysi Landázuri*

## AGRADECIMIENTOS

***“Te haré entender, y te enseñare el camino en que debes andar. Sobre ti fijare mis ojos Salmos 32:8”***

*Doy gracias al ser omnisciente, omnipresente y todopoderoso por haberme dado la vida y bendecirme todos los días con lo mejor del pan, lo mejor del aceite, lo mejor del trigo y lo mejor del vino, por haberme dado la fortaleza y la sabiduría suficiente para culminar una etapa más de mi vida, tu Jesús que siempre estuviste a mi lado.*

*A las personas que más amo el regalo más grande de parte de Dios mis padres, dos seres ejemplo de amor, perseverancia y superación, gracias a mi mamita que fue la persona que confió en mi cuando mis sueños se desvanecían, a ti papito que me enseñaste el camino y el servicio a Dios, sin el apoyo de los dos no hubiese sido posible mis mas grandes metas, a mis dos hermanos, Wellington que me ayudaste y me apoyaste para lograr mis sueños, a mi hermana Fely que con sus consejos siempre estuvo a mi lado.*

*Mi enorme admiración y gratitud al director del proyecto Ing. Luis Rúaless por su acertada ayuda. Y al co – director del proyecto Ing. Luis Dután quien estuvo siempre presto a colaborar hasta el último instante en lo que más se pudiera para el desarrollo de la tesis.*

*A mi compañera de tesis y amiga Daysi que sin su ayuda no hubiese sido posible al culminación de este proyecto, por último a todas las personas que me ayudaron de una manera a otra.*

*Martha Rumipamba Y.*

## DEDICATORIA

*A los seres que más amo  
Gonzalo Landázuri, Liliana Moreno  
Alex y Jéssica Landázuri  
Miguel Moreno*

## DEDICATORIA

*En este trabajo plasmo el amor, el respeto y admiración a mis padres Luis Rumipamba y Rufina Yungán quienes a pesar de los difíciles momentos y la falta de oportunidades que se presento en la vida siempre me dieron lo mejor, sin que me falte el amor, la comprensión y el apoyo en cada sueño que emprendía.*

*A mi linda familia con quienes tengo la oportunidad de compartir todos los días Wellington mi niño, Fely mi hermana, Efraín mi cuñado, como olvidarme de ti mi pequeño y gran amor que llenaste mi vida de alegrías desde que llegaste a nuestra familia Danny Joel mi sobrino.*

*A la memoria de las personas a quienes admire mucho cuando estuvieron en vida y me dejaron grandes ejemplos de amor, paciencia y superación a ti abuelita Rosario, Papilo y a ti tío Juancho, a pesar de que me dejaron a mitad del camino de la vida, aun el recuerdo de ustedes vive en mi corazón-*

*Martha Rumipamba Y.*



## **CONTENIDO**

<b>DECLARACION</b>	ii
<b>CERTIFICACION</b>	iii
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	iv
<b>DEDICATORIA</b>	vi
<b>CONTENIDO</b>	viii
<b>INDICE DE FIGURA</b>	xiii
<b>INDICE DE TABLAS</b>	xvii
<b>GLOSARIO DE TERMINOS</b>	xviii
<b>OBJETIVOS</b>	1
<b>ALCANCE Y JUSTIFICACION</b>	2
<b>ORGANIZACIÓN DE LA TESIS</b>	2
<b>PRESENTACION</b>	4
<b>RESUMEN</b>	5
<b>CAPITULO 1: MARCO TEORICO</b>	<b>6</b>
1,1 DEFINICIONES GENERALES	6
1.1.1 INTERRUPTOR	6
1.1.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL INTERRUPTOR	7
1.1.3 PROCESO DE CIERRE	8
1.1.4 PROCESO DE APERTURA	8
1.1.5 CARACTERÍSTICAS DE ASIGNACIÓN DEL INTERRUPTOR	9
1,2 EL ARCO ELÉCTRICO	10
1,3 TECNOLOGÍA APLICADA A LOS INTERRUPTORES	11
1.3.1 INTERRUPTORES EN ACEITE	13
1.3.2 INTERRUPTORES EN AIRE	14
1.3.3 INTERRUPTORES EN SF6	14

1.3.4	INTERRUPTORES EN VACIO	16
1.3.5	INTERRUPTORES EN SEMICONDUCTORES	17
1,4	SOBREVOLTAJES DEBIDOS A LA OPERACIÓN DEL INTERRUPTOR	18
1.4.1	SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS DE FRENTE LENTO O POR MANIOBRA	18
1.4.2	ONDAS VIAJERAS	19
1.4.2.1	<i>Ecuación De La Onda Viajera</i>	20
1.4.2.2	<i>Reflexiones y Refracciones de Ondas Viajeras</i>	21
1.4.2.3	<i>Línea Abierta</i>	22
1.4.2.4	<i>Línea en cortocircuito</i>	24
1,5	INTERACCIÓN DEL ARCO ELÉCTRICO EN SISTEMAS DE POTENCIA	24
1.5.1	VOLTAJE TRANSITORIO DE RECUPERACION (TRV)	25
1.5.2	PRINCIPALES CORRIENTES DE INTERRUPCIÓN	27
1.5.2.1	<i>Maniobras con Cargas Inductivas y Capacitivas</i>	27
1.5.2.1.1	<i>Interrupción de Corrientes Capacitivas</i>	28
1.5.2.1.2	<i>Interrupción de Corrientes Inductivas.</i>	29
1,6	INTERRUPCION DE CORRIENTES BAJO CONDICIONES DE FALLA	34
1.6.1	FALLAS SIMÉTRICAS Y ASIMÉTRICAS	34
1.6.2	FALLAS SIMÉTRICAS	35
1.6.3	FALLAS ASIMÉTRICAS	36
1.6.4	TIPOS DE TRV CAUSADOS EN LA INTERRUPCIÓN DE CORRIENTE BAJO CONDICIONES DE FALLA	36
1.6.5	CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE TRV	36
1.6.5.1	<i>TRV Exponencial (sobre-amortiguado)</i>	37
1.6.5.2	<i>TRV Oscilatorio (sobre-amortiguado)</i>	38
1.6.5.3	<i>TRV con Forma de Onda Triangular</i>	39
	<b>CAPITULO 2: MODELACIÓN DE COMPONENTES EN ATP</b>	<b>40</b>

2.1	EL PROGRAMA DIGITAL DE SIMULACION ATP	40
2.2	MODELOS UTILIZADOS	41
2.2.1	FUENTES	41
2.2.2	EQUIVALENTES DEL SISTEMA	41
2.2.3	LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	41
2.2.4	TRANSFORMADORES	42
2.2.5	REACTORES Y CARGAS	42
2.2.6	INTERRUPTORES	42
2.3	IMPLEMENTACIÓN MEDIANTE MODELS	42
2.3.1	SUBROUTINA MODELS	43
2.3.2	ESTRUCTURA DE PROGRAMACIÓN	44
2.4	MODELACION DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA	44
2.4.1	TIPOS DE MODELADO DE ARCO	45
2.4.2	MODELOS TIPO “CAJA NEGRA”	46
2.4.3	MODELOS DE ARCO	47
2.4.3.1	Modelo de Cassie	47
2.4.3.2	Modelo de Mayr	48
2.4.4	IMPLEMENTACION DEL MODELO DE ARCO ELECTRICO	49
2.5	DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS DE LOS COMPONENTES DEL S.N.I.	52
2.5.1	CARACTERÍSTICAS DE LA S/E INGA	54
2.5.2	CARACTERISTICAS DE CONDUCTORES DE LAS L/T Y CONFIGURACIÓN DE LAS TORRES	55
2.5.3	CARACTERISTICAS DE LA ESTRUCTURA A SER UTILIZADA	58
<b>CAPITULO 3: CASOS DE ESTUDIO DEL SISTEMA</b>		60
3.1	CONSIDERACIONES DE SIMULACIÓN	60
3.1.1	TIEMPO DE OPERACIÓN DEL INTERRUPTOR	62
3.2	SIMULACIÓN DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA PARA DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN	62

3.2.1	INTERRUPCIÓN EN CONDICIÓN DE FALLA CERCA DEL INTERRUPTOR (TERMINAL FAULT)	65
3.2.2	INTERRUPCIÓN EN CONDICIÓN DE FALLA LEJOS DEL INTERRUPTOR (SHORT – LINE FAULT)	68
3.2.2.1	<i>Falla Trifásica</i>	69
3.2.2.2	<i>Falla Monofásica</i>	72
3.2.3	INTERRUPCIÓN DE CORRIENTES CAPACITIVAS	75
<b>CAPITULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>		80
4.1	REPRESENTACIÓN DEL TRV EN NORMAS	80
4.2	VALORES ESTÁNDARS DEL TRV RELACIONADOS CON LOS VALORES DE CORTOCIRCUITO	83
4.3	CÁLCULO Y RESULTADOS	85
4.3.1	TRAZADO DE LA ENVOLVENTE DE ESFUERZOS A LA CUAL ESTÁ SOMETIDA EL INTERRUPTOR	85
4.3.1.1	<i>TRV debido a Falla Trifásica aplicada en los Terminales de la Línea Inga – Yaguachi</i>	85
4.3.1.2	<i>TRV debido a Falla Monofásica aplicada en un corto tramo de la Línea Inga – Yaguachi</i>	90
<b>CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		95
5.1	CONCLUSIONES	95
5.2	RECOMENDACIONES	97
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>		98
<b>ANEXOS</b>		101
ANEXO A		101

ANEXO B	103
ANEXO C	107
ANEXO D	108
ANEXO E	118

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b>	Representación del arco eléctrico formado entre los contactos del interruptor	7
<b>Figura 1.2.</b>	Distribución potencial a lo largo de las regiones de un canal del arco	11
<b>Figura 1.3.</b>	Conductividad de los gases en función de la temperatura	12
<b>Figura 1.4.</b>	Esquema de un Interruptor con gas SF <sub>6</sub>	17
<b>Figura 1.5.</b>	Esquema de un Interruptor en Vacío	16
<b>Figura 1.6.</b>	Diagrama esquemático de una sección elemental de una L/T	20
<b>Figura 1.7.</b>	Características de una onda viajera al alcanzar el punto de transición de dos líneas de diferente impedancia característica	22
<b>Figura 1.8.</b>	Comportamiento de una onda viajera en el extremo abierto de una L/T	23
<b>Figura 1.9.</b>	Características de una onda viajera en el punto de cortocircuito de una L/T	25
<b>Figura 1.10.</b>	Voltaje Transitorio de Recuperación	26
<b>Figura 1.11.</b>	Voltaje Transitorio de Recuperación en simples circuitos. (a) Circuito Resistivo (b) Circuito Inductivo (c) Circuito Capacitivo	27
<b>Figura 1.12.</b>	Interrupción de corrientes capacitivas. (a) Circuito capacitivo. (b) Formas de onda de voltaje y corriente.	28
<b>Figura 1.13.</b>	Interrupción de una corriente inductiva. (a) Circuito inductivo. (b) Transitorio durante la interrupción sin reencendido. (c) Transitorio durante la interrupción con reencendido	31
<b>Figura 1.14.</b>	Apertura con corte de corriente	32
<b>Figura 1.15.</b>	Aumento del voltaje debido al corte de corriente	34
<b>Figura 1.16.</b>	Representación de una falla trifásica a tierra	35
<b>Figura 1.17.</b>	Circuito equivalente paralelo RLC	37
<b>Figura 1.18.</b>	TRV exponencial	38
<b>Figura 1.19.</b>	TRV Oscilatorio	38
<b>Figura 1.20</b>	TRV de forma triangular	39

<b>Figura 2.1.</b>	Representación de un circuito con MODEL	44
<b>Figura 2.2.</b>	Descripción del modelo de Cassie	48
<b>Figura 2.3.</b>	Representación del modelo de Mayr	49
<b>Figura 2.4.</b>	Esquema del modelo de "Caja Negra"	51
<b>Figura 2.5.</b>	Diagrama de bloques para obtener el modelo de arco eléctrico	51
<b>Figura 2.6.</b>	Icono representando un interruptor con tecnología del SF6, utilizando el modelo de arco eléctrico de Cassie y Mayr	52
<b>Figura 2.7.</b>	Diagrama unifilar de la Subestación Inga	55
<b>Figura 2.8.</b>	Estructura Típica de 500 kV.	58
<b>Figura 2.9.</b>	Estructura Típica de 230 kV.	59
<b>Figura 3.1.</b>	Evolución de la corriente asimétrica de cortocircuito ( $I_f$ ) a lo largo del tiempo	61
<b>Figura 3.2.</b>	Sistema modelado. (a) Utilizando interruptor ideal. (b) utilizando el interruptor con modelado de arco de Cassie y Mayr	63
<b>Figura 3.3.</b>	Corriente en el Interruptor Ideal vs Corriente en el Interruptor SF6 Falla Trifásica en Terminales del interruptor.	65
<b>Figura 3.4.</b>	Voltajes Transitorios de Recuperación en la Falla Trifásica en Terminales del, Interruptor Ideal vs Interruptor en SF6. (a) TRV Fase A. (b) TRV fase B. (c) Fase C	67
<b>Figura 3.5.</b>	Corriente en la Falla Trifásica de Línea Corta en el interruptor Ideal vs Corriente en la Falla Trifásica de Línea Corta en el interruptor SF6	69
<b>Figura 3.6.</b>	Voltajes Transitorios de Recuperación en la Falla Trifásica de Línea Corta, Interruptor Ideal vs Interruptor en SF6. (a) TRV Fase A. (b) TRV fase B. (c) Fase C.	70
<b>Figura 3.7.</b>	Corriente en el interruptor Ideal vs Corriente en el interruptor SF6 en la Falla monofásica en Línea Corta.	72
<b>Figura 3.8.</b>	Voltajes Transitorios de Recuperación Corriente en la Falla monofásica en Línea Corta, Interruptor Ideal vs Interruptor en SF6. (a) TRV Fase A. (b) TRV fase B. (c) Fase C.	74
<b>Figura 3.9.</b>	Corriente en el interruptor Ideal vs Corriente en el interruptor SF6 en apertura de la Línea en Vacío	76
<b>Figura 3.10</b>	Voltajes Transitorios de Recuperación en apertura de la línea en vacío, Interruptor Ideal vs Interruptor en SF6. (a) fase A. (b) fase B. (c) fase C.	78
<b>Figura 4.1.</b>	Representación del TRV de Cuatro parámetros	81
<b>Figura 4.2.</b>	Trazado para cuatro parámetros	82

<b>Figura 4.3.</b>	Representación del TRV de Dos parámetros.	82
<b>Figura 4.4.</b>	Voltaje Transitorio de Recuperación en la fase A en Falla Trifásica en Terminales del interruptor	86
<b>Figura 4.5.</b>	Envolvente de esfuerzos en la Fase A en Falla Trifásica en Terminales del interruptor	86
<b>Figura 4.6.</b>	Voltaje Transitorio de Recuperación en la fase B en Falla Trifásica en Terminales del interruptor	87
<b>Figura 4.7.</b>	Envolvente de esfuerzos en la Fase B en Falla Trifásica en Terminales del interruptor	88
<b>Figura 4.8.</b>	Voltaje Transitorio de Recuperación en la fase C en Falla Trifásica en Terminales del interruptor	88
<b>Figura 4.9.</b>	Envolvente de esfuerzos en la Fase C en Falla Trifásica en Terminales del interruptor	89
<b>Figura 4.10.</b>	Voltaje Transitorio de Recuperación en la fase A , debido a Falla Monofásica en un corto tramo de la Línea	90
<b>Figura 4.11.</b>	Envolvente de esfuerzos en la Fase A, debido a Falla Monofásica en un corto tramo de la Línea	91
<b>Figura 4.12.</b>	Voltaje Transitorio de Recuperación en la fase B, debido a Falla Monofásica en un corto tramo de la Línea	92
<b>Figura 4.13.</b>	Envolvente de esfuerzos en la Fase B, debido a Falla Monofásica en un corto tramo de la Línea	92
<b>Figura 4.14.</b>	Voltaje Transitorio de Recuperación en la fase C, debido a Falla Monofásica en un corto tramo de la Línea	93
<b>Figura 4.15</b>	Envolvente de esfuerzos en la Fase C, debido a Falla Monofásica en un corto tramo de la Línea	94
<b>Figura B.1</b>	Ventana para comprimir el circuito	104
<b>Figura B.2</b>	Icono del interruptor de potencia	105
<b>Figura B.3</b>	Ventana seleccionando la opción Edit definitions	105
<b>Figura B.4.</b>	Ventana seleccionando editar icono	106
<b>Figura B.5</b>	Icono del interruptor SF6 con su nueva apariencia	106
<b>Figura C.1.</b>	Sistema de transmisión de 500 kV.	107
<b>Figura D.1</b>	Tareas principales del programa digital ATP	109
<b>Figura D.2</b>	Ventana para el ingreso de la fuente de voltaje AC source (1&3)	110
<b>Figura D.3</b>	Ventana para el ingreso de parámetros de la rama lineal.	111
<b>Figura D.4</b>	Cuadro de Dialogo de parámetros generales en el modelo de línea	114



	JMarti.	
<b>Figura D.5</b>	Datos de la disposición de conductores y configuración de torres en el modelo de línea JMarti.	114
<b>Figura D.6</b>	Cuadro de dialogo de la rutina Satura	115
<b>Figura D.7</b>	Cuadro de dialogo del modelo utilizado el banco de reactores.	116
<b>Figura D.8</b>	Ventana de la clase de interruptores	117
<b>Figura D.9</b>	Cuadro de dialogo para el interruptor controlado por el tiempo	117
<b>Figura F.1</b>	S.N.I. Incorporado el nivel de 500 kV en estado estable (Parte Norte)	119
<b>Figura F.2</b>	S.N.I. Incorporado el nivel de 500 kV en estado estable (Parte Sur)	120

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b>	Relación entre el voltaje nominal y el tipo de interruptor	13
<b>Tabla 1.2</b>	Clasificación de maniobras de interruptores de potencia	19
<b>Tabla 2.1.</b>	Comparación de los Modelos de Arco	49
<b>Tabla 2.2.</b>	Parámetros de las ecuaciones de Cassie y Mayr	50
<b>Tabla 2.3.</b>	Líneas de transmisión a 500 Kv	53
<b>Tabla 2.4.</b>	Banco de Reactores en los extremos de las líneas	53
<b>Tabla 2.5.</b>	Parámetros usados en la simulación para L/T de 500 Kv	53
<b>Tabla 2.6.</b>	Parámetros de secuencia para L/T de 500 kV	54
<b>Tabla 2.7</b>	Características del conductor ACAR 750 para L/T de 500 kV	56
<b>Tabla 2.8</b>	Características del conductor ACAR 1200 para L/T de 230 kV	56
<b>Tabla 2.9</b>	Características del conductor ACSR 1113 para L/T 230 kV	57
<b>Tabla 2.10</b>	Características del cable de guardia de Acero Galvanizado	57
<b>Tabla 2.11</b>	Características del cable de guardia tipo OPGW	57
<b>Tabla 3.1</b>	Resultados del corte de corriente en una falla trifásica en los terminales del interruptor en la S/E Inga	68
<b>Tabla 3.2.</b>	Resultados del corte de corriente en una falla trifásica aplicada en un corto tramo de la Línea Inga – Yaguachi	71
<b>Tabla 3.3.</b>	Resultados del corte de corriente en una falla Monofásica aplicada en un corto tramo de la Línea Inga – Yaguachi	75
<b>Tabla 3.4.</b>	Resultados del corte de corriente en una interrupción de corrientes capacitivas aplicada en la Línea Inga – Yaguachi en vacío	79
<b>Tabla 4.1.</b>	Valores estándar del TRV, para valores superiores a 245 kV	84
<b>Tabla 4.2.</b>	Comparación de resultados con valores Estándar	89
<b>Tabla 4.3.</b>	Comparación de resultados con valores Estándar	93
<b>Tabla A.1</b>	Características técnicas de un interruptor de potencia ABB	102

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

<b>ACAR</b>	Aluminium Conductor Alloy Reinforced
<b>ACSR</b>	Aluminum Conductors Steel Reinforced
<b>ATP</b>	Alternative Transient Program
<b>C</b>	Capacitancia de la línea de transmisión
<b>CELEC</b>	Corporación Eléctrica del Ecuador
<b>L</b>	Inductancia de la línea de transmisión
<b>L/T</b>	Línea de transmisión
<b>MS</b>	Milisegundos
<b>OPGW</b>	Optical ground wire
<b>R</b>	Resistencia
<b>RRRV</b>	Tasa de Recuperación de Voltaje
<b>RV</b>	Voltaje de Recuperación
<b>SF6</b>	Hexafluoruro de Azufre
<b>S/E</b>	Subestación
<b>SNT</b>	Sistema Nacional de Transmisión
<b>SIN</b>	Sistema Nacional Interconectado
<b>TRANSELECTRIC</b>	compañía Nacional de Transmisión Eléctrica
<b>TRV</b>	Voltaje Transitorio de Recuperación
<b>S</b>	Segundos



# **OBJETIVOS**

## **OBJETIVO GENERAL**

- En base al análisis de parámetros, características, normas de operación y de tecnologías de interrupción de equipos de corte en Sistemas Eléctricos de Potencia, proponer, un tipo de interruptor conveniente para una línea de 500 kV, para lo cual se realizará una modelación usando el ATP para los eventos a los cuales va a estar sometido el interruptor.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar los parámetros básicos de operación del interruptor y los efectos que producen en la interacción con el Sistema Eléctrico de Potencia.
- Definir el arco eléctrico y analizar las diversas técnicas que son adoptadas para la extinción del mismo, tomando en cuenta los transitorios electromagnéticos producidos en la operación del interruptor en Sistema de 500 kV.
- Analizar mediante casos de estudio los diferentes métodos que pueden ser aplicados en la estimación de los parámetros de los Interruptores.
- Analizar las normas y valoraciones a las que están sujetas los equipos de corte para sistemas de 500 kV.
- Describir las diferentes tecnologías de interruptores que se usan en la actualidad para tener una amplia información acerca del equipo que se va a sugerir.
- Comprobar mediante simulaciones en ATP que el interruptor sugerido se ajusta a las normas y a las solicitaciones requeridas por el sistema de 500 kV.

## **ALCANCE**

Sugerir un tipo de interruptor para la línea de 500 kV, mediante el estudio de parámetros que afectan tanto en la operación del equipo como en el sistema, justificando la valoración de estos parámetros a partir de las normas establecidas.

Con la ayuda del programa digital ATP realizar la modelación del funcionamiento del interruptor dentro del sistema frente a situaciones de falla que se puedan presentar.

## **JUSTIFICACIÓN**

Debido a la futura implementación en el Ecuador del sistema de 500 kV, se crea la necesidad de realizar profundos estudios de los equipos de corte que intervienen en dicho sistema. La planificación de estos sistemas resalta que los criterios de operación más importantes son la continuidad, confiabilidad, maniobrabilidad y la flexibilidad que se logra mediante los equipos de conexión/corte, tomando en cuenta estas características y asumiendo que en este sistema predominan las fallas por maniobra. Se pretende realizar un estudio de la funcionalidad del interruptor con el fin de establecer criterios convenientes que permitan sugerir un interruptor con una alta eficiencia y eficacia en su operación dentro del sistema.

## **ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**

El capítulo I, contiene el fundamento teórico de arco eléctrico e interruptores, además, presenta una breve descripción de las diferentes tecnologías con sus respectivas características que se tomarán en consideración para el desarrollo del proyecto.

El capítulo II, indica la descripción y la representación de los elementos que se utilizan para la modelación del sistema considerado en el proyecto, mediante ATP. Incluye la modelación del interruptor representado mediante ecuaciones

matemáticas que serán implementadas mediante el lenguaje de programación MODELS.

El capítulo III, se realiza las simulaciones de los posibles eventos a los cuales podría estar sometido el interruptor de potencia en la operación de apertura. Incluye el análisis de los voltajes obtenidos con el interruptor ideal propio del programa ATP y el interruptor modelado.

El capítulo IV, presenta el análisis y la comparación de los valores obtenidos en el Capítulo III con la Norma IEC 62271-100 (High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: high voltage alternating-current circuit breakers).

Finalmente el capítulo V, presenta las conclusiones que se obtienen de este trabajo, y algunas recomendaciones respecto al mismo.

## **PRESENTACION**

Como parte del desarrollo del sistema eléctrico ecuatoriano, CELEC EP - Transelectric ha propuesto el Plan de Expansión 2010 - 2020 para el Sistema Nacional de Transmisión (SNT), en donde consta el sistema a nivel de 500 kV para el cual se debe considerar el diseño de líneas y subestaciones a este nivel de voltaje. El presente proyecto pretende sugerir el tipo de interruptor adecuado en base a estudios de transitorios electromagnéticos mediante el software ATP, realizando una modelación dinámica del arco, lo cual da una idea más cercana a la realidad del fenómeno de la interrupción de la corriente.

Para el análisis propuesto se ha tomado como referencia la línea en vías de diseño El Inga – Yaguachi a nivel de 500 kV especificada en el Plan de Expansión de Transmisión Período 2010-2020.

La simulación del interruptor de potencia dentro de una red eléctrica se desarrolla a partir de modelos que garanticen la representación del arco eléctrico que es formado en la operación del interruptor.



## RESUMEN

Este proyecto presenta el estudio del interruptor de potencia en base a la modelación del arco eléctrico mediante las ecuaciones que describen el comportamiento del arco y que son propuestas por Cassie y Mayr. La implementación del modelo se realiza mediante el lenguaje de programación MODELS del paquete computacional ATP, donde esta nueva representación del interruptor es vista como una “*Caja Negra*” en la que se tiene una corriente de excitación en la entrada y la resistencia del arco variable en el tiempo en la salida.

Con la simulación del interruptor en la S/E El Inga incluido el Sistema Nacional Interconectado se realizó un equivalente a nivel de 230 kV del SNI y la implementación de las líneas de 500 kV con el cual se determina valores de transitorios electromagnéticos producidos en la operación de apertura del interruptor, considerando fallas kilométricas tanto trifásicas como monofásicas y el corte de pequeñas corrientes capacitivas.

Con los valores obtenidos del TRV en los diferentes casos de estudio se determina la tasa de crecimiento del voltaje de recuperación, tomando en cuenta que estos parámetros son los que determinan el límite de la capacidad de interrupción.

Finalmente se realiza un análisis comparativo de los valores obtenidos en la falla trifásica aplicada en terminales del interruptor y la falla monofásica aplicada en un corto tramo de la línea con los valores establecidos en la Norma IEC 62271-100.

# **CAPITULO 1**

## **MARCO TEORICO**

Este primer capítulo presenta el fundamento teórico del interruptor de potencia y el arco eléctrico formado en la operación de apertura, también incluye una breve descripción de las diferentes tecnologías de interrupción y de los transitorios electromagnéticos producidos por la interacción del interruptor con el Sistema Eléctrico de Potencia.

### **1.1 DEFINICIONES GENERALES**

#### **1.1.1 INTERRUPTOR**

El interruptor de potencia es un dispositivo cuya función es asegurar el flujo de corriente en una red eléctrica bajo condiciones normales de operación e interrumpirlo cuando se presentan condiciones anormales o fallas y abrir o cerrar para operaciones de corte o accionamiento.

El interruptor, sin tomar en cuenta su aplicación particular, debe ser capaz de:

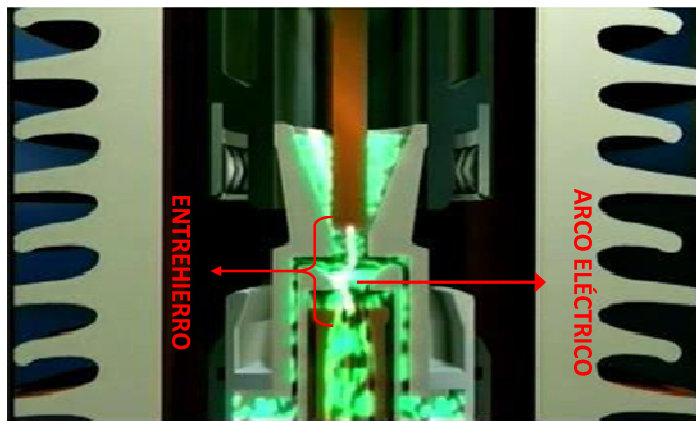
1. Interrumpir cualquier nivel de corriente que circule por sus contactos, desde unos cuantos amperios hasta su capacidad de interrupción de corriente de corto circuito, tanto simétrica como asimétrica, a los voltajes especificados en la norma IEC-62271-100.

2. Cerrar con la corriente máxima de corto circuito a voltaje nominal entre fases.
3. Conectar y desconectar corrientes inductivas, capacitivas (debidas a líneas, cables y bancos de capacitores) y corrientes de reactores sin generar sobretensiones excesivas que superan las capacidades dieléctricas del sistema de transmisión o distribución.
4. Efectuar operaciones de cierre/apertura cuando sea requerido
5. Conducir su corriente nominal sin sobrecalentar sus componentes.

### **1.1.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL INTERRUPTOR**

La operación de cierre, apertura o recierre de los contactos de un interruptor se realiza por medios mecánicos, los cuales actúan bajo presión, haciendo posible el flujo de la corriente eléctrica o sin interrupción.

Cuando los contactos se separan forman un entrehierro entre ellos, constituido por un elemento dieléctrico e interruptivo (aire, gas SF<sub>6</sub>, vacío, aceite). En este elemento se forma el arco eléctrico a través del cual la corriente fluye de un contacto a otro, como se muestra en la figura 1.1. Es en este entrehierro donde el circuito es vulnerable a ser interrumpido ya que la corriente abandona su trayectoria original (contactos) para formar un arco en el medio aislante e interruptivo; cuando se logra disminuir la conductividad de esta trayectoria hasta extinguir el arco, la corriente deja de fluir. Por lo tanto, la interrupción de un circuito eléctrico comprende de dos pasos [1]:



**Figura 1.1** Representación del arco eléctrico formado entre los contactos del interruptor

1. Intercalar un entrehierro a la trayectoria original.
2. Eliminar la conductividad del entrehierro.

El principio fundamental de este proceso es la velocidad de restablecimiento del medio dieléctrico en el entrehierro. Por ejemplo, para un entrehierro con un medio aislante gaseoso, el gas es semiconductor a altas temperaturas y en función de su enfriamiento se vuelve aislante; esto es posible ya que el conductor gaseoso, también conocido como plasma del arco, es la única sustancia capaz de cambiar de un buen conductor a un aislador confiable en un corto periodo de tiempo.

### 1.1.3 PROCESO DE CIERRE

Esta operación se realiza para energizar alguna parte del sistema. Antes de ocurrir el cierre existe un voltaje entre los contactos del interruptor, a este voltaje se le denomina "*voltaje de cierre*". Al valor máximo de la corriente que fluye al cerrar el interruptor se le llama "*corriente de cierre*".

Durante el cierre existen esfuerzos eléctricos entre los contactos a medida que éstos se acercan, estableciéndose arcos de preencendido que ocasionan desgaste adicional de los contactos.

### 1.1.4 PROCESO DE APERTURA

Esta operación se realiza con el objetivo de desenergizar o interrumpir alguna parte del sistema. Estando cerrado el interruptor se libera el mecanismo de apertura el cual permite que los contactos principales se separen; la separación de los contactos genera el arco eléctrico. La interrupción de la corriente consiste en convertir un espacio altamente ionizado en el entrehierro en un buen aislante con el objeto de que la corriente no fluya a través de él. A medida que la corriente senoidal se aproxima al cruce por cero el medio aislante ionizado pierde rápidamente temperatura con lo que recupera sus condiciones aislantes. En esta última condición aparece el voltaje del sistema en los terminales del interruptor denominado Voltaje Transitorio de Recuperación, que será nombrado como (*TRV*) debido a sus siglas en inglés *Transient Recovery Voltage*.

### **1.1.5 CARACTERÍSTICAS DE ASIGNACIÓN DEL INTERRUPTOR**

Las características de asignación de un interruptor de potencia están establecidas en las normas aplicables. Estas características nominales consideran los límites mínimos de funcionamiento las cuales implican estudios de *TRV*, Tasa de Recuperación de Voltaje *RRRV* (*rate of rise of Recovery Voltage*) y Voltaje de Recuperación *RV* (*Recovery Voltage*) con las que el equipo debe cumplir. Tales límites se aplican solamente dentro de condiciones de operaciones específicas.

En la placa de datos de los interruptores de potencia están inscritas las características nominales como voltaje, corriente y otras de valor conceptual importante, como la frecuencia nominal, mencionadas en las normas IEC y ANSI. También se incluyen requerimientos adicionales que son derivados, principalmente, de estos dos parámetros básicos.

Algunas de las principales características que describen a los interruptores de potencia son las siguientes:

- Voltaje nominal
- Voltaje máximo de diseño
- Voltaje Transitorio de Recuperación (*TRV*)

- Corriente nominal
- Corriente de cortocircuito
- Frecuencia nominal
- Medio de extinción
- Temperatura ambiente
- Secuencia de operación nominal
- Capacidad momentánea
- Capacidad de interrupción

## **1.2 EL ARCO ELÉCTRICO**

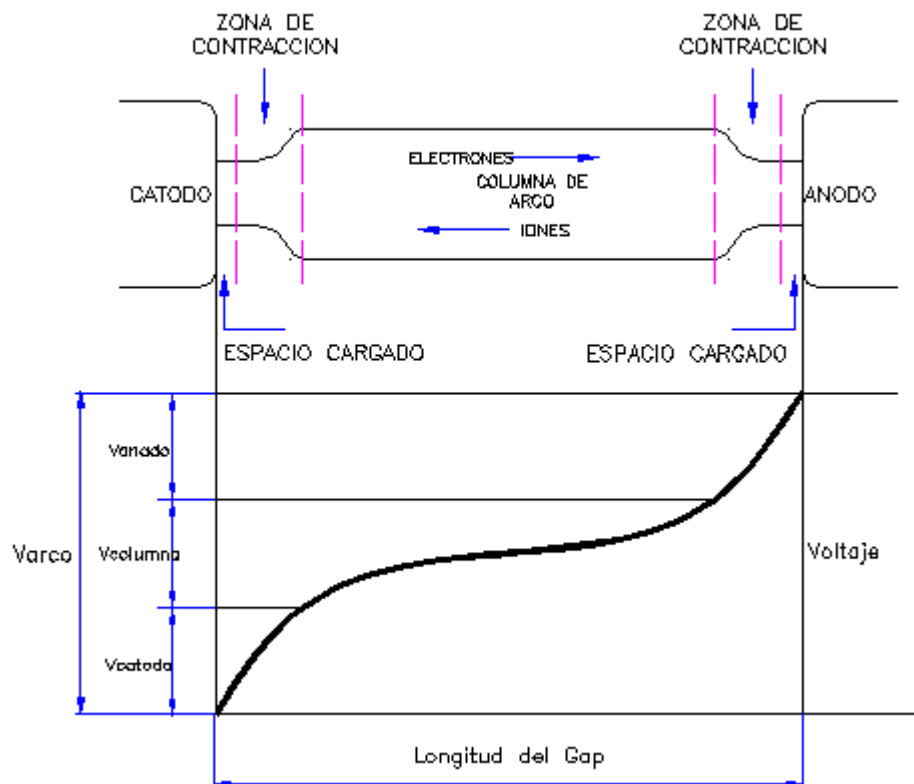
Como parte importante del funcionamiento de un interruptor de potencia es necesario comprender lo que es el arco eléctrico.

Cuando un interruptor corta una corriente se genera un fenómeno conocido como arco eléctrico. Justo al momento en que los contactos del interruptor empiezan a separarse, empieza a fluir por el medio extintor una alta densidad de corriente como consecuencia de varios factores: la energía cinética de las moléculas que rodean la superficie de los contactos combinada con la energía del arco, hacen que estas pasen de un estado sólido a un estado líquido. La energía aportada por el incremento de temperatura y por las fuerzas atractivas intermoleculares (fuerzas de Van der Waals), hacen que del estado líquido pasen a estado gaseoso [2]. El consiguiente aumento de la temperatura le aporta una gran cantidad de energía a las moléculas, separándolas en átomos, y si el nivel de energía sigue en aumento, los electrones orbitales son separados quedando libres y dejando iones positivos. Este estado es conocido como estado de plasma.

Debido a estos electrones e iones dejados en el canal de plasma a alta temperatura, presenta una alta conductividad y la corriente continúa su flujo después de la separación de los contactos.

El arco eléctrico puede estar generalmente dividido en tres regiones: la región del cátodo (región negativa), la columna intermedia (plasma), y la región del ánodo (región positiva), tal como se muestra en la Figura 1.2, en la que también presenta la distribución potencial típica a lo largo del canal del arco entre los contactos del interruptor.

Para alcanzar la estabilidad molecular y por consiguiente la extinción del arco, es necesario que se involucren nuevos iones positivos y electrones para crear neutralidad en el canal de plasma; de esta labor se encarga el medio de extinción del interruptor.



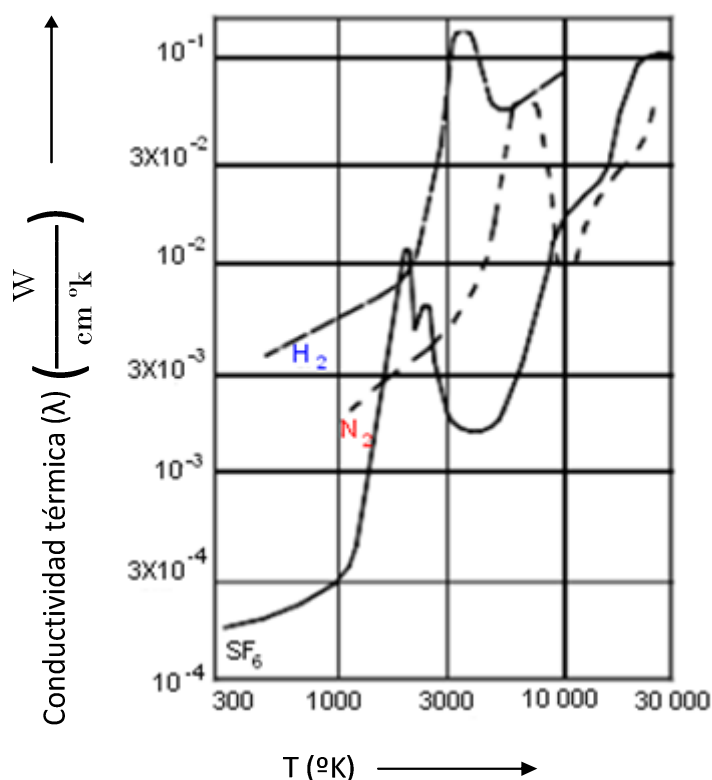
**Figura1.2** Distribución potencial a lo largo de las regiones de un canal del arco [2].

De acuerdo al medio de extinción, la disociación de éste ocurrirá a temperaturas específicas y tendrá una influencia determinante en la capacidad de extinción del arco, tal como se muestra en la Figura 1.3. Por ejemplo, si el medio de extinción es el aire, cuyo principal componente es el nitrógeno, la separación en átomos del nitrógeno ocurre aproximadamente a los 5000 °K y su ionización ocurre alrededor de los 8000 °K.

En cambio, si es SF<sub>6</sub>, la separación en átomos de azufre y flúor ocurre cerca a los 1800 °K y su ionización entre los 5000 y 6000 °K. Es por esto que un interruptor con medio de extinción en SF<sub>6</sub> puede manejar voltajes más altos que un interruptor de aire, [3].

### 1.3 TECNOLOGÍA APLICADA A LOS INTERRUPTORES

Para lograr una interrupción de corriente exitosa, un interruptor debe cumplir con las siguientes condiciones: la potencia disipada durante el arco debido al efecto Joule debe ser menor que la capacidad de enfriamiento del dispositivo, la tasa de desionización del medio debe ser alta, y el espacio entre contactos debe tener suficiente rigidez dieléctrica [3].



**Figura 1.3** Conductividad de los gases en función de la temperatura [4].

El elemento más significativo que distingue las diversas técnicas de interrupción es el medio de extinción del arco. Es aquel elemento del interruptor donde se





Vacio									
-------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

### **1.3.1 INTERRUPTORES EN ACEITE**

En este tipo de interruptores se incluyen los interruptores de gran volumen así como los de pequeño volumen, ya que ambos tienen el mismo proceso de interrupción de la corriente.

Los contactos de estos interruptores se encuentran inmersos en aceite, el principio de funcionamiento es el de utilizar la energía del arco eléctrico para vaporizar el aceite y descomponerlo en metano, hidrógeno y etileno para alcanzar la estabilidad del canal de plasma y así enfriar y extinguir el arco eléctrico.

### **1.3.2 INTERRUPTORES EN AIRE**

El aire ha sido utilizado como aislante desde el comienzo de las tecnologías eléctricas. También puede ser utilizado como medio de extinción en interruptores de potencia aunque limitado para bajos y medios voltajes alcanzando un máximo de 50 kV.

Su utilización es principalmente para medios voltajes presentando ventajas como ausencia de riesgos de incendio o explosión, operación muy rápida, alta capacidad de ruptura, menor daño a los contactos y menor peso. Entre las desventajas encontramos que poseen una compleja instalación debido a la red de aire comprimido que incluye motor, compresor, cañerías y su alto costo debido a su compleja construcción.

El principio de extinción del arco eléctrico en este tipo de interruptores, es la descomposición del nitrógeno, principal componente del aire.

### **1.3.3 INTERRUPTORES EN SF<sub>6</sub>**

El Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>): es un gas pesado, incoloro y no tóxico, con una rigidez dieléctrica tres veces la del aire causado por los átomos extraordinariamente electronegativos del flúor.

Las principales razones que determinan su uso en equipos de alto voltaje son [5-6]:

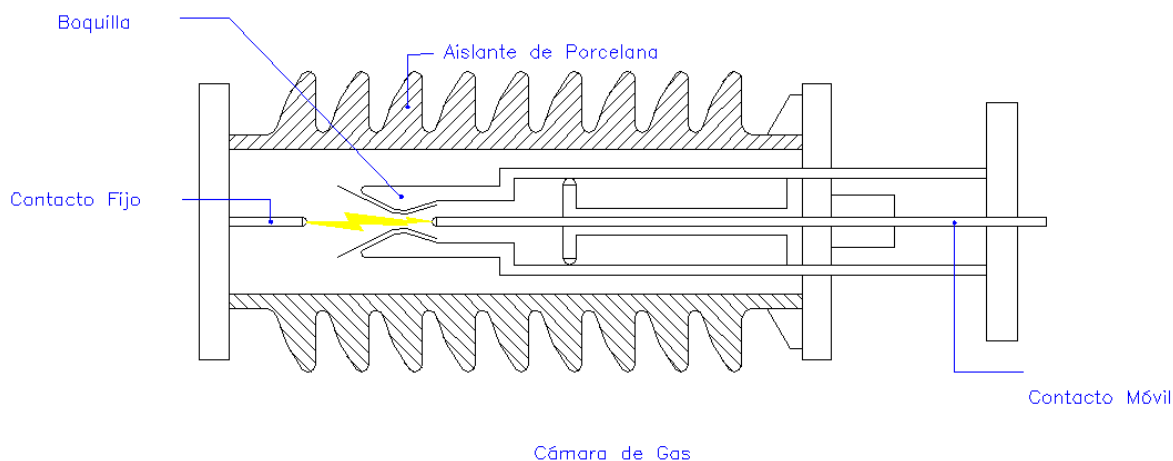
- Ser un excelente medio aislante
- Poseer características favorables en la interrupción de corriente eléctrica
- Alta rigidez dieléctrica, conductividad térmica y estabilidad química.

La molécula de gas SF<sub>6</sub> tiene una estructura simétrica, siendo por eso muy estable. La distribución potencial interna y las propiedades de absorción de energía resultan de la naturaleza electronegativa de la molécula de gas SF<sub>6</sub>, que capta los electrones libres y retarda el fenómeno de avalancha que inicia la disrupción.

La rigidez dieléctrica del SF<sub>6</sub> es alrededor de 2.5 veces la del aire a 1 atmósfera de presión en un campo eléctrico homogéneo. A grandes capacidades de transferencia de calor y a bajas temperaturas de ionización el SF<sub>6</sub> tiene excelentes propiedades para la extinción del arco eléctrico. Es auto-regenerable y no forma depósitos de material conductor después de la extinción del arco. Bajo el efecto de la temperatura del arco el SF<sub>6</sub> se disocia en átomos de flúor y azufre, estos capturan los electrones portadores de carga de la corriente hasta lograr el corte de la corriente y luego el gas se regenera por enfriamiento obteniéndose así el apagado del arco.

El primer interruptor comercial a base de este potente medio extinguidor salió al mercado en 1959, elevando el rango de operación a 550 kV y 63 kA.

Existen diferentes tipos, llamados de simple o doble presión, de arco rotante, auto-soplante; diferenciados por el método empleado para mejorar la acción del SF<sub>6</sub> sobre el arco eléctrico.



**Figura 1.4** Esquema de un Interruptor con gas SF6

### 1.3.4 INTERRUPTORES EN VACIO

Estos interruptores poseen los contactos inmersos en una cápsula con alto vacío que es el encargado de apagar el arco eléctrico debido a la altísima rigidez dieléctrica alcanzada.

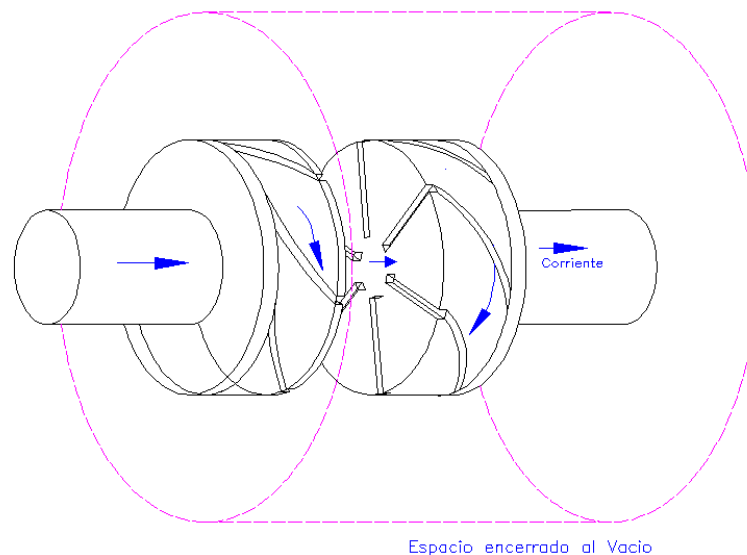
Utiliza como medio de extinción el vacío en el cual no se puede engendrar plasma debido a la ausencia de los átomos que se requieren para la ionización.

La técnica de interrupción de corriente en vacío consiste en la separación del contacto móvil del contacto fijo dentro de la cámara de vacío donde el arco eléctrico es conducido en su propio campo magnético, mientras que el movimiento del mismo y su estado son controlados por el arreglo de los contactos.

Cabe destacar la importancia que tiene el material con que se fabrican los contactos de los interruptores en vacío. La estabilidad del arco al momento de separarse los contactos, depende principalmente de la composición química del material con que fueron fabricados; si el arco es inestable, significa que se apaga rápidamente antes del cruce natural por cero de la corriente, generando elevados cambios en la corriente con los consiguientes sobrevoltajes.

Para evitar esta situación se buscan materiales que presenten baja presión de vapor en presencia de arco. Estos materiales no son fáciles de encontrar, pues tienen propiedades no del todo apropiadas para uso en interruptores en vacío. Por ejemplo, materiales con buena conductividad térmica y eléctrica tienen bajos puntos de fusión y ebullición y alta presión de vapor a altas temperaturas. Sin embargo, metales que presentan baja presión de vapor a altas temperaturas son malos conductores eléctricos.

Para combinar ambas características se han investigado aleaciones entre metales y materiales no metálicos como Cobre-Bismuto, Cobre-Plomo, etc.



**Figura 1.5** Esquema de un Interruptor en Vacío.

### 1.3.5 INTERRUPTORES EN SEMICONDUCTORES

La descripción de la técnica de interrupción de la corriente eléctrica no estaría completa si no se menciona el uso de los semiconductores. La resistencia de los semiconductores se caracteriza por pasar rápidamente de un valor muy bajo, a un valor considerable cuando la corriente eléctrica pasa por el valor cero, como ocurre en el arco eléctrico; pero en este caso el fenómeno ocurre a temperatura ambiente.

Los semiconductores tienen, por su propia naturaleza, una inercia térmica muy baja, lo que caracteriza la incapacidad de soportar grandes sobrecargas, incluso durante cortos periodos de tiempo. Otras ventajas significativas que se dispone en la técnica de interrupción de semiconductores, son:

- Obtener condiciones ideales de interrupción sin causar sobrevoltajes de maniobra;
- Ausencia de desgaste y mantenimiento en los contactos y piezas mecánicas;
- Capacidad para predeterminedar el rendimiento del equipo.

## **1.4 SOBREVOLTAJES DEBIDOS A LA OPERACIÓN DEL INTERRUPTOR**

Un sobrevoltaje es un valor de voltaje superior al voltaje máximo nominal de operación del sistema, puede ser de origen externo provocado por descargas atmosféricas, o bien se genera internamente ya sea por las operaciones de maniobra o por perturbaciones en la red. Los sobrevoltajes originados principalmente por la actuación de interruptores de potencia en las subestaciones corresponden a los sobrevoltajes de frente lento o por maniobra.

### **1.4.1 SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS DE FRENTE LENTO O POR MANIOBRA**

Son sobrevoltajes de naturaleza oscilatoria, de corta duración y fuertemente amortiguados, con frentes de onda y tiempos de cola que van desde varios cientos de microsegundos hasta varios milisegundos, y cuya frecuencia varía entre 2 y 20 kHz. Estos sobrevoltajes son originados principalmente por la operación de los disyuntores, aunque también pueden ser causados por súbitas modificaciones en la topología del sistema, tales como: energización y re-cierre de una línea, aparición de fallas y su eliminación, pérdida de carga y establecimiento o interrupción de corrientes inductivas o capacitivas. También se pueden dar por

descargas atmosféricas sobre las líneas de transmisión en un punto alejado a la subestación.

La influencia de los sobrevoltajes de frente lento aumenta con el nivel de voltaje de la red, siendo especialmente determinante para las solicitaciones dieléctricas de los equipos en redes de transmisión de extra y ultra alto voltaje, ya que los sobrevoltajes por maniobras generadas por la energización y la desenergización a alta velocidad de líneas de transmisión por interruptores, introducen esfuerzos dieléctricos produciendo envejecimientos prematuros en el aislamiento de los equipos, dando un factor importante en el diseño de los mismos.

Las operaciones de maniobra pueden dividirse en dos categorías según la maniobra origine la energización (cierre) o desenergización (apertura) de algunos de los componentes del Sistema Eléctrico de Potencia [7]. En la Tabla 1.2 se enumera diferentes casos de acción del interruptor.

**Tabla 1.2** Clasificación de maniobras de interruptores de potencia

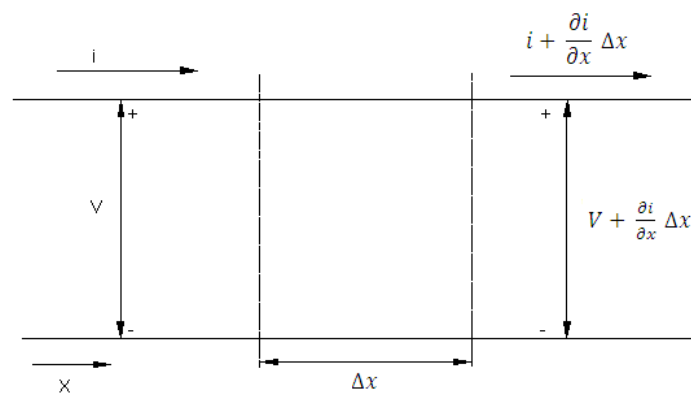
<b>Caso</b>	<b>Tipo De Maniobra</b>
<b>Energización (Cierre)</b>	Líneas de transporte en vacío.
	Líneas con transformadores en vacío.
	Banco de capacitores.
	Banco de transformadores.
	Banco de Reactores.
	Arranque de motores.
	Falla trifásica.
	Falla monofásica.
	Perdida súbita de carga.
<b>Desenergización (Apertura)</b>	Línea de transmisión en vacío
	Falla kilométrica
	Reactores de compensación
	Sistemas fuera de fase
	Banco de transformadores cargado.
	Banco de capacitores.

## 1.4.2 ONDAS VIAJERAS

Cuando una línea de transmisión es sometida a una operación de maniobra surgen ondas de voltaje y corriente que viajan a lo largo de la línea de transmisión a una velocidad cercana a la velocidad de la luz, al llegar estas ondas a la terminal de la línea dan lugar a la aparición de ondas incidentes, reflejadas y refractadas de voltaje y corriente que viajan de regreso por la línea de transmisión sobrepuestas a las ondas iniciales y que debido a las pérdidas en la línea las ondas que viajan son atenuadas y desaparecen después de algunas reflexiones.

### 1.4.2.1 Ecuación de la Onda Viajera

Para determinar la ecuación de la onda viajera se parte del esquema de una línea de transmisión sin pérdidas, que es una representación para líneas de alta frecuencia, como se muestra en la Figura 1.6 en la cual, la distancia  $x$  se medirá a lo largo de la línea de transmisión desde el extremo generador (en lugar del extremo receptor) hasta el elemento diferencial de longitud  $\Delta x$ . El voltaje ( $V$ ) y la corriente ( $i$ ) son funciones de la distancia ( $x$ ) y el tiempo ( $t$ ).



**Figura 1.6** Diagrama esquemático de una sección elemental de una línea de transmisión que muestra una fase y el neutro de retorno [8].

Con operaciones matemáticas que se han desarrollado, la ecuación de la onda viajera en una línea de transmisión sin pérdidas está definida por:



$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = \frac{1}{LC} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \quad (1.1)$$

el voltaje es expresado por

$$V = f(x - vt)$$

siendo:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

donde:

$v$  = velocidad de propagación de una línea de transmisión m/s

#### 1.4.2.2 Reflexiones y Refracciones de Ondas Viajeras

En una línea de transmisión las ondas incidentes, reflejadas y refractadas se producen cuando una onda viajera alcanza una discontinuidad, es decir, un punto de transición en el cual existe una alteración brusca en los parámetros del circuito, que genere una descomposición de dicha onda, como un terminal abierto o cortocircuitado, una unión con otra línea que involucre un cambio de impedancia característica o un transformador. La onda que llega a la discontinuidad es llamada onda incidente y las dos ondas que surgen de la discontinuidad, la que viaja hacia atrás superponiéndose a la incidente o viaja más allá de la discontinuidad, son las llamadas ondas reflejadas y refractadas, respectivamente.

Cuando los límites de tiempo largos son considerados, típicamente varios cientos de microsegundos las ondas reflejadas en la línea deben ser tomadas en cuenta. La Figura 1.7 muestra el proceso de las ondas viajeras al alcanzar el punto de transición.

Cuando una onda de voltaje  $u$  se propaga por la línea de impedancia característica  $Z_1$  y alcanza una línea de impedancia característica  $Z_2$ , penetra en ella con un voltaje  $u_2$  que se expresa por la ecuación:

$$u_2 = u_1 \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1.2)$$

mientras que la onda reflejada, tiene un valor:

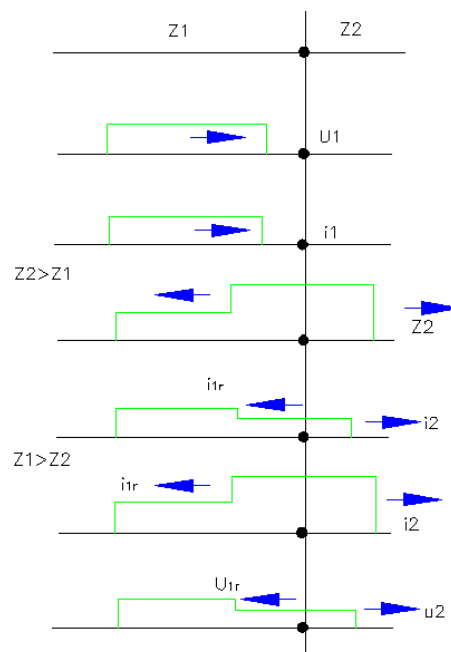
$$u_{1r} = u_1 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (1.3)$$

en cuanto al valor de la corriente es:

$$i_2 = i_1 \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1.4)$$

y la onda reflejada

$$i_{1r} = i_1 \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1.5)$$



**Figura 1.7** Características de una onda viajera al alcanzar el punto de transición de dos líneas de diferente impedancia característica

El paso de una línea de pequeña impedancia característica a una línea de elevada impedancia característica, provoca un aumento de la onda de voltaje y

una disminución de la onda de corriente. Al contrario, el paso de una elevada impedancia característica a una impedancia característica menor origina una reducción de la onda de voltaje y un aumento de la onda de corriente. El caso más característico es el paso de una línea aérea de elevada impedancia característica a un cable aislado de baja impedancia característica.

### 1.4.2.3 Línea Abierta

Cuando el extremo de una línea de transmisión está abierto se aplican igualmente los principios de refracción y de reflexión.

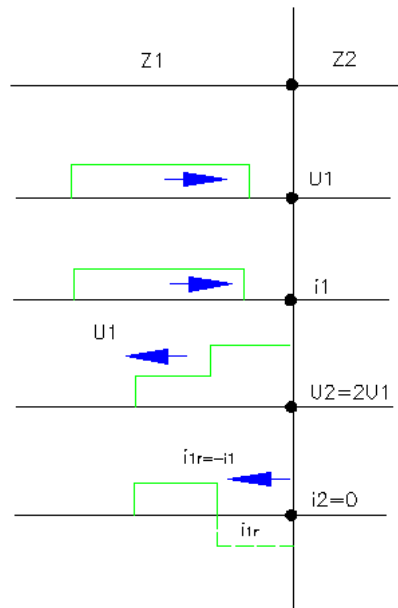
$$i_2 = i_1 \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} = i_1 \frac{\frac{2Z_1}{Z_2}}{\frac{Z_1}{Z_2} + 1} = 0 \quad (1.6)$$

Mientras que la onda de voltaje al final de la línea abierta, actúa como si se encontrara con otra onda de impedancia de igual magnitud, por lo tanto:

$$u_2 = u_1 \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = u_1 \frac{2}{\frac{Z_1}{Z_2} + 1} = 0$$

$$\therefore u_2 = 2u_1 \quad (1.7)$$

Esto significa que la corriente en el extremo de la línea resulta nula y el voltaje el doble. En esta extremidad las ondas incidentes son completamente reflejadas; la onda de voltaje con el mismo signo y la onda de corriente con signo contrario.



**Figura 1.8** Comportamiento de una onda viajera en el extremo abierto de una L/T.

Como la corriente no puede seguir progresando, el valor de la onda de corriente cae a cero. El efecto es como si la onda viajera se encontrara con otra de la misma magnitud avanzando en sentido opuesto y la compensará.

#### 1.4.2.4 Línea en cortocircuito

Si se expresa el estado de cortocircuito por una impedancia característica  $Z_2$  nula, la aplicación de las leyes da los siguientes resultados:

$$u_{1r} = u_1 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = u_1 \frac{\frac{Z_2}{Z_1} - 1}{\frac{Z_2}{Z_1} + 1} = -u_1 \quad (1.8)$$

y recordando que  $Z_2 = 0$ , el valor de  $u_{1r}$  será  $u_{1r} = -u_1$ ; por otro lado, el valor de la corriente reflejada será:

$$i_{1r} = i_1 \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = i_1 \frac{\frac{Z_1}{Z_2} - 1}{\frac{Z_1}{Z_2} + 1} = -i_1 \quad (1.9)$$

es decir, que desde el extremo de la línea retornará una corriente dada por:

$$i_2 = i_1 + i_1 = 2 \times i_1$$

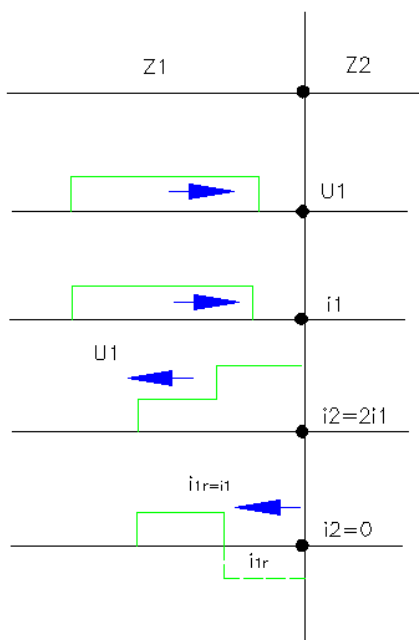
valor que también podemos obtener directamente, a partir de la expresión :

$$i_2 = i_1 \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} = i_1 \frac{2Z_1}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}} = 2i_1 \quad (1.10)$$

por lo tanto, en el punto de cortocircuito, el voltaje es nulo y la corriente es dos veces más intensa, tal como se expresa gráficamente en la Figura 1.9.

## 1.5 INTERACCIÓN DEL ARCO ELÉCTRICO EN SISTEMAS DE POTENCIA

Durante el proceso de interrupción el arco eléctrico pierde rápidamente conductividad a medida que la corriente instantánea se acerca a cero. La respuesta del sistema de potencia a la interrupción de corriente es generar un componente transitorio que ocurre inmediatamente después de que la corriente pasa por cero y un componente en estado estable ( $R_V$ ), que es el voltaje de recuperación que queda después que el transitorio se extingue.



**Figura 1.9** Características de una onda viajera en el punto de cortocircuito de una L/T.

### 1.5.1 VOLTAJE TRANSITORIO DE RECUPERACION (TRV)

El *TRV* es la diferencia entre los voltajes del lado de la fuente y la carga, que aparece entre los terminales del interruptor, después de la interrupción de corriente [9]. Tal como se muestra en la figura 1.10.

El objetivo de determinar el *TRV* es establecer una envolvente de esfuerzos al cual el interruptor está sometido; desde el punto de vista eléctrico los esfuerzos sobre el interruptor pueden ser caracterizados como térmicos y dieléctricos.

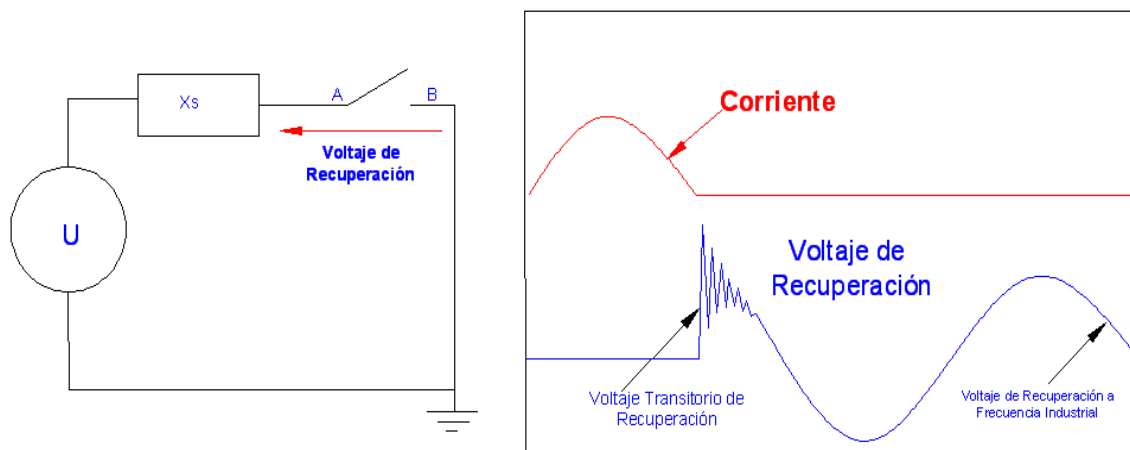
A partir de la interrupción de corriente, mientras se forma el *TRV*, el medio dieléctrico del interruptor se recupera. Así, si el valor de recuperación del gap al instante de la interrupción de corriente es más rápido que la tasa de recuperación del voltaje (*RRRV*), la interrupción en la región térmica tiene éxito soportando un *TRV* función de balance energético del arco, seguido de una recuperación en la región dieléctrica que soporta un voltaje que es función de la rigidez dieléctrica de los contactos. Sin embargo, cuando la tasa de recuperación del voltaje es más rápida que la recuperación del gap, ocurre falla en la operación del interruptor

tanto en la región térmica como en la dieléctrica, provocando reencendidos del arco.

El *TRV* depende de las condiciones y parámetros del circuito por lo que es muy esencial su estudio para la aplicación en interruptores además que es un factor determinante que limita la capacidad de interrupción del disyuntor.

Así mismo, desde el punto de vista de la característica del *TRV*, se destaca: una corriente de preapertura que, calentando el medio de interrupción, define una condición inicial de recuperación de su rigidez dieléctrica, una tasa de crecimiento del *TRV* que debe ser menor a la tasa de recuperación del medio de extinción, el valor máximo del *TRV* que debe estar bajo el máximo de rigidez dieléctrica. Estos parámetros definen la severidad del *TRV*.

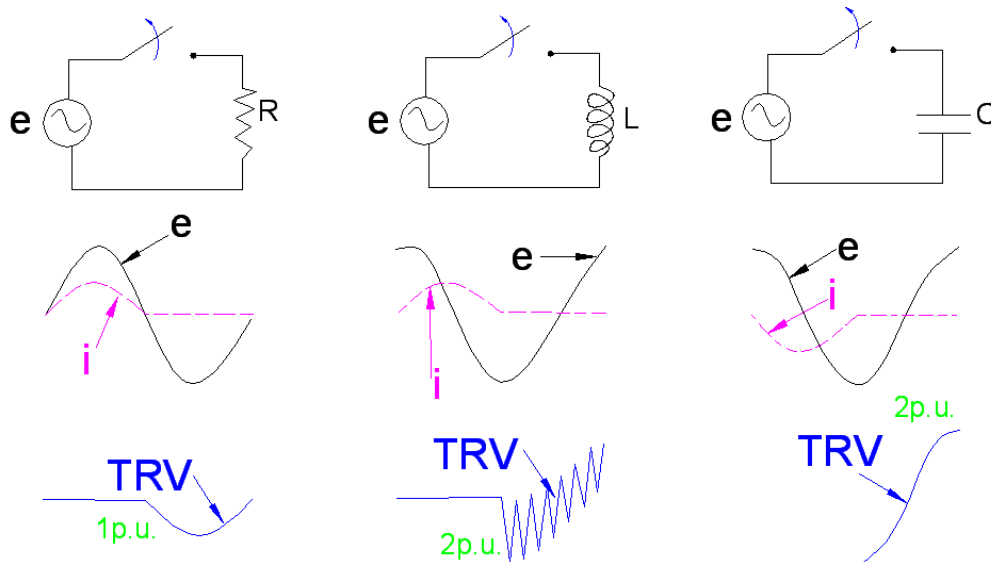
La tasa de crecimiento y la amplitud del *TRV* son de suma importancia, ya que el interruptor debe ser capaz de soportar el *TRV* y el voltaje de recuperación a frecuencia de operación del sistema. Por lo tanto, el *TRV* tiene una evolución a lo largo del tiempo que debe ser compatible con la recuperación térmica y dieléctrica del medio extintor, de tal forma que la maniobra de apertura sea exitosa.



**Figura 1.10** Voltaje Transitorio de Recuperación [9]

## 1.5.2 PRINCIPALES CORRIENTES DE INTERRUPCIÓN

La figura 1.11 muestra el *TRV* a través de las terminales del interruptor en la interrupción de simples circuitos bajo condiciones normales de operación.



**Figura 1.11** Voltaje Transitorio de Recuperación en simples circuitos. (a) Circuito Resistivo (b) Circuito Inductivo (c) Circuito Capacitivo [3]

La operación de apertura en un circuito resistivo (Figura 1.11a) no es usualmente un problema ya que el voltaje de recuperación no tiene ningún componente transitorio, esto se debe a que el voltaje de alimentación es cero en el momento de la interrupción.

Para los circuitos inductivos y capacitivos (Figuras 1.11b y 11c) la descripción del proceso de apertura no es tan sencilla ya que el voltaje de recuperación es severo del orden de 2 veces el caso resistivo. La descripción de los procesos que se originan con la interrupción de corrientes inductivas y capacitivas es detalla a continuación.

### 1.5.2.1 Maniobras con Cargas Inductivas y Capacitivas

Este tipo de maniobras pueden originar sobrevoltajes de frente lento. Esto se debe fundamentalmente a que este tipo de sobrevoltajes producidos por la interrupción de corrientes inductivas y capacitivas están desfasadas alrededor de  $90^\circ$  del voltaje. Por lo tanto, al momento de interrumpir la corriente a su paso por

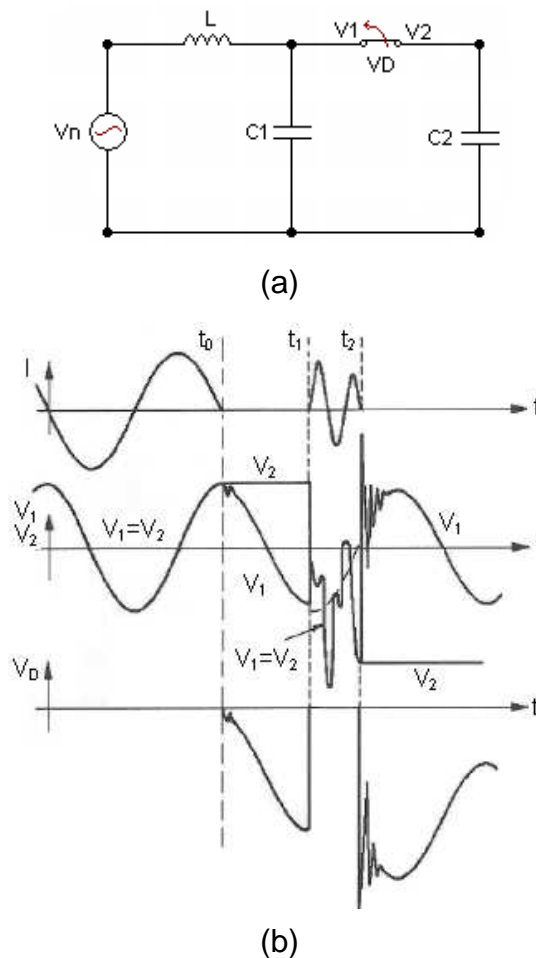


ceros, el voltaje estará en su valor máximo, lo cual ocasiona incrementos o transitorios en el voltaje que aparece a través de los contactos del interruptor luego de haber sido interrumpida la corriente.

#### 1.5.2.1.1 Interrupción de Corrientes Capacitivas

En sistemas de potencia este tipo de corrientes aparecen ante la apertura de bancos de condensadores o líneas de transmisión en vacío.

Para analizar esta maniobra se considerará un circuito con carga capacitiva alimentado a través de una fuente inductiva. La Figura 1.12 muestra el circuito y el comportamiento de las ondas de voltaje y corriente asociadas.



**Figura 1.12** Interrupción de corrientes capacitivas. (a) Circuito capacitivo. (b)

Formas de onda de voltaje y corriente. [10]

Tal como se muestra en la figura, previo a la apertura de los contactos del disyuntor la corriente adelanta  $90^\circ$  al voltaje ya que es predominantemente

capacitiva. En el instante que se inicia la separación de los contactos del interruptor se establece un arco eléctrico el cual mantiene el flujo de corriente en el circuito hasta su siguiente paso por cero, donde el arco pierde conductividad y la corriente se interrumpe, en este instante el voltaje está en su valor máximo. La corriente se ha interrumpido y el capacitor de carga  $C2$  queda cargado al voltaje máximo de la fuente +1 p.u. Conforme el voltaje de la fuente cambia de polaridad, el voltaje de recuperación en el disyuntor aumenta hasta que el voltaje de la fuente alcanza su valor máximo y el de recuperación un valor de 2 p.u. En este punto del proceso, si entre los contactos del disyuntor no hay una rigidez dieléctrica suficiente se producirá el reencendido del arco, como es el caso de la Figura 1.12b.

Una vez que ha ocurrido la reignición, la corriente vuelve a ser interrumpida a su paso por cero, dejando al capacitor cargado a un voltaje superior, e incluso 3 p.u. Una segunda reignición podría ocurrir cuando el voltaje de recuperación alcance su nuevo valor máximo de hasta 4 p.u. Si nuevas reigniciones ocurren este proceso podría ser recurrente y el voltaje podría ir incrementándose cada vez más, en la práctica la falla del aislamiento interrumpiría el proceso.

#### *1.5.2.1.2 Interrupción de Corrientes Inductivas*

Para analizar el proceso de interrupción de corrientes inductivas se considera el circuito mostrado en la Figura 1.13a cuya corriente de carga es predominantemente inductiva. Las Figuras 1.13b y 1.13c muestran el comportamiento transitorio del voltaje.

Análogo al caso anterior, previo a la apertura de los contactos del disyuntor la corriente retrasa  $90^\circ$  al voltaje. Con el fin de interrumpir la corriente, los contactos abren y la corriente continúa fluyendo a través del arco eléctrico formado entre los contactos hasta su paso por cero donde el arco se extingue, en este instante el voltaje está en su valor máximo. Si el arco se extingue sin que ocurra reignición como se muestra en la Figura 1.13 (b), el voltaje del lado de la carga oscilará a una frecuencia mayor que la fundamental debido al efecto de las capacitancias

parásitas representadas en  $C_2$  y la inductancia de carga  $L_2$ , en ese momento el voltaje de recuperación crece instantáneamente hasta su valor máximo para luego amortiguarse. La frecuencia de oscilación del  $TRV$  determinada por la  $L$  y  $C$  en cuestión es:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.11)$$

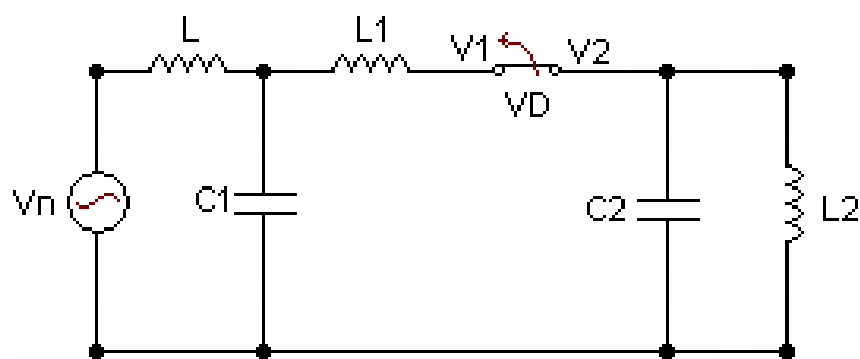
donde:

$L$  es la inductancia de cortocircuito

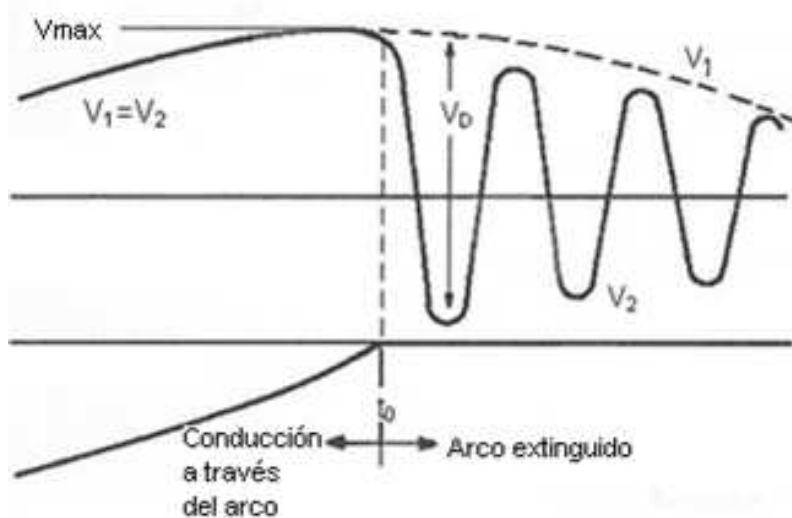
$C$  capacitancia de suministro

Debido al voltaje de recuperación entre los contactos del disyuntor, pueden existir condiciones de reignición, en cuyo caso la corriente vuelve a circular y el voltaje del lado de la carga trata de seguir al voltaje del lado de la fuente. Luego, una vez que la corriente pase por cero y se extinga el arco el voltaje de recuperación vuelve a alcanzar su valor máximo que debido a estas condiciones es mucho mayor que en caso de no tener reignición, alcanzando incluso valores mayores que el voltaje de la fuente. Este proceso se ilustra en la Figura 1.13 (c) y puede repetirse varias veces en función del número de reencendidos, provocando que el voltaje del lado de la carga aumente considerablemente. Cabe notar que el arco se extingue cuando la corriente del inductor de carga pasa por cero y por lo tanto la energía será inicialmente almacenada en el capacitor.

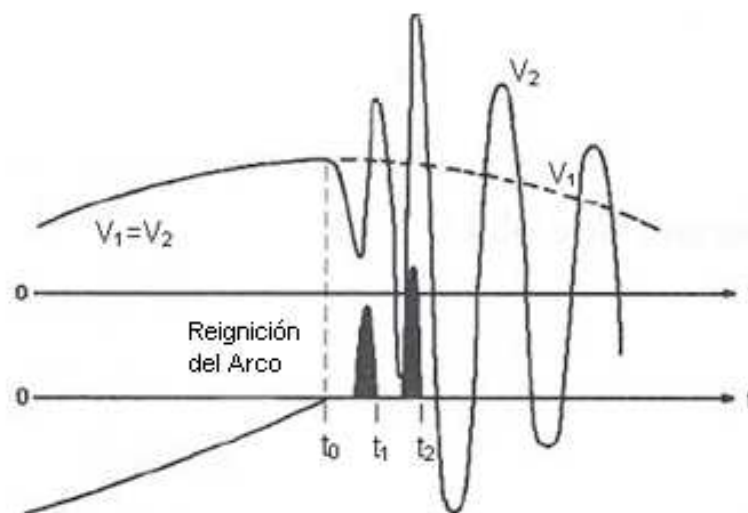
El origen de sobrevoltajes y reigniciones de alta frecuencia en la interrupción de corrientes inductivas se debe fundamentalmente al corte de corriente antes de su paso natural por cero, este fenómeno es conocido como "corte de corriente" tal como se muestra en la Figura 1.14. Sin embargo esto no es una condición necesaria para que el voltaje que aparece en los terminales del interruptor que realiza la maniobra sea elevada. Incluso cuando el corte se realiza en el paso por cero de la corriente inductiva, el voltaje transitorio de recuperación será del orden de dos veces el voltaje nominal de cresta.



(a)



(b)



(c)

**Figura 1.13** Interrupción de una corriente inductiva. (a) Circuito inductivo. (b) Transitorio durante la interrupción sin reencendido. (c) Transitorio durante la interrupción con reencendido [10].

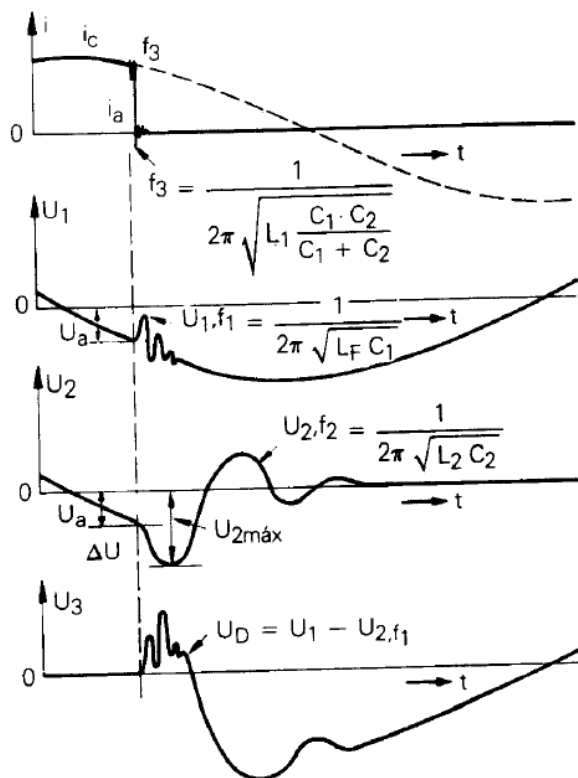
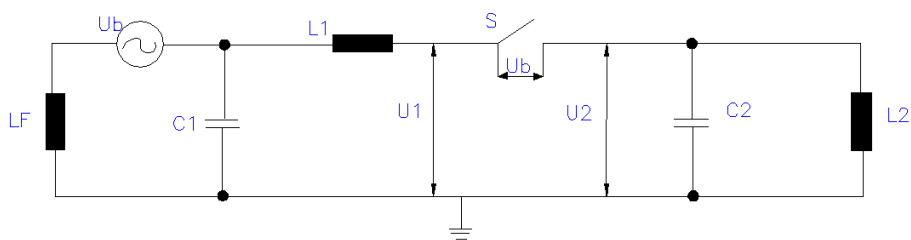


Figura 1.14 Apertura con corte de corriente [10]

Cuando la interrupción de corriente se produce prematuramente la energía almacenada en la inductancia es:

$$W_L = \frac{1}{2} * L_2 * I_0^2 \quad (1.12)$$

donde:

$I_0$  es la corriente interrumpida

La energía del  $W_L$  es transferida hacia el capacitor debido a que la corriente se desvía hacia las capacitancias parasitas del lado de la carga  $C_2$ , representado en la Figura 1.14. La máxima energía almacenada en el capacitor es:

$$W_C = \frac{1}{2} * C_2 * (\Delta U)^2 \quad (1.13)$$

La variación de voltaje ( $\Delta U$ ) debido a la interrupción de corriente se obtiene igualando las ecuaciones anteriores:

$$\Delta U = I_0 * \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \quad (1.14)$$

Esta ecuación asume que toda la energía almacenada en la inductancia es recuperada y liberada hacia el capacitor. Generalmente no llega a alcanzar las magnitudes indicadas, porque parte de la energía se pierde. El efecto de estas pérdidas puede ser tratado por la inclusión de un factor de eficiencia empírico en la ecuación anterior.

$$\Delta U = \sqrt{\eta} * \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} * I_0^2 \quad (1.15)$$

donde el valor de  $\eta$  se aproxima a 1.0 para reactores lineales y es mucho menor para dispositivos con núcleo de hierro [10].

El mayor problema que se produce por el “corte de corriente” es el incremento del voltaje de restablecimiento  $\Delta U$  entre los contactos del disyuntor y puede llevar al voltaje a valores elevados como los que se observan en la Figura 1.15. El reencendido del arco que ocurre entre los puntos 1 y 2 producen un voltaje en forma de diente de sierra que hace que el voltaje  $V_2$  aumente a un valor máximo,  $V_{máx}$ , que es mayor que el voltaje de la fuente. El arco se puede reencender varias veces después del punto 2 hasta que el arco se extinga definitivamente en el punto 3. Cuando el arco se extingue el voltaje puede ser alto debido a las repetidas veces que el arco se reencendió, lo que provocan que la corriente aumente a valores mayores a  $I_0$ .

En sistemas de potencia las corrientes inductivas aparecen ante la interrupción de corrientes de magnetización de transformadores o reactores y ante la interrupción de corrientes de arranque en motores.

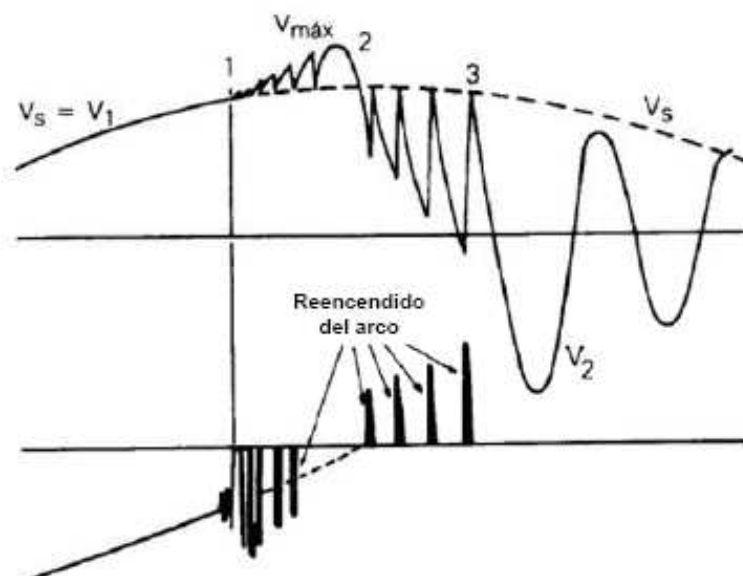


Figura 1.15 Aumento del voltaje debido al corte de corriente [10]

## 1.6 INTERRUPCION DE CORRIENTES BAJO CONDICIONES DE FALLA

Tanto la aparición de una falla como su despeje pueden generar sobretensiones de frente lento. Con la aparición de una falla se produce un cambio en las condiciones de operación al pasar del voltaje de servicio al sobrevoltaje temporal en las fases sanas, mientras que con la eliminación o despeje de la falla se provoca el retorno desde un valor próximo a cero al voltaje de servicio de la fase con defecto. En general ambas causas solo producen sobrevoltajes fase-tierra, siendo despreciables las sobretensiones entre fases.

### 1.6.1 FALLAS SIMÉTRICAS Y ASIMÉTRICAS

Una falla en un circuito es cualquier evento que interfiere con el flujo normal de corriente. La apertura de los interruptores permite la aislación de la porción de la línea que ha fallado. Varios tipos de fallas de cortocircuito pueden ocurrir en una línea de transmisión, siendo la más frecuente la falla monofásica a tierra (o línea a tierra).

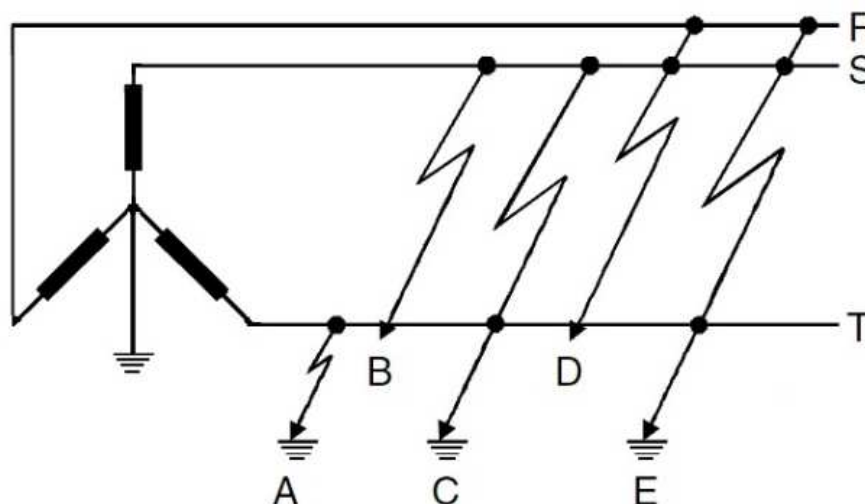
### 1.6.2 FALLAS SIMÉTRICAS

Un cortocircuito trifásico equilibrado (Figura 1.16) es un ejemplo de una falla simétrica.

Las corrientes que fluyen en las diferentes partes de un sistema de potencia inmediatamente después de que ocurre una falla difieren de aquellas que fluyen unos ciclos más tarde justo antes de que los interruptores sean llamados a abrir la línea en ambos lados de la falla. Todas estas corrientes también difieren ampliamente de las corrientes que fluirán en las condiciones de estado estable, si no se aislara la falla del resto del sistema cuando operan los interruptores.

Dos de los factores de los que depende la selección apropiada de los interruptores son: la corriente que fluye inmediatamente después de que la falla ocurre y la corriente que el interruptor debe interrumpir. Los datos que se obtienen de los cálculos de fallas sirven para determinar los valores de operación de los relevadores que controlan al disyuntor.

Aunque el cortocircuito trifásico balanceado es relativamente poco común, ésta es la falla más grave, y por lo tanto, determina la especificación del disyuntor de la línea.



**Figura 1.16** Representación de una falla trifásica a tierra



### **1.6.3 FALLAS ASIMÉTRICAS**

La mayoría de fallas que ocurren en los sistemas de potencia son fallas asimétricas que consisten en cortocircuitos asimétricos, fallas a través de impedancias o conductores abiertos.

Las fallas asimétricas que pueden ocurrir son: fallas monofásicas a tierra o línea a tierra, fallas línea a línea y fallas línea a línea a tierra o doble línea a tierra. Estas fallas generan grandes desbalances que se pueden presentar en los voltajes y corrientes del sistema de potencia, y pueden ser de especial daño en los elementos del mismo.

En el despeje de este tipo de fallas tanto simétricas como asimétricas los *TRVs* que se producen cuando se interrumpe corrientes asimétricas son menos graves (menor *RRRV* y pico *TRV*) que cuando se interrumpe la corriente simétrica, debido a que el valor instantáneo del voltaje de alimentación en el momento de interrupción es menor que el valor máximo.

### **1.6.4 TIPOS DE TRV CAUSADOS EN LA INTERRUPCIÓN DE CORRIENTE BAJO CONDICIONES DE FALLA**

Las condiciones de falla son consideradas para producir los *TRVs* más severos en el interruptor. Así, los picos más altos de *TRV* se consiguen durante la interrupción de corrientes capacitivas y la interrupción de fallas en oposición de fases del sistema, mientras que los *TRVs* asociados con la corriente de cortocircuito más elevada son obtenidos durante una falla en terminales del interruptor y la interrupción de fallas en líneas cortas.

### **1.6.5 CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE TRV**

En general, una red puede ser reducida a un circuito equivalente paralelo *RLC* para los cálculos de *TRV* (Figura 1.17). Tomando en consideración, que esta representación es válida para un corto período de tiempo, las formas de onda del

*TRV* causados por la interrupción de corriente durante una falla pueden ser: oscilatorias, triangulares, exponenciales o una combinación de estas formas.

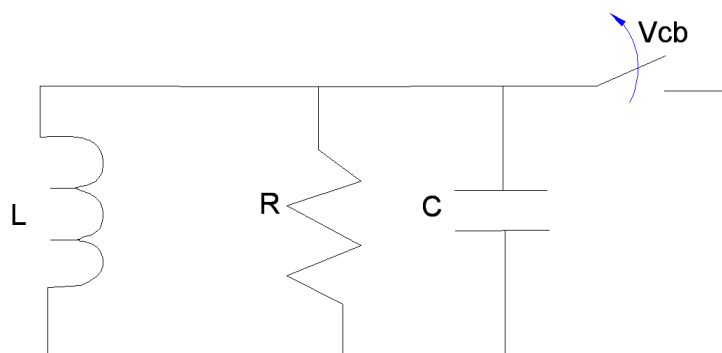


Figura 1.17 Circuito equivalente paralelo RLC

### 1.6.5.1 TRV Exponencial (sobre-amortiguado)

La parte exponencial de un *TRV* se produce cuando la resistencia equivalente del circuito (Figura 1.17) con  $N$  líneas conectados en paralelo, la resistencia equivalente está dada por la siguientes ecuación.

(1.16)

$$R_{eq} = \alpha * \frac{Z_1}{N} \leq 0.5 * \sqrt{L_{eq} / C_{eq}}$$

donde:

$Z_1$  = es la impedancia de secuencia positiva de la línea

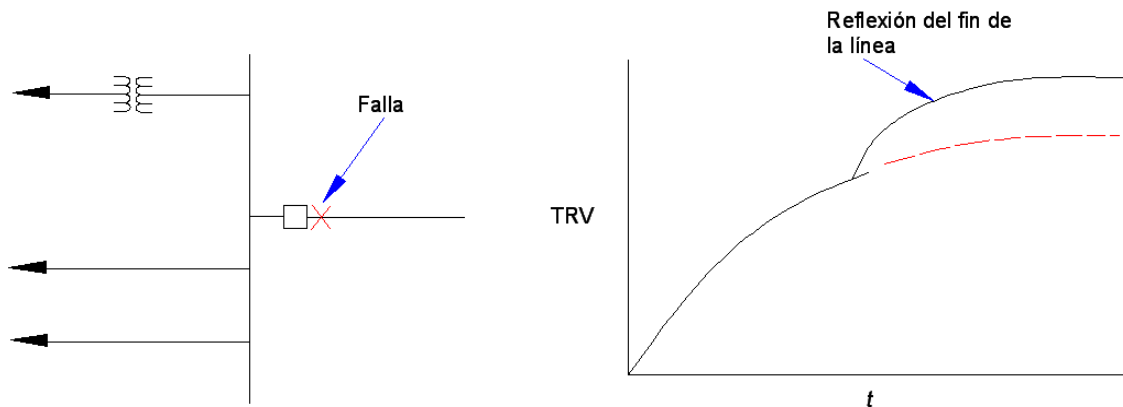
$N$  = número de líneas

$\alpha$  = factor igual a 1.5 en el caso de una falla trifásica no puesta a tierra y en función de  $Z_0/Z_1$  en otros casos.

$L_{eq}$  = inductancia equivalente de la fuente

$C_{eq}$  = capacitancia equivalente de la fuente

Un típico *TRV* exponencial se muestra en la Figura 1.18. Por lo general esta forma del *TRV* se produce cuando una falla es despejada en los terminales del interruptor y al menos un transformador y una o varias líneas están en el lado sin falla del interruptor.

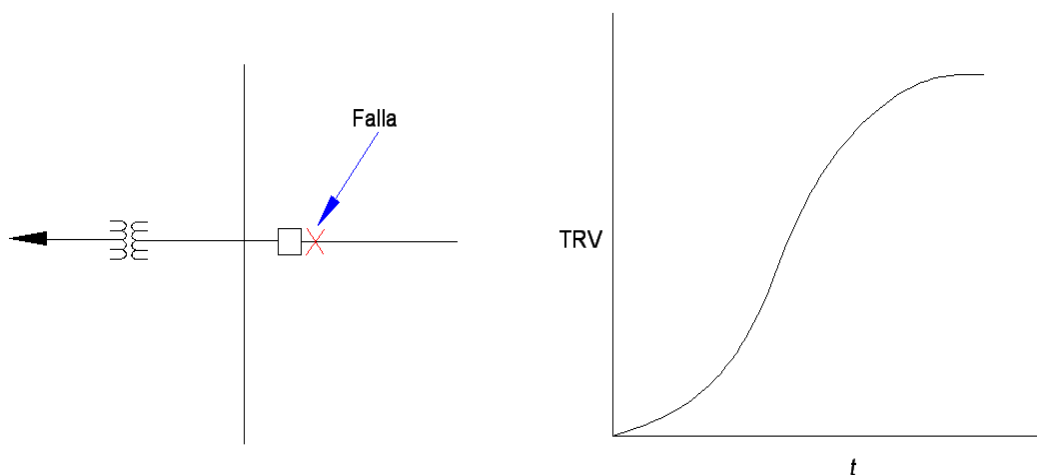


**Figura 1.18** *TRV* exponencial

Esta parte exponencial del *TRV* se transmite como ondas viajeras en cada una de las líneas de transmisión. Las ondas reflejadas que retornan de líneas abiertas o de discontinuidades contribuyen también en la formación del *TRV*, causando un incremento en la cresta.

### 1.6.5.2 *TRV* Oscilatorio (sobre-amortiguado)

El *TRV* oscilatorio mostrado en la Figura 1.19 ocurre generalmente cuando la falla está limitada por un transformador o un reactor en serie y ninguna línea de transmisión (o cable de impedancia) está presente para proporcionar amortiguación.

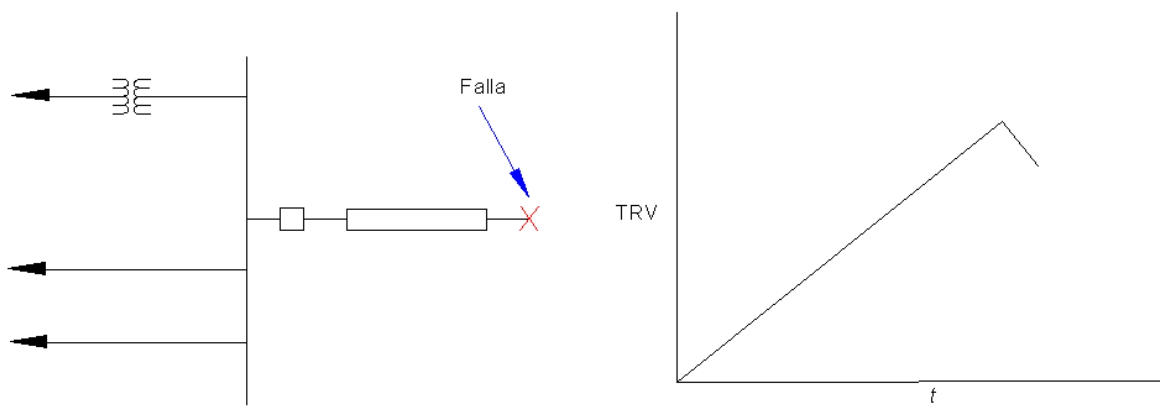


**Figura 1.19** *TRV* Oscilatorio

### 1.6.5.3 TRV con Forma de Onda Triangular

Los *TRVs* de forma triangular se asocian a fallas de línea corta. Después de la interrupción de corriente el voltaje en el lado de la línea exhibe una forma de onda triangular característica, la Figura 1.20 muestra un ejemplo de este *TRV*.

La tasa de crecimiento de voltaje es generalmente más alta que la experimentada con los *TRVs* exponencial y oscilatoria (con la misma corriente), sin embargo, el pico de *TRV* es generalmente bajo.



**Figura 1.20** *TRV* de forma triangular

## **CAPÍTULO II**

### **2. MODELACIÓN DE COMPONENTES**

Este capítulo presenta una breve descripción del programa digital de simulación ATP (Alternative Transient Program), de los componentes utilizados para la simulación del sistema eléctrico de potencia y del lenguaje de programación MODELS. Además, incluye la descripción de los modelos de arco eléctrico propuestos por Mayr y Cassie [3], y el modelado del interruptor de potencia usando el lenguaje MODELS.

#### **2.1 EL PROGRAMA DIGITAL DE SIMULACIÓN ATP**

ATP (Alternative Transients Program) es un software que permite llevar a cabo la simulación digital en el dominio del tiempo y de la frecuencia de fenómenos transitorios de naturaleza electromagnética y electromecánica con fines de diseño, especificaciones de equipos o definición de parámetros eléctricos fundamentales. Mediante este paquete es posible plantear y resolver la mayor parte de situaciones que se pueden dar en las diferentes instalaciones eléctricas.

Se trata de una herramienta especialmente diseñada para analizar, tanto en su individualidad como en su conjunto, los diferentes elementos que componen un sistema eléctrico [11]. Trabaja con modelos que caracterizan el comportamiento en sus distintos elementos constitutivos tales como: resistencias, inductancias, capacidades, elementos con parámetros concentrados y distribuidos, máquinas, interruptores, fuentes, etc.

Todos estos elementos son parametrizables y permiten flexibilizar sus características adecuándose a las variaciones requeridas.

## 2.2 MODELOS UTILIZADOS

### 2.2.1 FUENTES



Fuentes AC tipo 14.- Son fuentes sinusoidales constantes, trifásicas y balanceadas empleadas en el sistema que modelan voltajes o corrientes.

### 2.2.2 EQUIVALENTES DEL SISTEMA



Equivalentes Thévenin de red basadas en cortocircuito, mediante ramas lineales en serie, con parámetros R-L de secuencia y acoplados simétricamente, que representan la reactancia transitoria de los generadores.

### 2.2.3 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Para la modelación de las líneas de transmisión el ATP tiene la subrutina de apoyo LINE CONSTANTS. Esta subrutina se encarga del cálculo de los parámetros eléctricos de líneas aéreas a partir de las dimensiones de la torre, de las características del conductor y la disposición de conductores en la torre. Mediante la componente LCC de esta subrutina se puede escoger el modelo de línea adecuado para los requerimientos del sistema.

Los modelos de las líneas de transmisión con las que cuenta el ATP se definen de acuerdo al tipo de transitorio que se desea obtener. El modelo de línea de transmisión a nivel de 500 kV que se utiliza es el modelo JMartí este modelo permite representar la línea de transmisión en parámetros distribuidos y dependientes de la frecuencia. El modelo que representa la línea de transmisión a

nivel de 230 kV esta representado por el modelo de Bergeron este modelo está basado en parámetros constantes distribuidos a través de la línea de transmisión, además que es independiente de la frecuencia. Los datos eléctricos de los conductores y la disposición geométrica ingresados en el cuadro de dialogo de la subrutina LCC se muestran en el Anexo D.4 y D.5.

#### **2.2.4 TRANSFORMADORES**

Para la configuración del transformador se utiliza el modelo genérico de transformador trifásico tipo Saturable [13], que corresponde a un transformador trifásico de tres arrollamientos con saturación en el cual se ingresan los datos que se tienen de los transformadores típicos para voltajes a nivel de 500 kV. En la Figura D.6 del Anexo D se muestra el cuadro de dialogo del modelo.

#### **2.2.5 REACTORES**

Los reactores ubicados en las líneas de transmisión de 500 kV se modelan como elementos lineales  $RLC$  de 3 fases, con acoplamiento  $Y$ , independiente de los valores de las fases. En la Figura D.7 del Anexo D se muestra el cuadro de dialogo del modelo utilizado.

#### **2.2.6 INTERRUPTORES**

El programa ATP presenta varios modelos de interruptores de los cuales solo se utilizará los interruptores controlados por tiempo, en estos interruptores las maniobras de cierre y apertura son realizadas una única vez y el tiempo es especificado por el usuario. En Anexo D, se muestra un breve resumen de los distintos interruptores que forman parte de las herramientas del ATP. La Figura D.9 muestra el cuadro de diálogo.

### **2.3 IMPLEMENTACIÓN MEDIANTE MODELS**

La simulación del arco mediante el software utilizado puede ser mediante una resistencia controlable que representa la resistencia del arco comandada en el lenguaje MODELS, usado para reproducir la ecuación dinámica del arco, una vez desarrollado el modelo. Su uso puede ser empleado las veces que se desee sin necesidad de repetir el código, tan solo las directivas de uso son necesarias.

### 2.3.1 SUBROUTINA MODELS

Models es un lenguaje de programación orientado a la simulación y es usado como herramienta para describir el comportamiento dinámico de sistemas físicos complejos, se caracteriza por ser un lenguaje de descripción técnica en el cual se utiliza un grupo de instrucciones sencillas que permiten la representación y estudio de sistemas variables en el tiempo [16]. La estructura del lenguaje es sencilla y es similar a la estructura de otros lenguajes de programación, por ejemplo, Pascal o Modula-2. Dispone de un pequeño número de palabras clave que se pueden recordar fácilmente.

El modulo básico se llama Models y se encarga de describir los procedimientos de operación del modelo, los valores de retención de los elementos para llevar el estado y la historia de su funcionamiento y establece las directrices para el intercambio de información con el circuito modelado, además de las directivas que influyen en el funcionamiento del modelo en una simulación.

Para la definición de un *model* se incluye declaraciones, directivas de simulación y procedimientos de operación. Los ficheros Models se crean de forma independiente al programa principal y se pueden llamar desde cualquier programa cuantas veces se desee.

Un *model* se puede incorporar como un nuevo elemento en la librería MODELS del ATPDRAW de tal forma que aparezca en forma de icono. Se requiere la creación de 2 archivos con las siguientes extensiones para tal fin, [17].

\*.MOD (*model* editado)



\*.SUP (archivo de soporte)

### 2.3.2 ESTRUCTURA DE PROGRAMACIÓN

**MODEL** -- Nombre del modelo a realizar

**DATA** -- Nombre del dato ingresado por el usuario

**INPUT** -- Son elementos de entrada visible durante la simulación

**OUTPUT** -- Corresponde a las variables de salida declaradas dentro del *model*

**VAR** -- Corresponde a la declaración de aquellos elementos que varían dentro del modelo

**HISTOR** -- Durante la simulación del *model* se puede hacer referencia a valores que anteriormente pudo tener, incluso antes de iniciar la simulación.

**INIT** --Este procedimiento describe la iniciación del algoritmo del *model*, independiente de las aplicaciones del mismo.

**ENDINIT** --Cierre del bloque INIT

**EXEC** --Contiene la descripción del algoritmo operacional que se desarrolla durante el tiempo de simulación y es ejecutado para cada paso de tiempo en el cual el *model* ha sido utilizado por una declaración hecha.

**ENDEXEC** --Cierre del bloque EXEC

**ENDMODEL** --Cierre del modelo

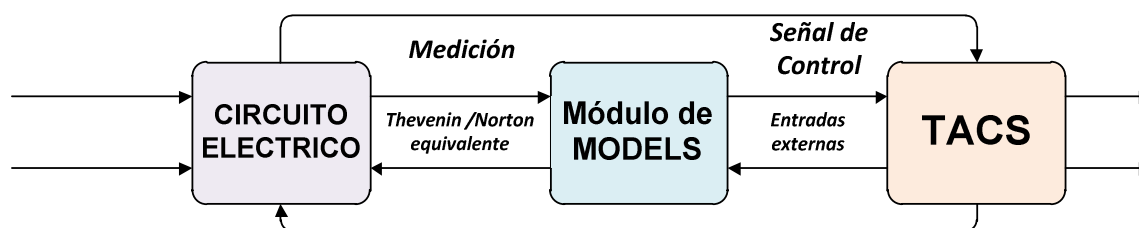


Figura 2.1 Representación de un circuito con MODEL [17]

## 2.4 MODELADO DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA

El interruptor de potencia es uno de los elementos más complejos que existen en las redes eléctricas de potencia, el desarrollo de un modelo matemático detallado

para simular y analizar la interacción entre interruptor y la red es muy difícil esto debido a que el arco eléctrico es el principal fenómeno que describe al interruptor. Consiste de una serie de procesos físicos que incluyen leyes de conservación de energía, termodinámica y gases que ocurren durante la interrupción de la corriente. Por este motivo el punto de partida para modelar el interruptor es el modelado del arco eléctrico.

En base a la sección 1.4 el campo de aplicación de cada tipo de interruptor se ve limitado en su mayoría por el voltaje al que pueden operar; el interruptor en SF6 está ganando la carrera en cuanto a ampliar su utilización en niveles de extra y ultra alto voltaje, ésta es una de las razones por la cual se ha escogido trabajar con este tipo de interruptor. Además, actualmente es el que está siendo sometido a estudio en diversas compañías y laboratorios.

En el anexo A se muestra parámetros de las especificaciones técnicas de los interruptores de potencia a tomarse en cuenta.

#### **2.4.1 TIPOS DE MODELADO DE ARCO**

Aunque se han propuesto varios modelos matemáticos de arco y algunos han sido aplicados con éxito, no hay una aceptación general para ningún modelo. Tres tipos diferentes de modelos de arco han sido utilizados para reproducir el proceso de interrupción de corriente:

- 1) *Modelo físicos de arco* que incluyen el proceso físico en detalle, es decir, el comportamiento del arco a partir de las leyes de conservación de la energía, teniendo en cuenta las propiedades físico-químicas del gas aislante.
- 2) *Modelos de caja Negra (CN)* que consideran al arco eléctrico como un bipolo y determinan una función de transferencia usando una fórmula matemática escogida previamente, aproximando el resto de parámetros mediante técnicas adecuadas a oscilogramas de voltaje y corriente de ensayos realizados.

- 3) *Modelo basados en fórmulas y diagramas* que establecen el campo de aplicación del interruptor en base a diagramas que se obtienen a partir de ensayos o cálculos realizados en base a alguno de los dos modelos anteriores.

La representación más adecuada de un interruptor de potencia para el análisis de procesos transitorios mediante la simulación digital es el modelo llamado de “Caja Negra” [14], este describe la interacción del arco y el sistema de potencia durante el proceso de interrupción.

#### **2.4.2 MODELO TIPO “CAJA NEGRA”**

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

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

Los pasos a seguir para este tipo de modelo son:

- Realizar ensayos sobre un interruptor para obtener oscilogramas de corriente y de voltaje, con ellos hay que trabajar para encontrar los parámetros de la ecuación diferencial que se desee utilizar, para finalizar realizando los ajustes

necesarios o tomar las suposiciones que sean valederas para determinar el campo de aplicación del modelo.

- Con el conocimiento del circuito eléctrico utilizado durante los ensayos, se deben realizar simulaciones numéricas con el fin de poder conocer el campo de aplicación del interruptor ensayado, a través de la obtención de sus curvas límites de aplicación [15].

### 2.4.3 MODELOS DE ARCO

Los modelos de arco son expresados matemáticamente como fórmulas de una resistencia o conductancia en función del voltaje y corriente del arco, así como de varios parámetros variables en el tiempo que representan algunas propiedades del arco.

Los primeros intentos para modelar la conducta del arco eléctrico durante el proceso de corte de corriente, fueron realizados por A.M. Cassie a partir de 1930 y por O. Mayr en 1940.

#### 2.4.3.1 Modelo de Cassie

El modelo de Cassie consideró al arco eléctrico como un canal de densidad de corriente, temperatura, e intensidad de campo eléctrico constantes. Los cambios en la conductancia del arco son el resultado de los cambios en la sección transversal del arco. La disipación de energía se origina por convección.

La ecuación dinámica del arco que representa el modelo de Cassie es:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left( \left( \frac{v}{V_0} \right)^2 - 1 \right) \quad (2.1)$$

donde:

$g$  = conductancia del arco,

$\tau_c$  = constante de tiempo

$v$  = voltaje del arco,

$V_0$  = parámetro de voltaje mínimo en régimen permanente de Cassie

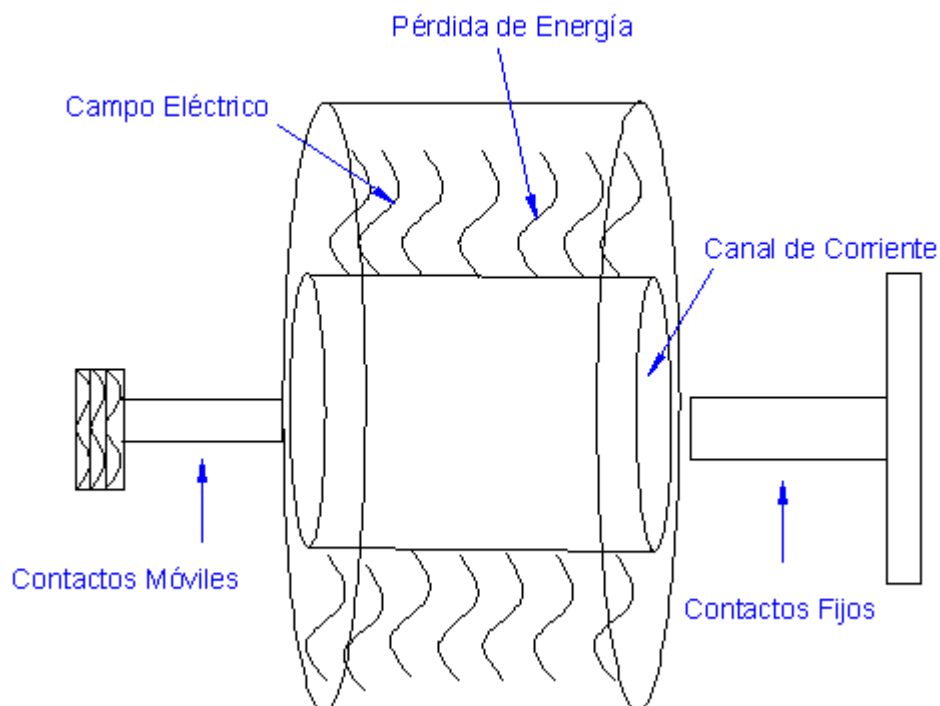


Figura 2.2 Descripción del modelo de Cassie

### 2.4.3.2 Modelo de Mayr

Mayr propone que los cambios de temperatura de arco son dominantes, y que el tamaño y el perfil de la columna arco son constantes. La conducción térmica es el principal mecanismo de disipación de energía.

La ecuación dinámica que representa el modelo de Mayr es:

$$\frac{1}{g} \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left( \frac{vi}{P_0^2} - 1 \right) \quad (2.2)$$

donde:

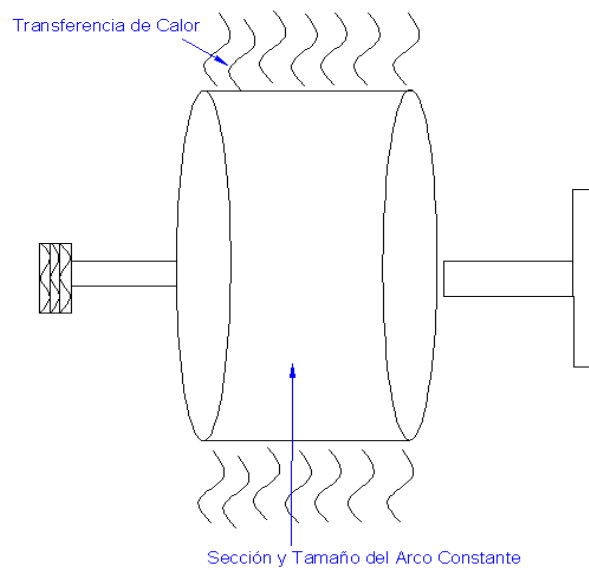
$g$  = conductancia del arco,

$\tau_m$  = constante de tiempo

$v$  = voltaje del arco

$i$  = corriente del arco

$P_0$  = parámetro de pérdida de potencia en régimen permanente de Mayr



**Figura 2.3** Representación del modelo de Mayr

**Tabla 2.1** Comparación de los Modelos de Arco

<b>PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS BÁSICOS</b>		
	<b>MODELO DE MARY</b>	<b>MODELO DE CASSIE</b>
<b>Densidad de corriente</b>	Variable con la distancia al centro del arco	Constante
<b>Temperatura</b>	Variable y proporcional a la densidad de corriente	Constante
<b>Sección transversal</b>	Constante	Función de la corriente
<b>Conductancia</b>	Función de la energía almacenada	Proporcional a la sección transversal
<b>Transferencia de calor</b>	Conducción	Convección
<b>Expresión dinámica</b>	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left( \frac{v_i}{v_0} - 1 \right)$	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left( \left( \frac{v}{v_0} \right)^2 - 1 \right)$
<b>Apto para representar</b>	Pequeñas corriente	Grandes Corrientes

#### 2.4.4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE ARCO ELÉCTRICO

Las expresiones dinámicas, de Mayr o de Cassie, son fundamentales para la representación del interruptor mediante el modelo de caja negra. Esta técnica de simulación del arco eléctrico consiste en el uso de señales de entrada obtenidos a

través del sistema para luego relacionarlos con la ecuación diferencial escogida Mayr, Cassie o la combinación de éstas. Debido a que los modelos dependen de la magnitud de corriente a ser interrumpida, este trabajo se enfoca en realizar la simulación de la combinación de las dos ecuaciones Ec.(2.1) y Ec.(2.2).

El interruptor en SF6 implementado consta de dos bloques, estos registran la señal de entrada de corriente del sistema. El primero involucra la ecuación de Cassie, considera que la conductancia del arco ( $g_c$ ) es producto de los cambios de energía de la sección transversal y la disipación de la energía se origina por convección. El segundo incluye la ecuación de Mayr, describe que la conductancia del arco ( $g_m$ ) varía exponencialmente con la energía almacenada y la disipación de energía es mediante conducción.

En ambos modelos, en lo que respecta a la ecuación dinámica, algunos de los parámetros que dependen de la conductancia se toma como valores constantes.

En el modelo de Cassie estos parámetros son  $\tau$  (constante de tiempo),  $V_0$  (voltaje mínimo en régimen permanente). En el modelo de Mayr estos parámetros son  $\tau$  (constante de tiempo),  $P_0$  (potencia disipada de arco).

Estudios anteriores han determinado estos parámetros utilizando métodos como son el Amsinck y el Asturiano [3] para interruptores en SF6. Los valores de estos parámetros se observan en la tabla 2.2, los cuales fueron obtenidos por [15].

**Tabla 2.2** Parámetros de las ecuaciones de Cassie y Mayr [15].

MODELO	AMPLITUD	$\tau$ [ $\mu$ S]
CASSIE	$V_0 = 3522.777$ [volts]	$\tau = 0,68016$
MAYR	$P_0 = 102510$ [Watts]	$\tau = 0,68016$

La respuesta en función de la señal de entrada del sistema, son las soluciones de las ecuaciones diferenciales de Cassie y Mayr que se obtienen individualmente usando la transformada de LAPLACE y dan como resultado la conductancia dinámica de arco de ambas ecuaciones.

El tercer bloque de la modelación corresponde a Ec. (2.3), formada por la combinación de las dos ecuaciones, a través de la conexión serie de las resistencias de cada modelo de arco eléctrico.

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_c} + \frac{1}{G_m} \quad (2.3)$$

La señal de salida del modelo de “Caja negra” es la resistencia dinámica del arco en función de la combinación de ambos modelos. Tal como se muestra en la figura 2.4. El modelo se incorpora al sistema como una resistencia variable controlada desde el lenguaje de programación (RTACS) tipo 91



Figura 2.4 Esquema de modelo de “Caja Negra”

En la figura 2.5 se muestra el diagrama en bloques para la aplicación de las ecuaciones de Cassie y Mayr, en la figura 2.6 muestra el icono creado para la representación del interruptor SF6.

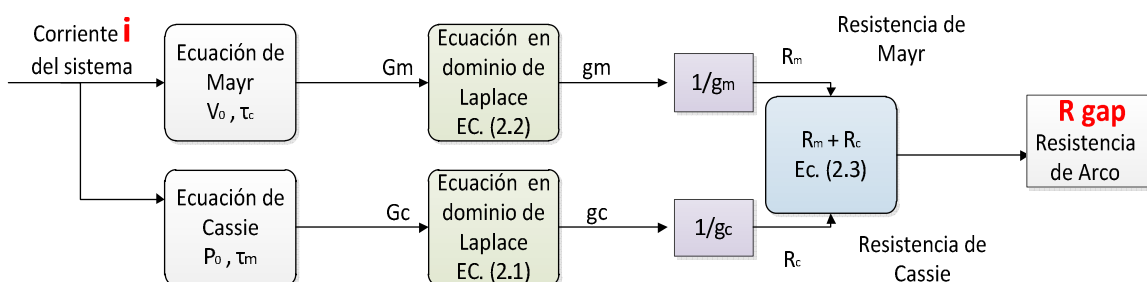


Figura 2.5 Diagrama de bloques para obtener el modelo de arco eléctrico

El icono creado se puede personalizar utilizando las herramientas existentes en el ATP como se puede observar en el Anexo B.





**Figura 2.6** Icono representando un interruptor con tecnología del SF6, utilizando el modelo de arco eléctrico de Cassie y Mayr.

## 2.5 DESCRIPCION Y CARACTERISTICAS DE LOS COMPONENTES DEL S.N.I.

De acuerdo con lo expuesto en el Plan de Expansión del Sistema Eléctrico Ecuatoriano planteado por CELEC EP – Transelectric [18], se ha implementado al SNI un sistema de transmisión a nivel de 500 kV, que servirá para el transporte de energía generada desde Coca Codo Sinclair y que unirá los principales centros de carga, (Quito y Guayaquil) a este nivel de voltaje como se observa en el Anexo C. El sistema de Transmisión que se describe a continuación estará constituido por cuatro subestaciones y cuatro líneas de transmisión:

- **Sistema de Transmisión Coca Codo Sinclair – El Inga.-** El sistema contempla el transporte de energía desde la central de generación Coca Codo Sinclair hacia la S/E El Inga, y está conformada por dos líneas de transmisión a nivel de 500 kV de un solo circuito.
- **Sistema de Transmisión El Inga – Yaguachi.-** Este sistema de transmisión enlaza los principales centros de carga del país a nivel de 500 kV y está formada por una línea de transmisión que es la de mayor longitud (300 km) a este nivel de voltaje.
- **Sistema de Transmisión Yaguachi – Sopladora.-** permite evacuar la generación de la central Sopladora hasta la S/E Yaguachi a través de una línea de transmisión a nivel de 500 kV.

Las características asociadas a estas líneas de transmisión del sistema de 500 kV se muestran en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3** Líneas de transmisión a 500 kV

<b>Línea</b>	<b>Longitud (km)</b>	<b>Número de circuitos</b>	<b>Tipo de Conductor</b>
Coca Codo Sinclair - El Inga I	125	1	4 x 750 ACAR
Coca Codo Sinclair - El Inga II	125	1	4 x 750 ACAR
El Inga – Yaguachi	300	1	4 x 750 ACAR
Yaguachi – Sopladora	180	1	4 x 750 ACAR

De los estudios preliminares del sistema de transmisión a 500 kV, se ha definido que las líneas de transmisión estarán dispuestas en haz de 4 conductores por fase con el fin de disminuir el efecto corona y la radio interferencia. Además se considera la utilización de reactores en derivación ubicados en los extremos de cada línea. La siguiente tabla muestra los valores de potencia reactiva para la compensación.

**Tabla 2.4** Banco de Reactores en los extremos de las líneas

<b>Líneas</b>	<b>MVAr en c/extremo</b>	<b>Total MVAr</b>
Coca Codo Sinclair - El Inga I	28	56
Coca Codo Sinclair - El Inga II	28	56
El Inga – Yaguachi	112	224
Yaguachi – Sopladora	56	112

Los parámetros de las líneas usados en la simulación se resumen en la Tabla 2.5. Los parámetros propios de cada línea calculados en función de sus longitudes se muestran en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.5** Parámetros usados en la simulación para L/T de 500 kV a 60Hz.

<b>Secuencias</b>	<b>R (<math>\Omega</math>/km)</b>	<b>X (<math>\Omega</math>/km)</b>	<b>B (<math>\mu</math>s/km)</b>
Positiva (+) y Negativa (-)	0.0229	0.3234	5.1011
Cero (0)	0.2956	1.1025	3.3581

**Tabla 2.6** Parámetros de secuencia para L/T de 500 kV a 60Hz.

Líneas	Longitud (km)	R ( $\Omega$ )		X ( $\Omega$ )		B ( $\mu$ s)	
		Secuencia		Secuencia		Secuencia	
		(+) y (-)	(0)	(+) y (-)	(0)	(+) y (-)	(0)
Coca Codo Sinclair - El Inga I	125	2.862	36.95	40.425	137.81	637.637	419.76
Coca Codo Sinclair - El Inga II	125	2.862	36.95	40.425	137.81	637.637	419.76
El Inga – Yaguachi	300	6.87	88.68	97.02	330.75	1530.33	1007.4
Yaguachi – Sopladora	180	4.122	53.21	58.212	198.45	918.198	604.45

### 2.5.1 CARACTERÍSTICAS DE LA S/E EL INGA

Los estudios enfocados a la propuesta del tipo de interruptor para la implementación en líneas de transmisión a nivel de 500 kV se realizan en la subestación El Inga, tomando en consideración que al ser todavía un sistema en estudio, sus características podrían ser susceptibles a cambios. Además, en el caso de que se requiera datos del sistema que aún no estén definidos por el área de planificación de CELEC EP – Transelectric, se asumirá valores típicos con criterio técnico o valores de otros sistemas de características similares y que se encuentren en funcionamiento.

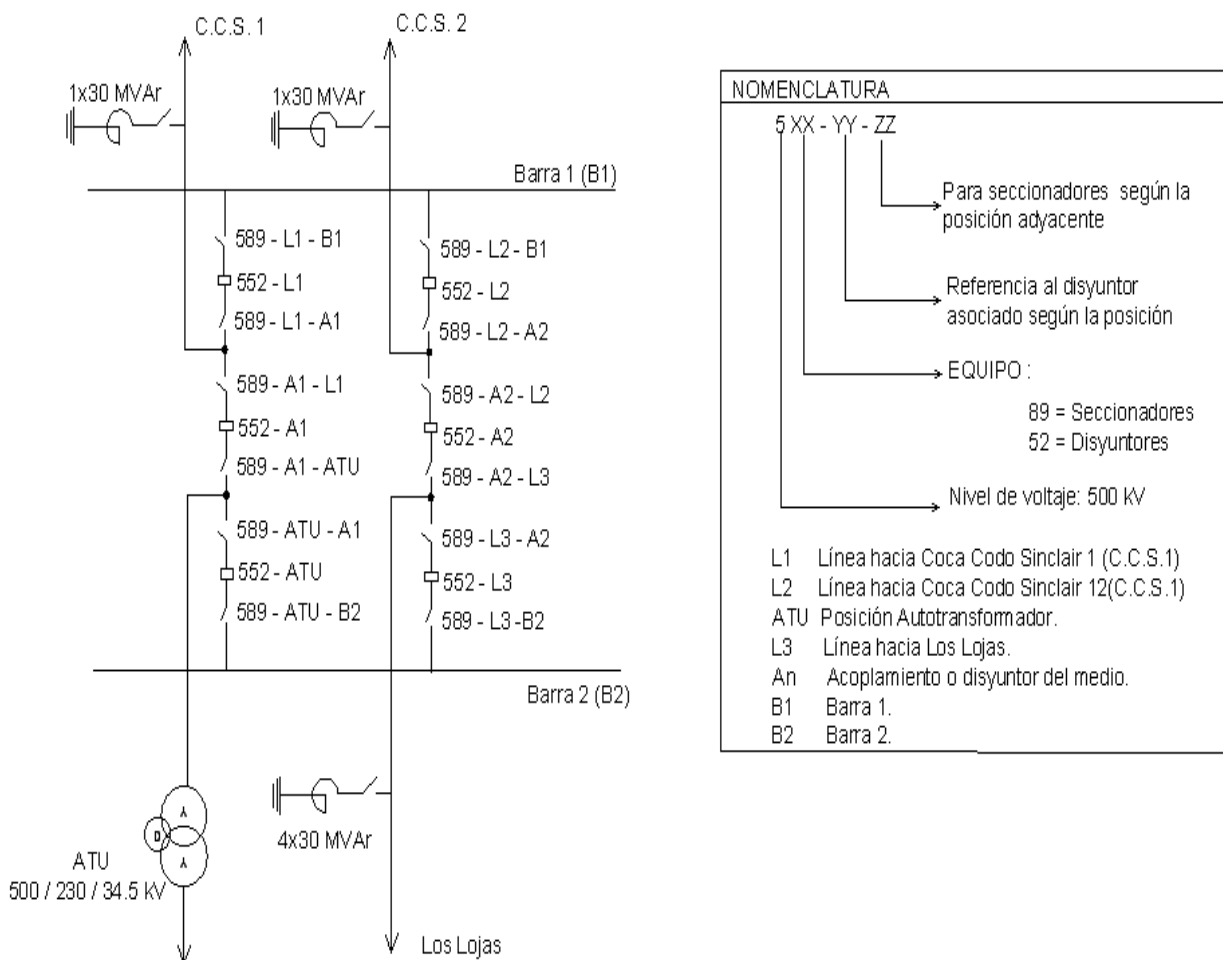
Se asumirá que el esquema de conexión de barras del patio de 500 kV será del tipo de Interruptor y Medio, debido a que es el esquema más usado en patios de subestaciones con este nivel de voltaje.

La Figura 2.7 muestra el diagrama unifilar del patio de 500 kV de la subestación El Inga, considerando el esquema de disyuntor y medio.

Las características preliminares de la subestación El Inga son las siguientes [18]:

- Subestación de tipo convencional aislada en aire.
- Tres bancos de transformadores monofásicos de 450 MVA, 500/230 kV.
- Un transformador monofásico de 150 MVA, 500/230 kV, de reserva.
- Tres bahías de línea de 500 kV.
- Tres bahías de transformador de 500 kV.

- Un reactor de línea de 500 kV (4x28 MVar).
- Dos reactores de línea de 500 kV (1x28 MVar).
- Tres bahías de transformador de 230 kV.
- Una bahía de reactor de barra de 230 kV.
- Un reactor de barra de 230 kV (60 MVar).



**Figura 2.7** Diagrama unifilar de la Subestación El Inga

## 2.5.2 CARACTERISTICAS DE CONDUCTORES DE LAS L/T Y CONFIGURACIÓN DE LAS TORRES

Los parámetros del tipo de conductor utilizado para las líneas de 500 kV corresponden al ACAR 750 *kcml* y para los dos conductores de guardia empleados, el uno corresponde al acero galvanizado de 3/8" y el otro al de fibra óptica llamado OPGW [20].

Para las líneas de transmisión a 230 kV los conductores usados son el ACAR 1200 18/19 en líneas existentes, mientras que el tipo de conductor ACSR 1113 45/7 se usa en líneas de transmisión a 230 kV, que son parte de la implementación del sistema de transmisión definidas en el Plan de Expansión, el conductor de guardia utilizado es el acero galvanizado de 3/8”.

Las características técnicas principales de los tipos de conductores utilizados, tanto a nivel de 500 kV como a 230 kV, se detallan a continuación.

**Tabla 2.7** Características del conductor ACAR 750 para la línea de transmisión de 500 kV

Tipo			Unidad	Valor
Calibre			KCM	750
Sección transversal			mm <sup>2</sup>	380,08
Construcción	N° Hilos	Aluminio 1350 - H19	c/u	30
		Aluminio 6201 - t81	c/u	17
Diámetro Aluminio 1350 - H19			Mm	3,616
Diámetro Aleación de aluminio 6201 - T81			Mm	3,616
Diámetro interior del conductor			Mm	10,851
Diámetro exterior del conductor			Mm	25,31
Peso total aproximado del conductor			kg/km	1047,28
Carga a la rotura			kg	7075
Resistencia eléctrica máxima DC a 20°C			ohm/km	0,0777
Capacidad de corriente			Amp	840

**Tabla 2.8** Características del conductor ACAR 1200 para la línea de transmisión de 230 kV

Tipo			Unidad	Valor
Calibre			KCM	1200
Sección transversal			mm <sup>2</sup>	608,04
Construcción	N° Hilos	Aluminio 1350 - H19	c/u	18
		Aluminio 6201 - t81	c/u	19
Aluminio 1350 - H19			Mm	4,574
Aleación de aluminio 6201 - T81			Mm	4,574
Diámetro exterior del conductor			Mm	32,02
Peso total aproximado del conductor			kg/m	1672,68
Carga de Rutura			Kg	13696
Resistencia eléctrica máxima DC a 20°C			ohm/km	0,05099
Capacidad de Corriente			Amp	1075

**Tabla 2.9** Características del conductor ACSR 1113 para la línea de transmisión de 230 kV

<b>Tipo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Calibre</b>	KCM	1113
<b>Sección transversal</b>	mm <sup>2</sup>	603,15
<b>Número de alambres</b>	c/u	45/7
<b>Aluminio 1350 - H19</b>	Mm	3,995
<b>Acero</b>	Mm	2,665
<b>Diámetro exterior del conductor</b>	Mm	31,97
<b>Peso unitario del conductor</b>	kg/m	1,869
<b>Carga a la rotura</b>	Kgf	13554
<b>Resistencia eléctrica máxima DC a 20°C</b>	ohm/km	0,0507

**Tabla 2.10** Características del cable de guardia de acero galvanizado

<b>Tipo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Calibre</b>	KCM	3/8"
<b>Sección transversal</b>	mm <sup>2</sup>	51,14
<b>Número de alambres de acero galvanizado de alta resistencia</b>	c/u	7
<b>Diámetro nominal</b>	Mm	9,52
<b>Peso unitario del conductor</b>	kg/m	0,497
<b>Resistencia mínima a la rotura</b>	Kgf	4900
<b>Resistencia eléctrica máxima CC a 20°C</b>	ohm/km	0,05

**Tabla 2.11** Características del cable de guardia tipo OPGW

<b>Tipo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>N° de fibras ópticas</b>	c/u	24
<b>Diámetro exterior del conductor</b>	Mm	17
<b>Sección total</b>	mm <sup>2</sup>	140
<b>Sección aluminio</b>	mm <sup>2</sup>	105
<b>Sección acero</b>	mm <sup>2</sup>	35
<b>Resistencia eléctrica máxima DC a 20°C</b>	ohm/km	0,29
<b>Atenuación máx. 1310 nm, 20°C</b>	dB/km	0,4
<b>Atenuación máx. 1550 nm, 20°C</b>	dB/km	0,25

Cada fase del sistema está distribuida en un haz de 4 conductores disminuyendo así el efecto corona, la separación entre cada conductor del haz es de 45,7 cm; la flecha utilizada para los conductores de fase es de 15 m y para los hilos de guardia es 14 m.

### 2.5.3 CARÁCTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA A SER UTILIZADA

Las estructuras y los datos que describen la geometría de las Torres utilizadas tanto para las líneas de transmisión de 230 kV, como para la futura línea de 500 kV, tal como se muestra en las Figura 2.8.

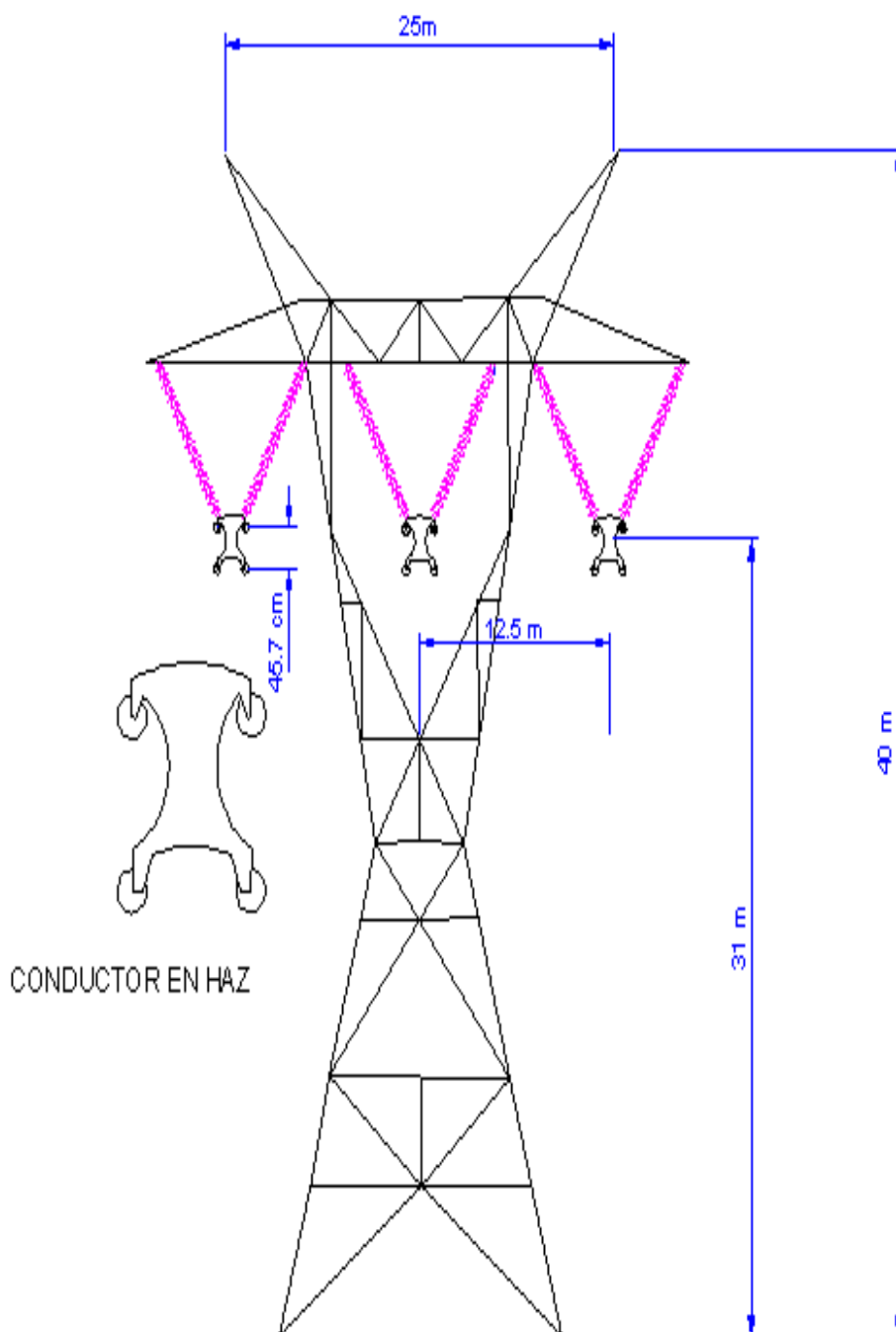


Figura 2.8 Estructura típica de 500 kV

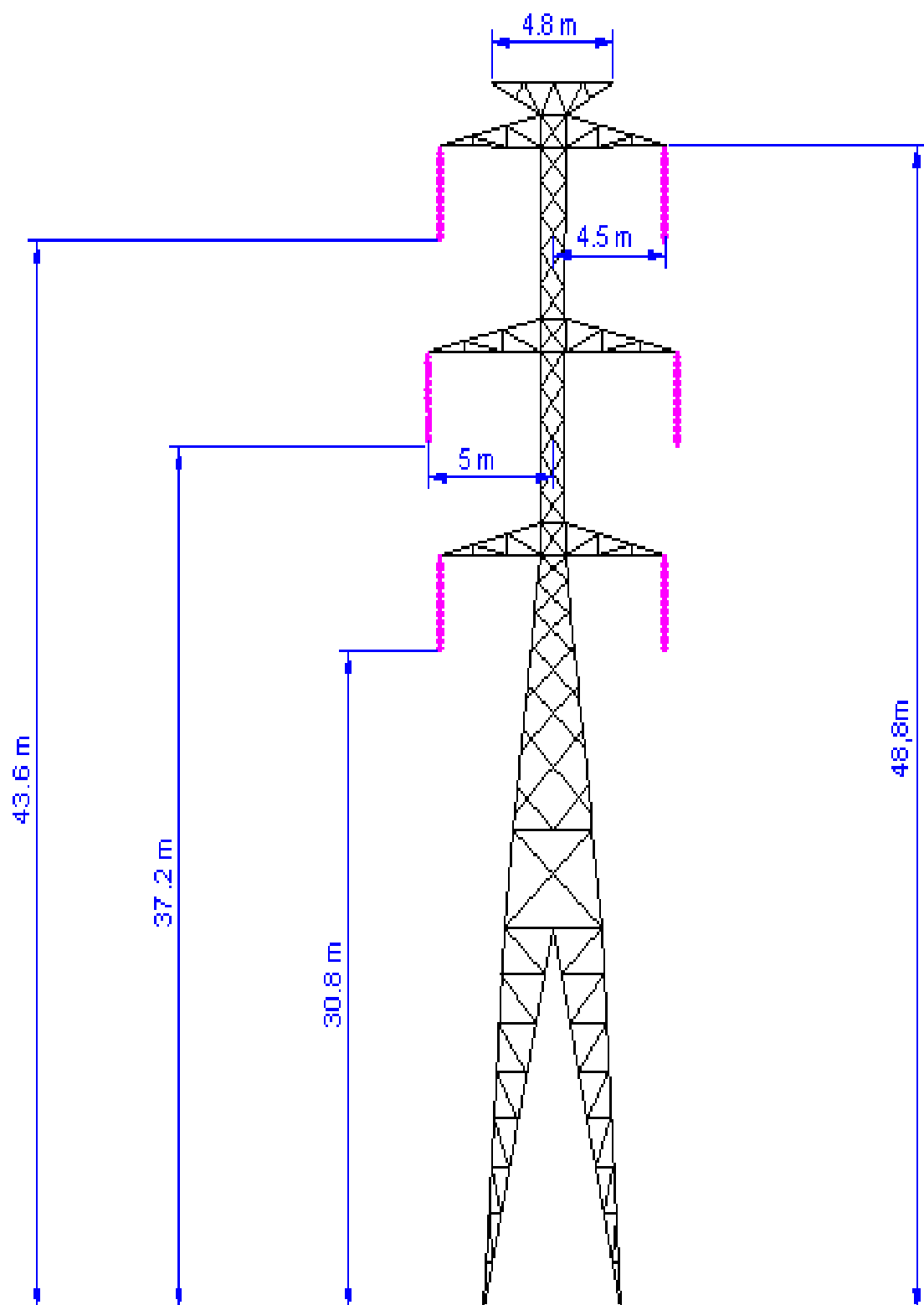


Figura 2.9 Estructura típica de 230 kV



## **CAPÍTULO III**

### **3. CASOS DE ESTUDIO DEL SISTEMA**

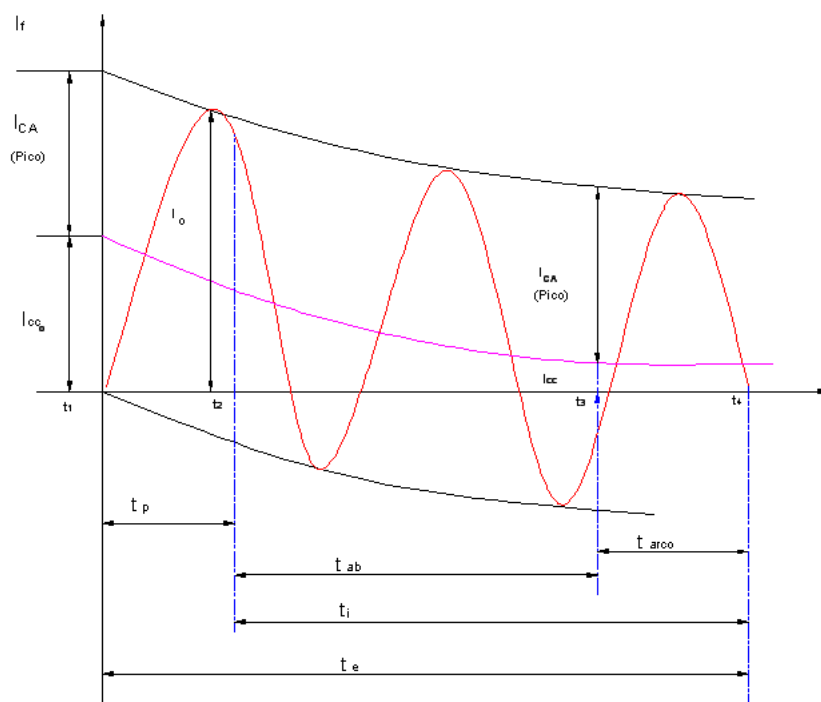
Con la modelación del interruptor de potencia mediante la comprensión y descripción del fenómeno del arco eléctrico se pretende, desde el punto de vista de la red, obtener los voltajes que se producen como consecuencia de la acción de apertura, además, desde la posición del interruptor en sí, determinar si éste es capaz de abrir exitosamente bajo condiciones extremas de operación, como son por ejemplo las fallas kilométricas o el corte de pequeñas corrientes inductivas o capacitivas.

En este capítulo se presenta el voltaje de recuperación que el interruptor debe ser capaz de soportar en sus bornes como consecuencia de la operación de apertura del interruptor en diferentes eventos de simulación; también se muestra la comparación de los voltajes obtenidos con el interruptor ideal que trae el programa ATP y el interruptor modelado.

#### **3.1 CONSIDERACIONES DE SIMULACIÓN**

Para la representación del proceso de interrupción de corriente se definen los tiempos de operación del interruptor, considerando la interrupción de corrientes relativas a cortocircuitos. Esta corriente de interrupción depende de la velocidad del interruptor (8, 5, 3 o 2 ciclos), que es una medida de tiempo que transcurre desde que ocurre la falla hasta la extinción del arco [8].

La figura 3.1 permite visualizar los parámetros que deben ser definidos para garantizar la correcta operación del interruptor en estas condiciones.



**Figura 3.1** Evolución de la corriente asimétrica de cortocircuito ( $I_f$ ) a lo largo del tiempo [6].

$t_1$	tiempo de inicio del cortocircuito
$t_2$	tiempo de energización del circuito de disparo
$t_3$	tiempo de separación de los contactos del interruptor
$t_4$	tiempo de la interrupción de la corriente
$t_p$	tiempo de actuación de la protección
$t_{ab}$	tiempo de apertura del disyuntor
$t_{arc}$	tiempo de duración del arco eléctrico
$t_i$	tiempo de interrupción de falla por el interruptor
$t_e$	tiempo para la eliminación de la falla
$I_e$	corriente de restablecimiento
$I_{CA}$	valor de cresta de la componente CA de la corriente de falla
$I_{CO}$	valor inicial de la componente de CC de la corriente de falla
$I_{cc}$	valor de la componente de CC de la corriente de falla en el instante de la separación de los contactos.

### 3.1.1 TIEMPO DE OPERACIÓN DEL INTERRUPTOR

El tiempo nominal de interrupción de un interruptor es el periodo que transcurre entre el instante en que se energiza el circuito de disparo y la extinción del arco en una operación de apertura de contactos, éste corresponde al mayor tiempo  $t_i$  que un disyuntor puede llevar para interrumpir una corriente de cualquier valor.

El tiempo de eliminación de una falla ( $t_e$ ) considerado, esta dado por:

$$t_e = t_p + t_i \quad (3.1)$$

donde:

$t_p$ , es el tiempo de retraso de disparo debido a la operación mecánica, generalmente se supone de  $\frac{1}{2}$  ciclo para que los relevadores operen.

$t_i$ , es el tiempo de interrupción, que en sistemas de 750 kV y 500 kV según [6] se recomienda especificar,  $t_i = 2$  ciclos.

Por lo tanto, el tiempo estimado para la simulación de la interrupción de corriente es:

$$t_e = 2,5 \text{ ciclos}$$

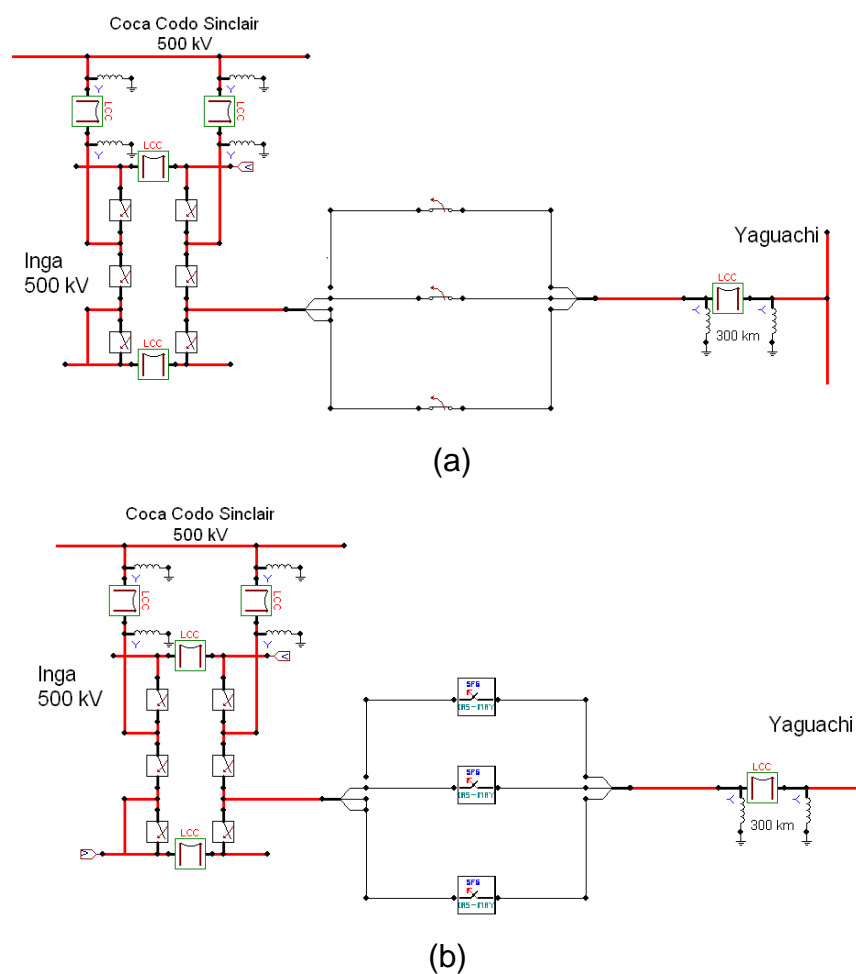
### 3.2 SIMULACIÓN DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA PARA DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN

En el modelo de caja negra es el comportamiento del arco y no el proceso físico que se desarrolla en el interruptor lo que tiene importancia, este modelo representa el efecto que tiene el arco sobre el sistema y el efecto de éste sobre el arco. Los casos más importantes para los que pueden ser aplicados son el corte de pequeñas corrientes inductivas y la desconexión de fallas kilométricas.

Para el análisis de los posibles eventos a los cuales estará sometido el interruptor de potencia, se considera el tramo de la Línea El Inga – Yaguachi (300 km).

Con la finalidad de validar la modelación del interruptor, se realiza la comparación de resultados obtenidos entre el interruptor ideal (herramienta para el diseño de circuitos eléctricos propia del programa ATPDraw) y el modelo de interruptor simulado en MODELS de ATP. En la simulación tanto del interruptor ideal como la del interruptor con SF6 se utiliza los mismos parámetros de simulación. En el anexo (E) se muestra el sistema que se considera para el análisis de los eventos a los cuales está sometido el interruptor de potencia.

La representación de los interruptores utilizados para el análisis y comparación de resultados se presentan en las siguientes figuras.



**Figura 3.2** Sistema modelado. (a) utilizando interruptor ideal. (b) utilizando el interruptor con

modelado de arco de Cassie y Mayr.

De acuerdo a los requerimientos de la norma *IEC-62271-100* para lograr una interrupción de corriente exitosa, el interruptor de potencia debe ser capaz de soportar entre sus contactos el *TRV* formado por la interrupción de corriente de corto circuito, ambas simétricas y asimétricas, a los voltajes especificados en la norma. Tales límites de funcionamiento se aplican solamente dentro de condiciones de operaciones específicas, que son los *TRVs* asociados con la corriente de cortocircuito más elevada y los *TRVs* más severos, obtenidos durante los siguientes eventos de simulación:

1. Interrupción en condición de falla cerca del interruptor o falla en terminales del interruptor (terminal fault)
2. Interrupción en condición de falla lejos del interruptor o falla en línea corta (short – line fault)
3. Interrupción de corrientes capacitivas

Previo a la comparación de las gráficas obtenidas en la simulación del interruptor ideal y del interruptor modelado con medio de extinción SF6 se describe brevemente el funcionamiento de los interruptores utilizados:

*a) Interruptor Ideal (proporcionado por el programa ATP)*

El interruptor ideal es aquel que está incluido como herramienta en el programa ATPDraw, es el más sencillo y considera una acción de apertura ideal independiente de la red sin intervención del arco eléctrico. La acción de apertura se realiza con el primer paso por cero de la corriente, luego de haber recibido la orden de apertura y la acción de cierre se realiza con la primera anulación del voltaje luego de recibirse la orden de cierre.

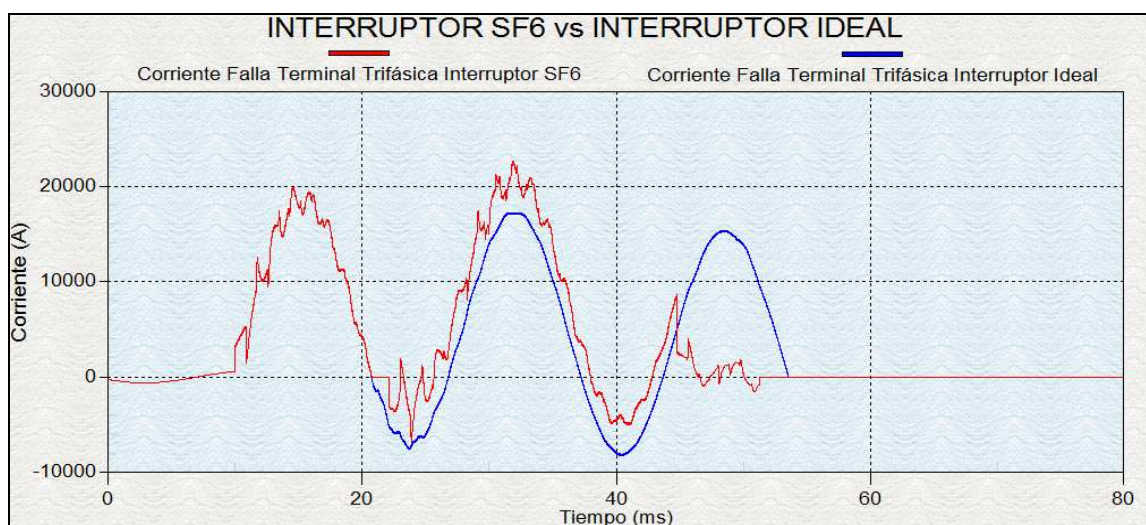
*b) Interruptor con SF6 con modelado de arco de Cassie y Mayr*

En este caso la simulación se realizó utilizando el modelo de arco eléctrico de Cassie y Mayr, este modelo es aquel que es capaz de representar al interruptor como una resistencia o una conductancia variable en el tiempo, cuyo valor depende del proceso previo del arco. Este modelo representa el

efecto que el arco tiene sobre el sistema y el efecto de éste sobre el arco. La solución de la ecuación escogida para representar el arco eléctrico, es calculada a cada paso de integración, suponiendo que la constante de tiempo y la conductancia del arco, permanecen constantes durante el paso de integración elegido.

### 3.2.1 INTERRUPCIÓN EN CONDICIÓN DE FALLA CERCA DEL INTERRUPTOR (*TERMINAL FAULT*)

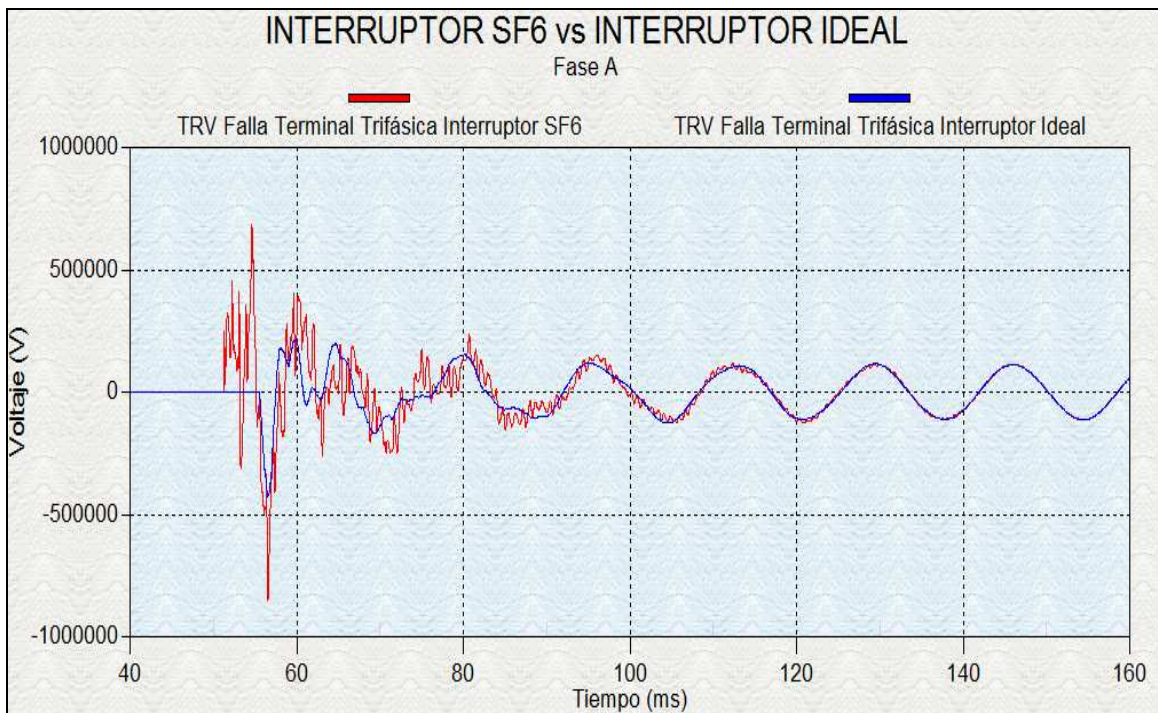
En las simulaciones para la eliminación de una falla en terminales del interruptor, se consideran fallas trifásicas aplicadas en los terminales del interruptor a la salida de la línea El Inga – Yaguachi en la S/E El Inga, con el cálculo del TRV para los tres polos del interruptor y la corriente en una de las fases del sistema.



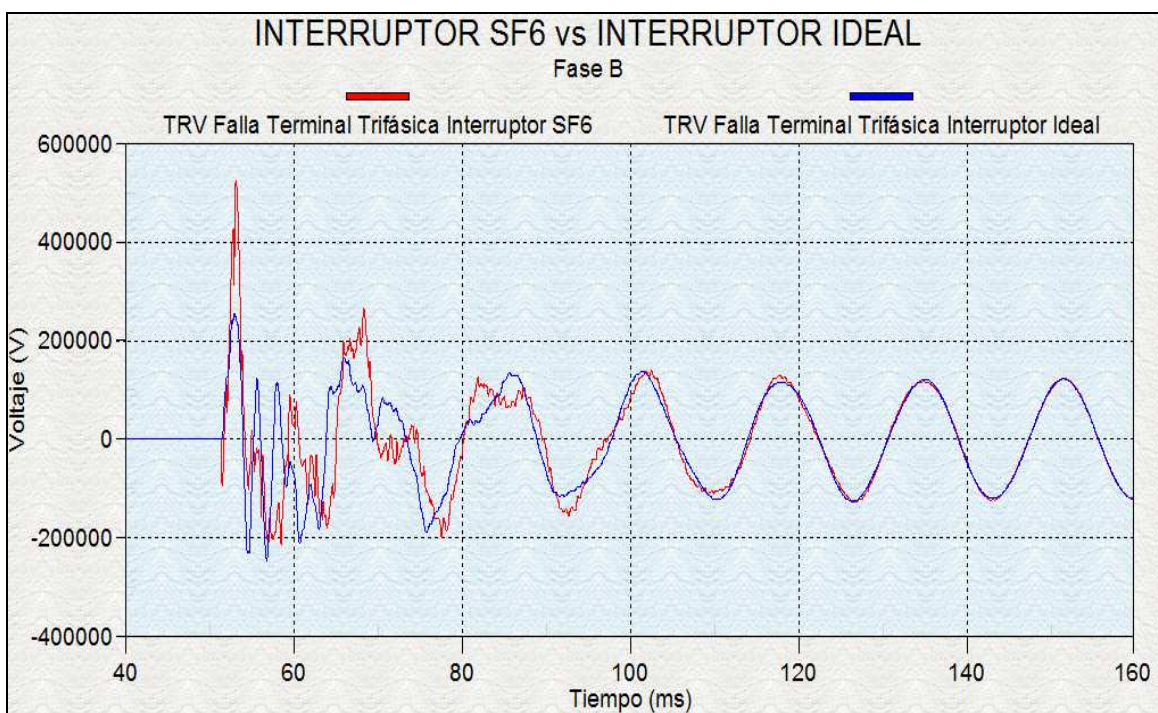
**Figura 3.3** Corriente en el interruptor ideal vs corriente en el interruptor sf6 en falla trifásica en terminales del interruptor.

En la figura 3.3 se observa que la corriente en el interruptor ideal se mantiene sin cambio alguno a pesar de que el interruptor ya operó a los 0,0513 s, sin embargo, como la apertura no coincidió con el cruce por cero, el interruptor ideal continúa operando hasta que la corriente realice el siguiente cruce por cero después de la orden de apertura, mientras esto sucede la corriente alcanza valores similares a los que se registran durante la falla. La corriente que se registra al momento de la falla trifásica tiene un valor pico de 19,661 kA mientras que en el interruptor con

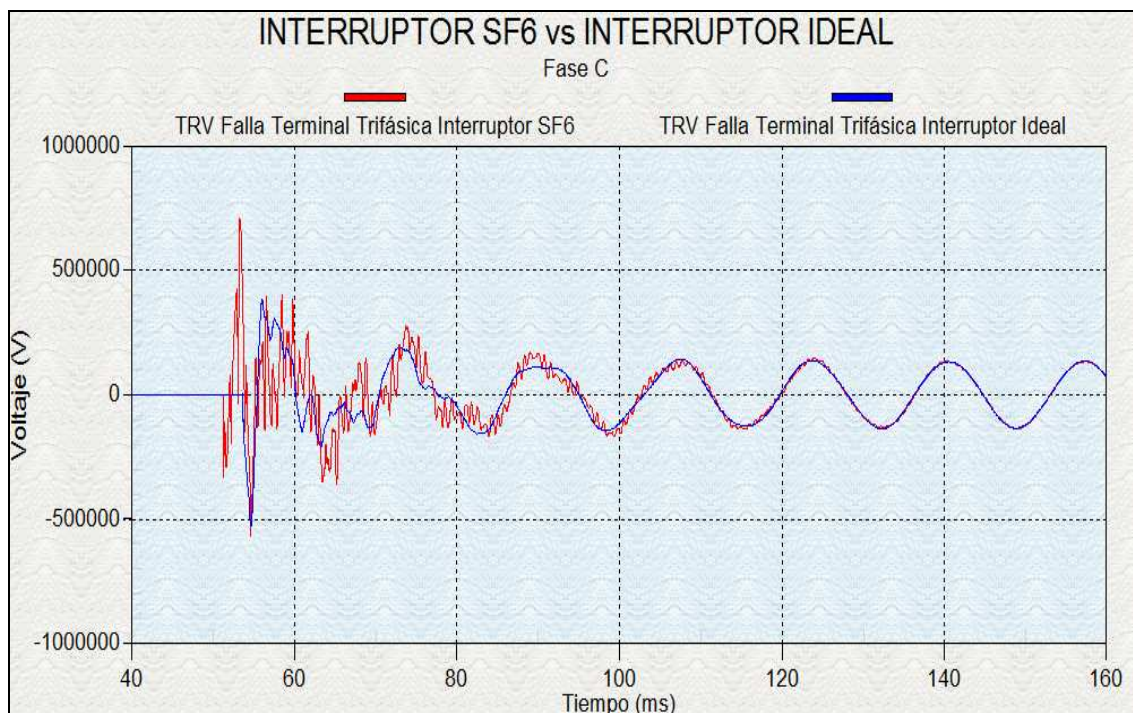
modelado de arco de Cassie – Mayr se registra un valor pico de 22,442 kA se observa que el interruptor opera a los 0,0513 s y es casi de manera instantánea la interrupción total de la corriente.



(a)



(b)



(c)

**Figura 3.4** Voltajes transitorios de recuperación en la falla trifásica en terminales del, interruptor ideal vs interruptor en SF6. (a) TRV fase A. (b) TRV fase B. (c) TRV fase C.

La figura 3.4 muestra los Voltajes Transitorios de Recuperación tanto para el interruptor ideal como para el de SF6 obtenidos en cada una de las fases del sistema.

Al inicio de la simulación se observa que el interruptor ideal y el de SF6 se encuentran cerrados por lo que la diferencia de potencial es cero, sin embargo a los  $0,0513$  s, momento en el que empieza la operación de apertura, no hay ningún cambio en el interruptor ideal sino hasta el tiempo en el que la corriente alcance el primer cruce por cero para interrumpir el circuito, mientras que para el interruptor SF6 el voltaje de recuperación comienza en el tiempo  $0,0513$  s, instante en el que se interrumpe la corriente; posterior a estos puntos el voltaje comienza a disminuir su valor de forma gradual.

Un resumen de los valores máximos de voltaje y corriente obtenidos en el caso del corte de corriente debida a una falla trifásica en terminales del interruptor en el lado de la S/E El Inga se muestra en la Tabla 3.1.



**Tabla 3.1.** Resultados del corte de corriente en una falla trifásica en los terminales del interruptor en la S/E El Inga

Tipo de Interruptor	TRV (kV)			CORRIENTES (kA)	
	Fase A	Fase B	Fase C	I Falla	I Interrupción
IDEAL	427,25	252,37	528,79	19,661	15,347
SF6	851,68	524,75	706,19	22,442	7,907

En la tabla 3.1 se presenta los resultados obtenidos del TRV y de la corriente, tanto en el interruptor ideal como en el interruptor en SF6. Siendo los valores del TRV en SF6 más elevados que los del interruptor ideal en los tres polos del interruptor, estos valores presentan un incremento a razón promedio de 1.77 respecto al TRV del interruptor ideal. Los valores obtenidos en el interruptor en SF6 muestran tal aumento debido a que conforme se aproxima el momento de anulación de corriente, la apertura de los contactos del interruptor hacen contacto con el medio de extinción modelado, después de que la corriente se anula aparece el TRV que es función del balance energético del arco eléctrico modelado.

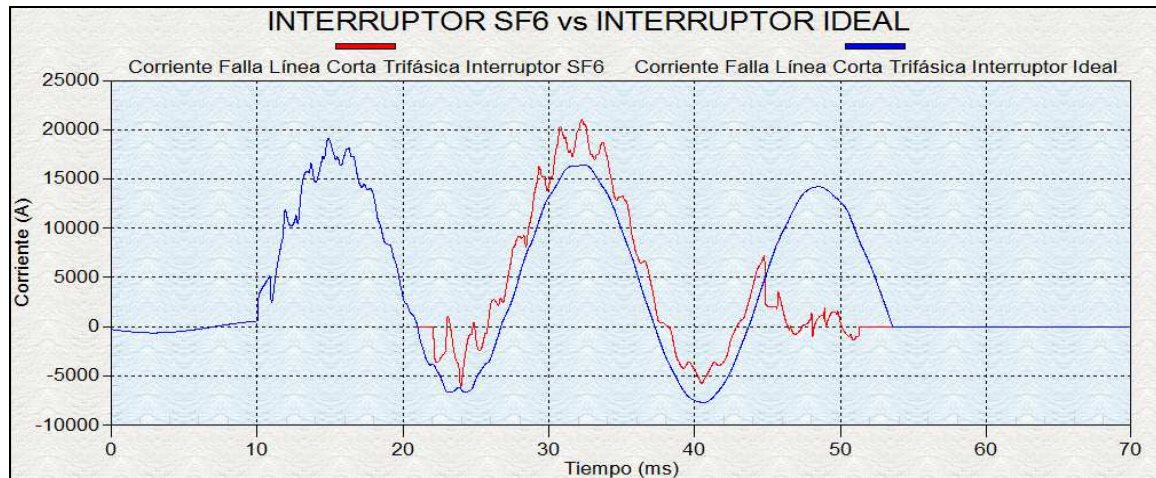
Los valores de TRV registrados en el interruptor en SF6 dan una idea más cercana a la realidad de los posibles valores de voltaje que el interruptor debe ser capaz de soportar en sus bornes en la operación de apertura.

### 3.2.2 INTERRUPCIÓN EN CONDICIÓN DE FALLA LEJOS DEL INTERRUPTOR (*SHORT – LINE FAULT*)

Para la simulación de la interrupción en condición de falla lejos del interruptor se considera fallas monofásicas y trifásicas aplicadas en tramos cortos de la línea de transmisión a distancias entre 1 a 5 km del disyuntor [6].

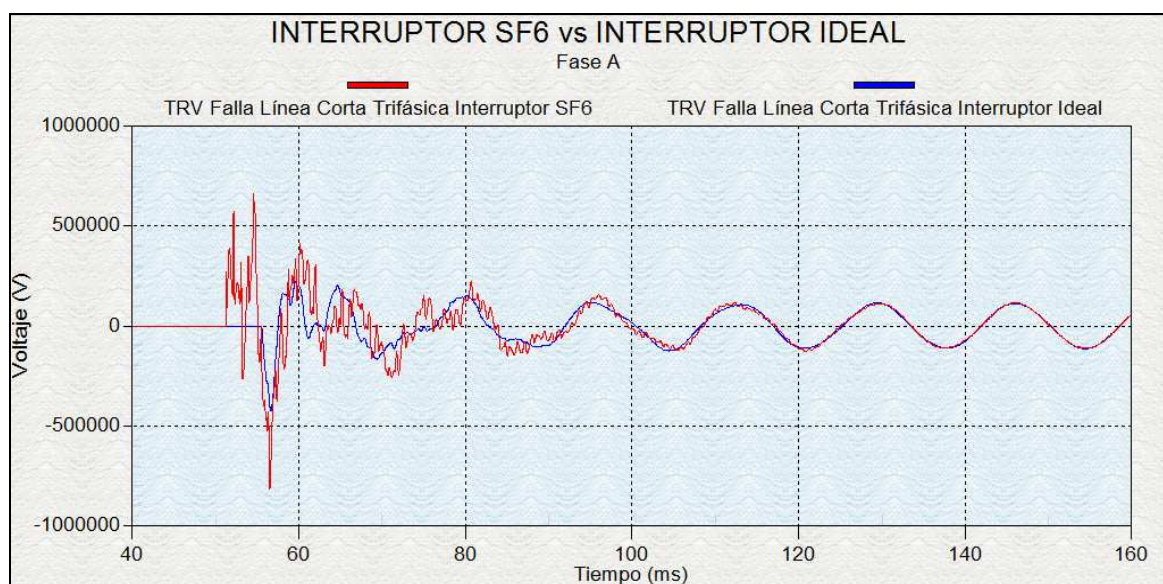
La distancia considerada en la simulación es de 5 km de la línea a partir del interruptor ubicado en la S/E El Inga.

### 3.2.2.1 Falla Trifásica

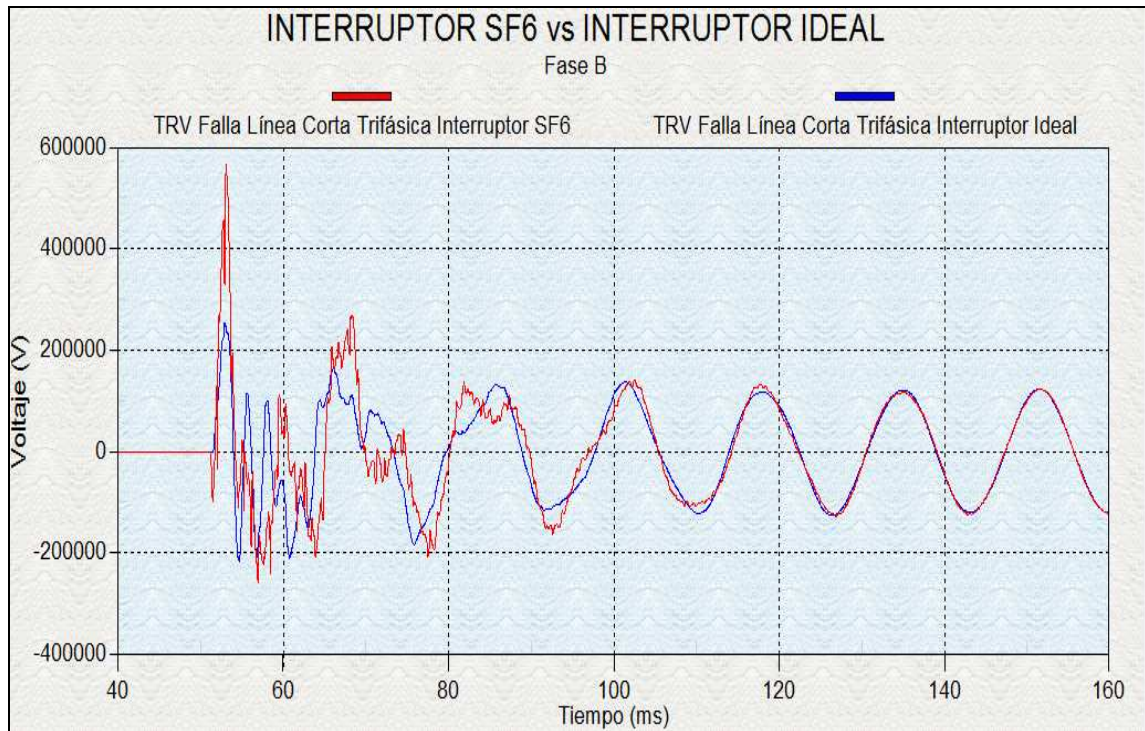


**Figura 3.5** Corriente en la falla trifásica de línea corta en el interruptor ideal vs corriente en la falla trifásica de línea corta en el interruptor SF6

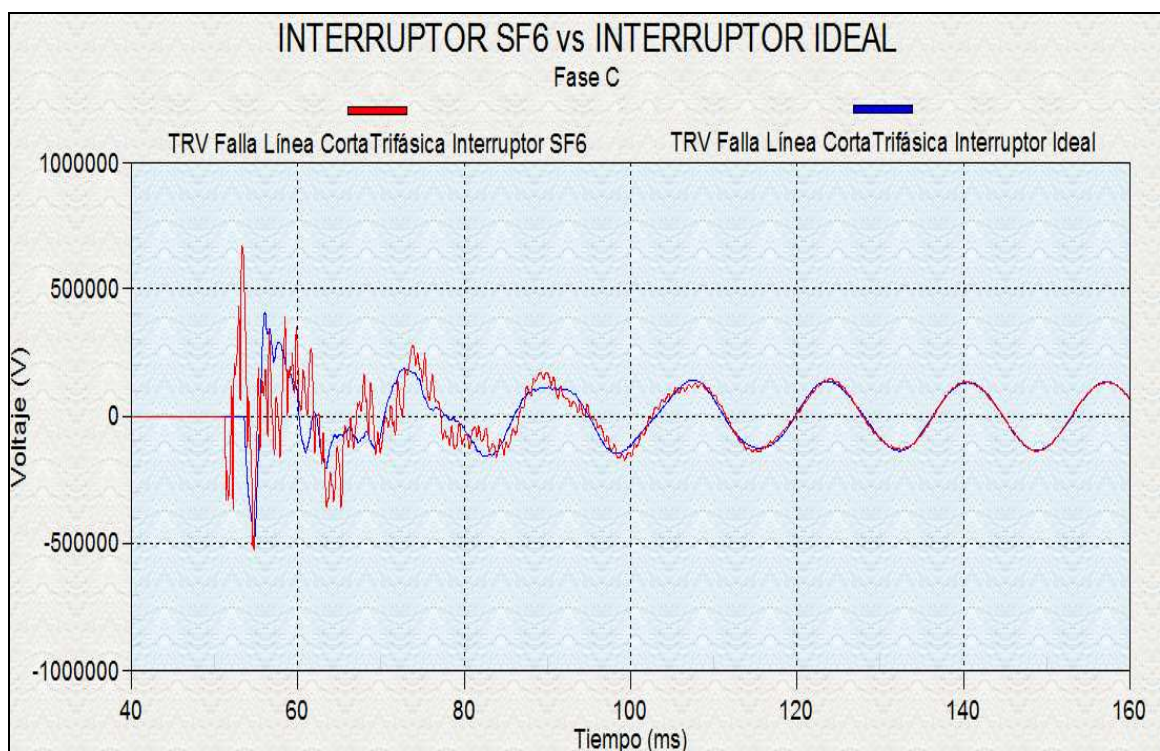
En la Figura 3.5 se observa las corrientes tanto del interruptor ideal como la del interruptor SF6 debidas a una falla trifásica en un pequeño tramo de la línea El Inga – Yaguachi, la corriente que se registra al momento de la falla trifásica tiene un valor pico de 19,067 kA para el interruptor ideal y 20,992 kA para el interruptor en SF6, el interruptor ideal opera en el primer cruce por cero, luego de la orden de apertura, mientras que el interruptor en SF6 opera en 0,0513 s tiempo estimado para la operación de apertura.



(a)



(b)



(c)

**Figura 3.6** Voltajes transitorios de recuperación en la falla trifásica de línea corta, interruptor ideal vs interruptor en SF6. (a) TRV fase A. (b) TRV fase B. (c) TRV fase C.

La Figura 3.6 muestra los voltajes transitorios de recuperación obtenidos en cada una de las fases del sistema tanto en los polos del interruptor ideal como del interruptor SF6, el *TRV* obtenido es producto de una falla trifásica en un pequeño tramo de la línea. Además se observa que al inicio de la simulación el interruptor ideal y el de SF6 se encuentran cerrados por lo que la diferencia de potencial es cero sin embargo, a los 0,0513 *s*, momento en el que empieza la operación de apertura no hay ningún cambio en el interruptor ideal sino hasta el tiempo en el que la corriente alcance el primer cruce por cero para interrumpir el circuito, mientras que para el interruptor SF6 el voltaje de recuperación comienza en el tiempo 0,0513 *s* instante en el que se interrumpe la corriente, posterior a estos puntos el voltaje comienza a disminuir su valor de forma gradual.

Un resumen de los valores máximos de voltaje y corriente obtenidos en el caso del corte de corriente debida a una falla trifásica aplicada en un corto tramo de la Línea El Inga – Yaguachi se muestra en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Resultados del corte de corriente en una falla trifásica aplicada en un corto tramo de la Línea El Inga – Yaguachi.

Tipo de Interruptor	TRV (kV)			CORRIENTES (kA)	
	<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	<i>I Falla</i>	<i>I Interrupción</i>
<b>IDEAL</b>	419,7	253,47	502,55	19,067	14,197
<b>SF6</b>	814,61	563,77	663,25	20,992	6,948

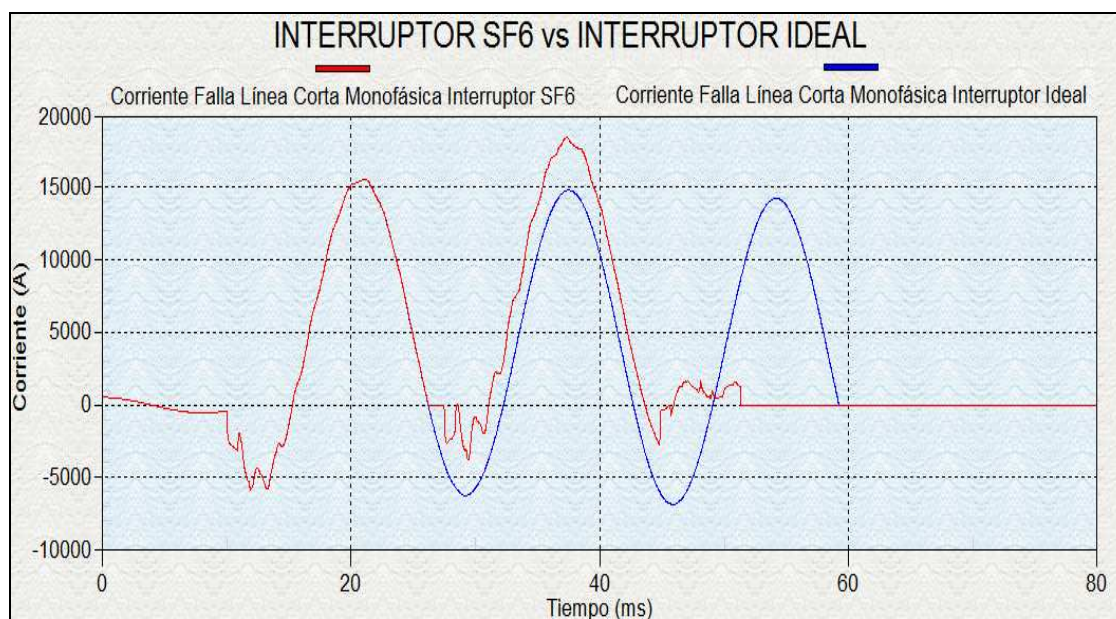
En la tabla 3.2 se presentan los resultados obtenidos del TRV y de la corriente tanto en el interruptor ideal como en el interruptor en SF6. Siendo los valores del TRV en SF6 más elevados que los del interruptor ideal en los tres polos del interruptor, estos valores presentan un incremento a razón promedio del 1.7 respecto al TRV del interruptor ideal.

Los valores obtenidos en el interruptor en SF6 muestran tal aumento debido a que conforme se aproxima el momento de anulación de corriente, la apertura de los contactos del interruptor hacen contacto con el medio de extinción modelado,

después de que la corriente se anula aparece el TRV que es función del balance energético del arco eléctrico modelado.

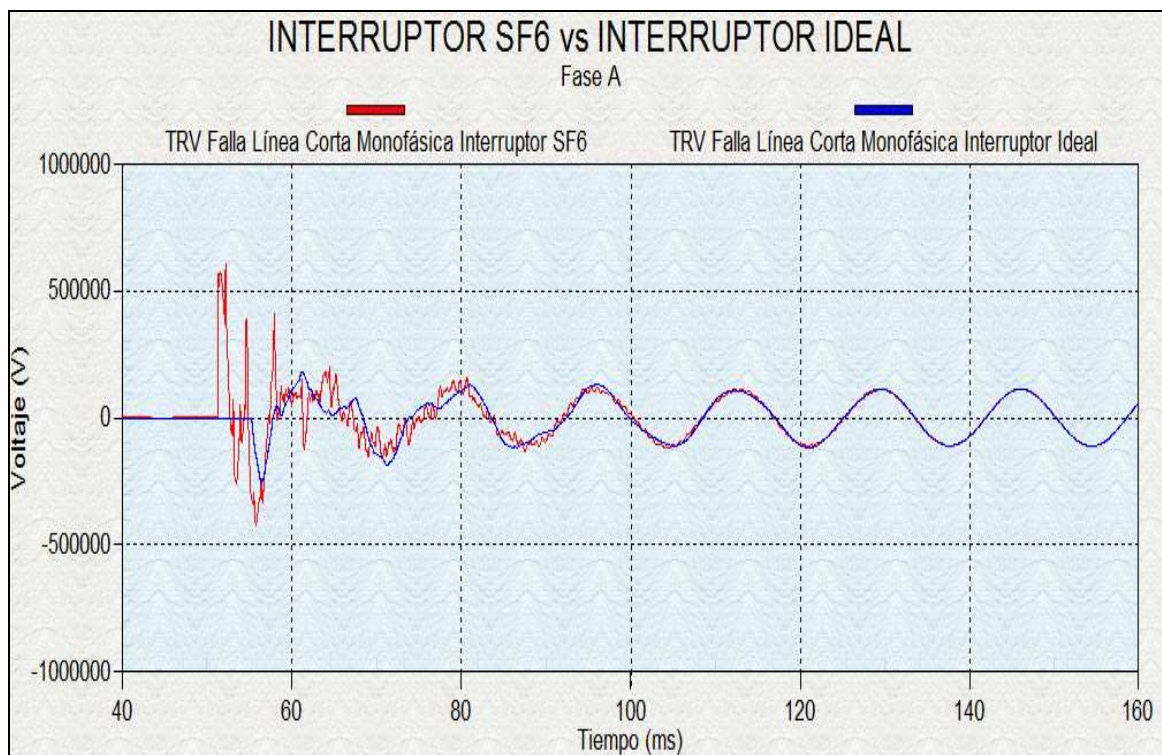
Los valores de TRV registrados en el interruptor en SF6 dan una idea más cercana a la realidad de los posibles valores de voltaje que el interruptor debe ser capaz de soportar en sus bornes en la operación de apertura.

### 3.2.2.2 Falla Monofásica

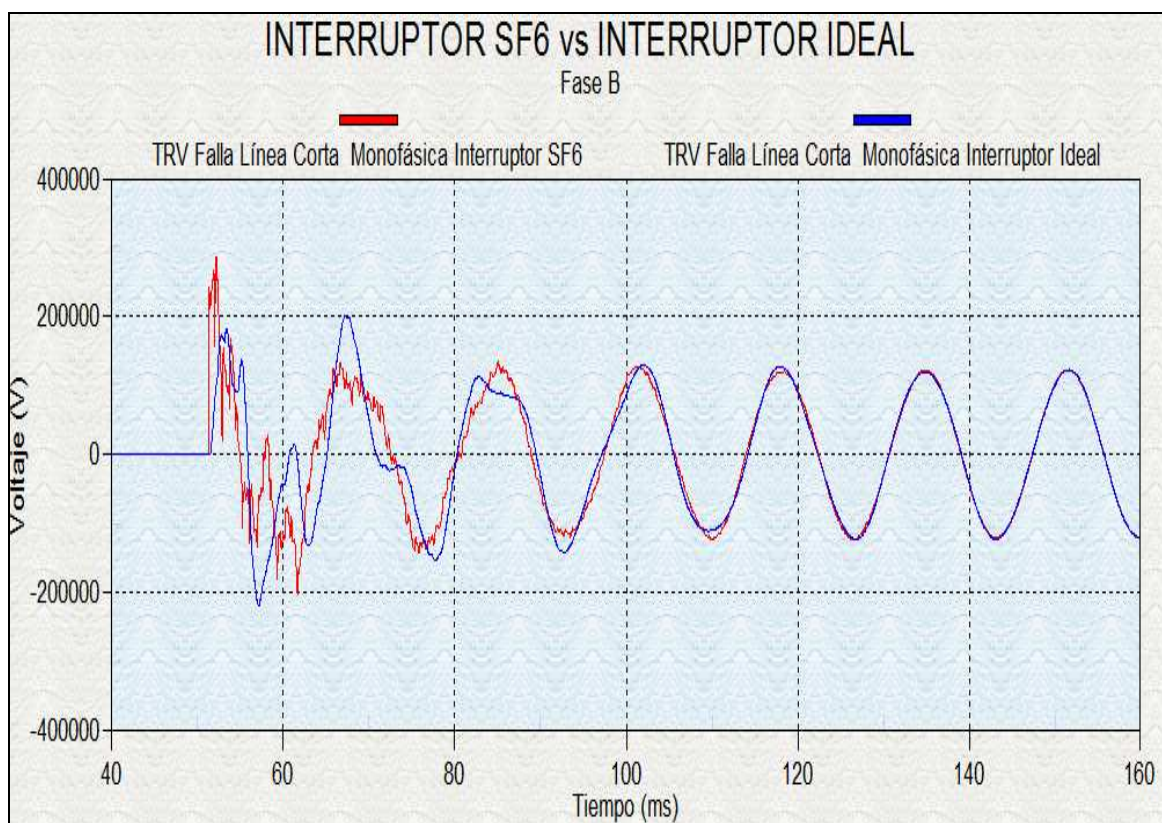


**Figura 3.7** Corriente en el interruptor ideal vs corriente en el interruptor SF6 en la falla monofásica en línea corta.

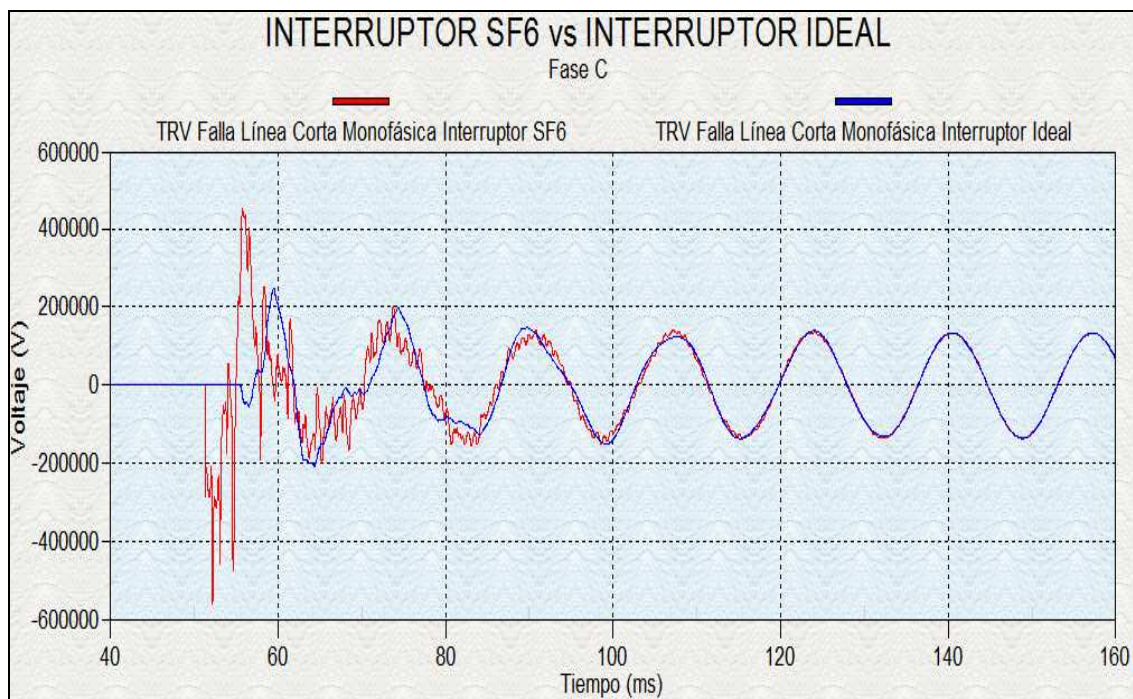
En la Figura 3.7 se observa las corrientes tanto del interruptor ideal como la del interruptor SF6 debidas a una falla monofásica aplicada en un pequeño tramo de la línea El Inga – Yaguachi, la corriente que se registra al momento de la falla monofásica tiene un valor pico de 15,569 kA para el interruptor ideal y 18,429 kA para el interruptor en SF6, el interruptor ideal opera en el primer cruce por cero, luego de la orden de apertura, mientras que el interruptor en SF6 opera en 0,0513 s tiempo estimado para la operación de apertura.



(a)



(b)



(c)

**Figura 3.8** Voltajes transitorios de recuperación corriente en la falla monofásica en línea corta, interruptor ideal vs interruptor en SF6. (a) TRV fase A. (b) TRV fase B. (c) TRV fase C.

La Figura 3.8 muestra los voltajes transitorios de recuperación obtenidos en cada una de las fases del sistema tanto en los polos del interruptor ideal como del interruptor SF6, los TRV's obtenidos son producto de una falla monofásica en un pequeño tramo de la línea. Además, se observa que al inicio de la simulación el interruptor ideal y el de SF6 se encuentran cerrados por lo que la diferencia de potencial es cero, sin embargo a los 0,0513 s, momento en el que empieza la operación de apertura, no hay ningún cambio en el interruptor ideal sino hasta el tiempo en el que la corriente alcance el primer cruce por cero para interrumpir el circuito, mientras que para el interruptor SF6 el voltaje de recuperación comienza en el tiempo 0,0513 s instante en el que se interrumpe la corriente, posterior a estos puntos el voltaje comienza a disminuir su valor de forma gradual.

Un resumen de los valores máximos de voltaje y corriente obtenidos en el caso del corte de corriente debida a una falla Monofásica aplicada en un corto tramo de la Línea El Inga – Yaguachi se muestra en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3** Resultados del corte de corriente en una falla Monofásica aplicada en un corto tramo de la Línea El Inga – Yaguachi.

Tipo de Interruptor	TRV (kV)			CORRIENTES (kA)	
	<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	<i>I Falla</i>	<i>I Interrupción</i>
<b>IDEAL</b>	404,51	219,4	210,06	15,569	14,256
<b>SF6</b>	608,62	285,48	557,92	18,429	2,553

En la tabla 3.3 se presenta los resultados obtenidos del TRV y de la corriente tanto en el interruptor ideal como en el interruptor en SF6. Siendo los valores del TRV en SF6 más elevados que los del interruptor ideal en los tres polos del interruptor, estos valores presentan un incremento a razón promedio del 1.7 respecto al TRV del interruptor ideal.

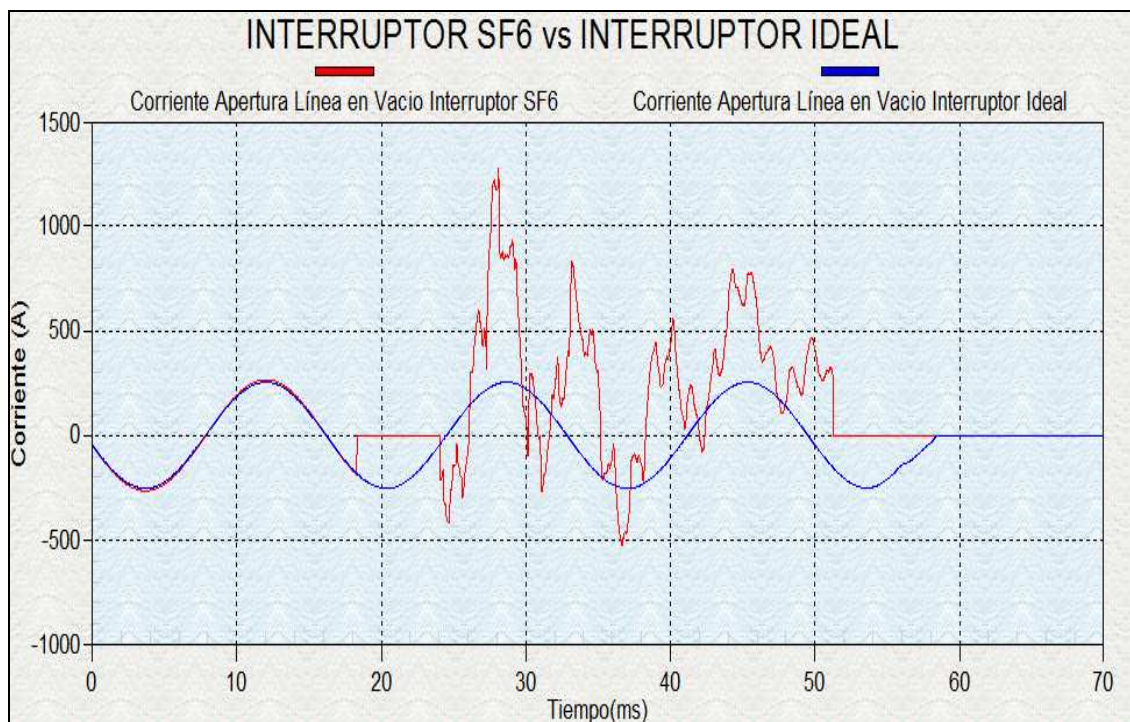
Los valores obtenidos en el interruptor en SF6 muestran tal aumento debido a que conforme se aproxima el momento de anulación de corriente, la apertura de los contactos del interruptor hacen contacto con el medio de extinción modelado, después de que la corriente se anula aparece el TRV que es función del balance energético del arco eléctrico modelado.

Los valores de TRV registrados en el interruptor en SF6 dan una idea más cercana a la realidad de los posibles valores de voltaje que el interruptor debe ser capaz de soportar en sus bornes en la operación de apertura.

### 3.2.3 INTERRUPCIÓN DE CORRIENTES CAPACITIVAS

Para la simulación de la apertura de corrientes capacitivas se considera, el TRV de los tres polos del interruptor de la línea El Inga – Yaguachi la cual está en vacío y la corriente obtenida en una de las fases del sistema.

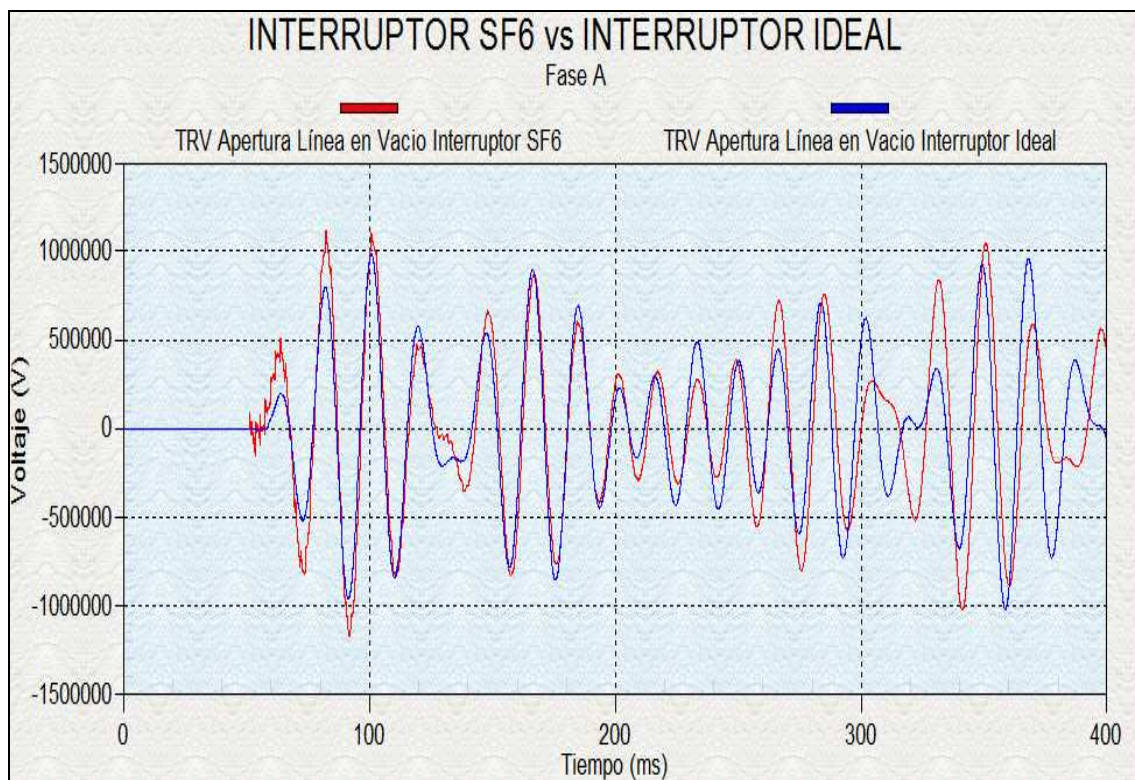




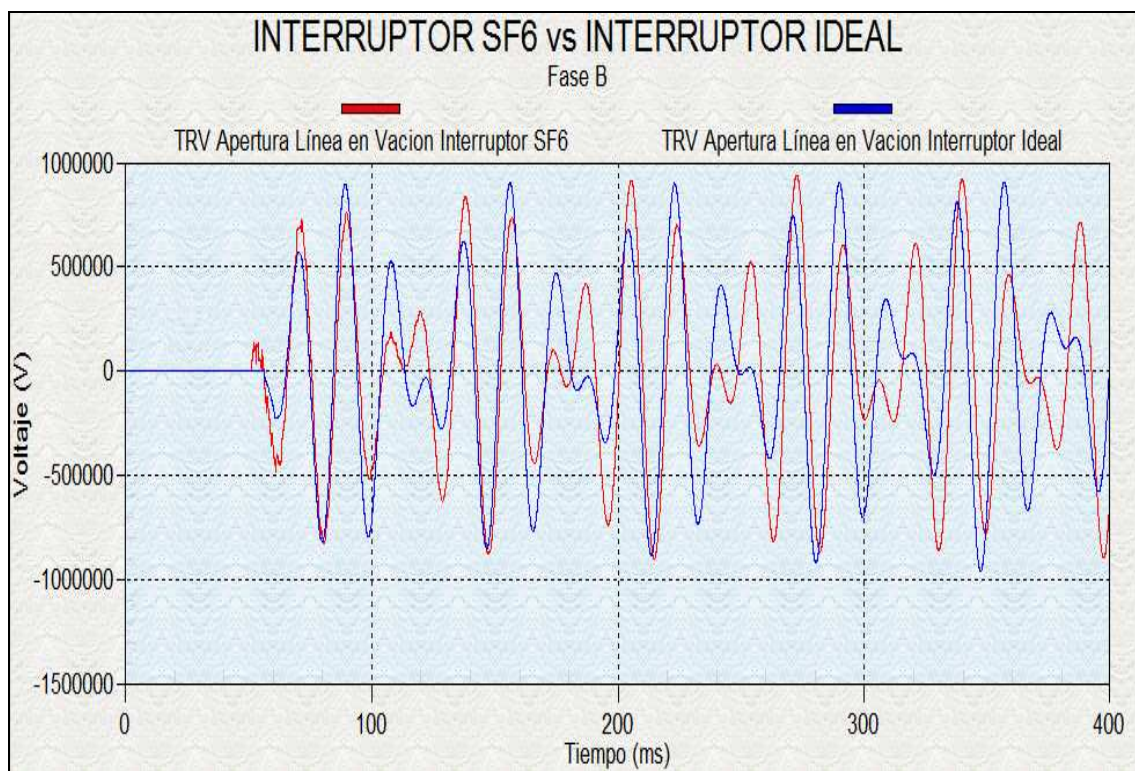
**Figura 3.9** Corriente en el interruptor ideal vs corriente en el interruptor SF6 en apertura de la Línea en Vacío

En la Figura 3.9 se observa las corrientes concernientes al interruptor ideal y al interruptor SF6 que se obtienen al momento de interrumpir la corriente en la línea El Inga – Yaguachi en vacío, el valor pico de 252,57 A corresponde al interruptor ideal y el valor de 1275,5 kV al interruptor en SF6, se observa también que el interruptor ideal opera en el primer cruce por cero, luego de la orden de apertura del interruptor, mientras que el interruptor en SF6 opera en 0,0513 s tiempo estimado para la operación de apertura.

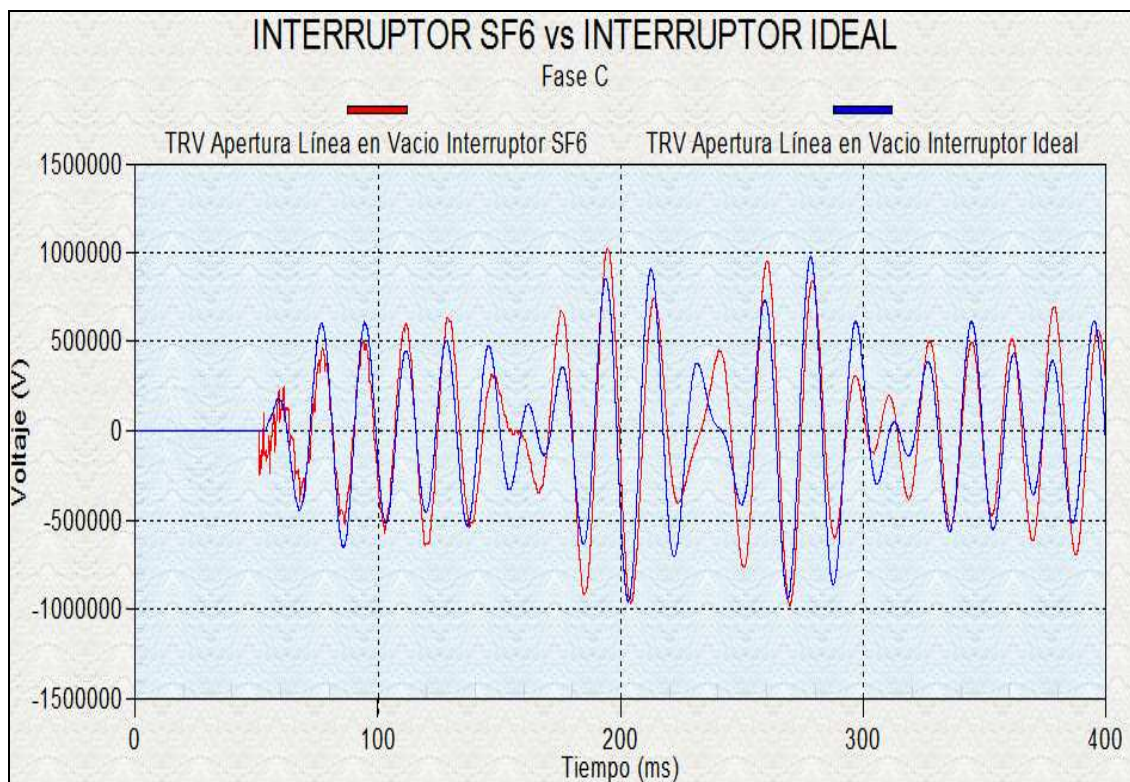
Las corrientes obtenidas en el interruptor en SF6 tienen un incremento considerable respecto al del interruptor ideal esto debido a que al iniciarse la apertura de los contactos del interruptor la corriente continúa fluyendo a través del medio de extinción.



(a)



(b)



(c)

**Figura 3.10** Voltajes transitorios de recuperación en apertura de la línea en vacío, interruptor ideal vs interruptor en SF6. (a) TRV fase A. (b) TRV fase B. (c) TRV fase C.

La Figura 3.10 muestra los voltajes transitorios de recuperación tanto del interruptor ideal como del interruptor SF6 obtenidos en cada una de las fases del sistema, los TRV's obtenidos son producto de la maniobra de apertura de la Línea El Inga – Yaguachi en vacío. Además se observa que al inicio de la simulación el interruptor ideal y el de SF6 se encuentran cerrados por lo que la diferencia de potencial es cero sin embargo a los  $0,0513 \text{ s}$  momento en el que empieza la operación de apertura no hay ningún cambio en el interruptor ideal, sino hasta el tiempo en el que la corriente alcance el primer cruce por cero para interrumpir el circuito, mientras que para el interruptor SF6 el voltaje de recuperación comienza en el tiempo  $0,0513 \text{ s}$  instante en el que se interrumpe la corriente.

Un resumen de los valores máximos de voltaje y corriente obtenidos en el caso del corte de corriente capacitiva aplicada en Línea El Inga – Yaguachi en vacío se muestra en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Resultados del corte de corriente en una interrupción de corrientes capacitivas aplicada en la línea El Inga – Yaguachi en vacío.

Tipo de Interruptor	TRV (kV)			CORRIENTES (A)	
	<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	<i>I Falla</i>	<i>I Interrupción</i>
<b>IDEAL</b>	945,17	891,35	889,79	253,35	235,06
<b>SF6</b>	1164,2	937,25	1012,7	1275,5	794,57

En la tabla 3.4 se presenta los resultados obtenidos del TRV y de la corriente tanto en el interruptor ideal como en el interruptor en SF6. Siendo los valores del TRV y de la corriente en SF6 más elevados que los del interruptor ideal en los tres polos del interruptor, estos valores presentan un incremento a razón promedio del 1.15 y del 4.19 al TRV y corriente respectivamente del interruptor ideal. Los valores obtenidos en el interruptor en SF6 muestran tal aumento debido a que conforme se aproxima el momento de anulación de corriente, la apertura de los contactos del interruptor hacen contacto con el medio de extinción modelado, después de que la corriente se anula aparece el TRV que es función del balance energético del arco eléctrico modelado.

Los valores de TRV registrados en el interruptor en SF6 dan una idea más cercana a la realidad de los posibles valores de voltaje que el interruptor debe ser capaz de soportar en sus bornes en la operación de apertura.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta la determinación de los requisitos del voltaje transitorio de recuperación (*TRV*) derivados del capítulo anterior relacionados con las maniobras de apertura aplicadas al interruptor en la línea de transmisión El Inga –Yaguachi, verificando principalmente los límites establecidos en las Normas técnicas de disyuntores para la especificación de la capacidad de interrupción del interruptor.

#### 4.1 REPRESENTACIÓN DEL TRV EN NORMAS

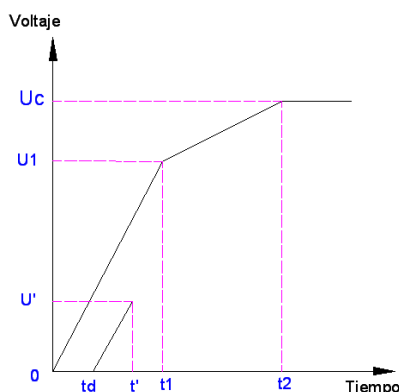
Para la representación de los voltajes transitorios de recuperación en bornes del interruptor la Norma IEC 62271-100 (High-voltage switchgear and controlgear - Part 100 [19]: high voltage alternating-current circuit breakers), define dos formas de onda de *TRV* de:

1. dos parámetros
2. cuatro parámetros.

La representación de dos parámetros se refiere a Voltajes Transitorios de Recuperación (*TRV*) que contienen una frecuencia de oscilación, y de cuatro parámetros son *TRV* que contienen dos o más frecuencias de oscilación.

- a) Trazo de referencia a Cuatro Parámetros.

La figura 4.1 muestra la forma de representación del *TRV* de cuatro parámetros.



**Figura 4.1** Representación del TRV de cuatro parámetros [19].

donde:

$u_1$  = Primer pico del voltaje de restablecimiento, en kilovoltios.

$t_1$  = tiempo en que se alcanza el voltaje  $u_1$  a partir de la interrupción de corriente, en microsegundos.

$u_c$  = Segundo voltaje de referencia (valor pico de TRV), en kilovoltios.

$t_2$  = tiempo en que se alcanza el voltaje  $u_c$  a partir de la interrupción de corriente.

Los parámetros del *TRV* están definidos en función del voltaje nominal ( $U_r$ ), el factor del primer polo ( $k_{pp}$ ), el factor de amplitud ( $k_{af}$ ), como sigue:

$$u_1 = k_{pp} * \sqrt{\frac{2}{3}} * U_r \quad (4.1)$$

donde

$k_{pp}$ , es función de puesta a tierra del sistema y el tipo de falla.

$t_1$  determinado a partir de  $u_1$  y el valor específico de la tasa de crecimiento es

$$RRRV = u_1 / t_1 \quad (4.2)$$

$$U_c = k_{af} * U_1 \quad (4.3)$$

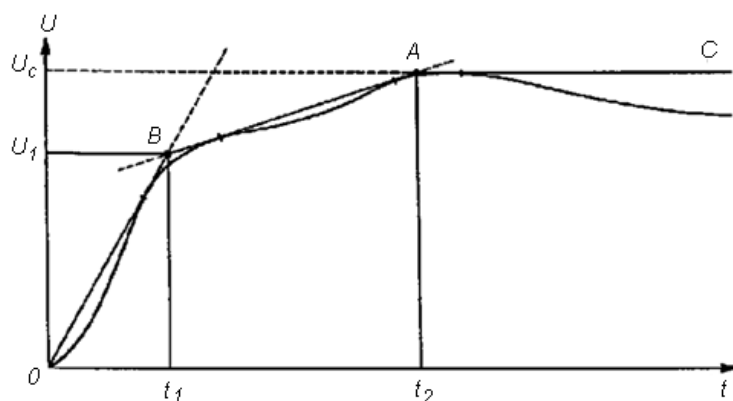
donde

$k_{af}$ , es la relación entre el valor pico del *TRV* y el valor pico del *VR* a frecuencia industrial y es igual a:

- 1.4 para falla cercana al interruptor (terminal fault) y falla lejos del interruptor (short – line fault)
- 1.25 para falla fuera de fase (out-of-phase)

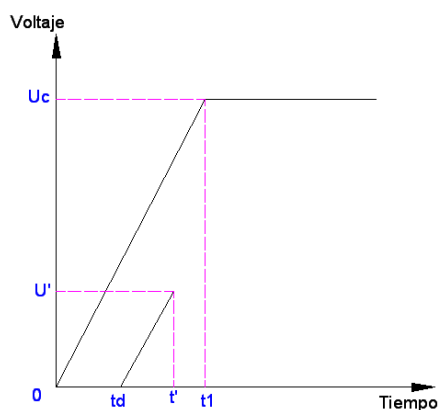
y siendo  $t_2 = 3 * t_1$ .

El trazado de cuatro parámetros especificado por la Norma IEC 62271-100 se muestra en la figura 4.2.



**Figura 4.2** Trazado para cuatro parámetros [19]

b) Trazo de referencia a Dos Parámetros.



**Figura 4.3** Representación del TRV de dos parámetros [19].

$u_c$  = Voltaje de referencia (valor pico de TRV), en kilovoltios.

$t_1$  = Tiempo en que alcanza  $u_c$ , en microsegundos.

Los parámetros del *TRV* están definidos en función del voltaje nominal designado ( $U_r$ ), el factor del primer polo ( $k_{pp}$ ), el factor de amplitud ( $k_{af}$ ), como sigue:

$$u_c = k_{pp} * k_{af} * \sqrt{2/3} * U_r, \quad (4.4)$$

donde  $k_{af}$  es igual a:

- 1.4 para falla cercana al interruptor (terminal fault) y falla lejos del interruptor (short – line fault)
- 1.25 para falla fuera de fase (out-of-phase)

$t_3$  está determinado a partir de  $u_c$  y el valor específico de la tasa de crecimiento es

$$RRRV = u_c / t_1. \quad (4.5)$$

## 4.2 VALORES ESTÁNDARES DEL TRV RELACIONADOS CON LOS VALORES DE CORTOCIRCUITO.

Los valores nominales del *TRV* para interruptores tripolares con voltaje inferior a los 100 kV, corresponde a la representación de dos parámetros. Los valores se encuentran especificados en las Norma IEC 62271-100. Para valores por encima de los 100 kV, son de cuatro parámetros. Los valores se encuentran indicados en la tabla 4.1, tomados de la norma antes referida.

Las tablas sólo indican los valores de la tasa de crecimiento (*RRRV*), tomado como  $u_c / t_1$  y  $u_1 / t_1$ , en dos y cuatro parámetros respectivamente el cual, junto al voltaje pico  $u_c$  del *TRV*, deben ser usados para especificar el *TRV*.



**Tabla 4.1.** Valores estándar del TRV, para valores superiores a 245 kV [19]

Voltaje Nominal $U_r$ kV	Prueba Obligatoria	Factor primer polo de despeje $k_{pp}$ p.u.	Factor de amplitud $k_{af}$ p.u.	Primer voltaje de referencia $U_1$ kV	Tiempo $t_1$ $\mu s$	Valor Pico del TRV $U_c$ kV	Tiempo $t_2$ $\mu s$	tiempo de retraso $t_d$ $\mu s$	Voltaje $U'$ kV	Tiempo $t'$ $\mu s$	RRRV $U_1/t_1$ kV/ $\mu s$
	Falla en Terminal	1,3	1,4	438	219	817	876	2	219	111	2
<b>550</b>	Falla de Línea Corta	1	1,4	337	168	629	672	2	168	86	2
	Fuera de Fase	2	1,25	674	438	1123	876-1752	2 – 44	337	263	1,54

### **4.3 CÁLCULO Y RESULTADOS**

Para el análisis de la envolvente de esfuerzos a los que estará sometido el interruptor se tomará en cuenta los *TRV's* más severos asociados con la interrupción de corriente de cortocircuito obtenidos durante la apertura de una falla en terminales del interruptor y la interrupción de una falla monofásica aplicada en un corto tramo de la Línea El Inga – Yaguachi.

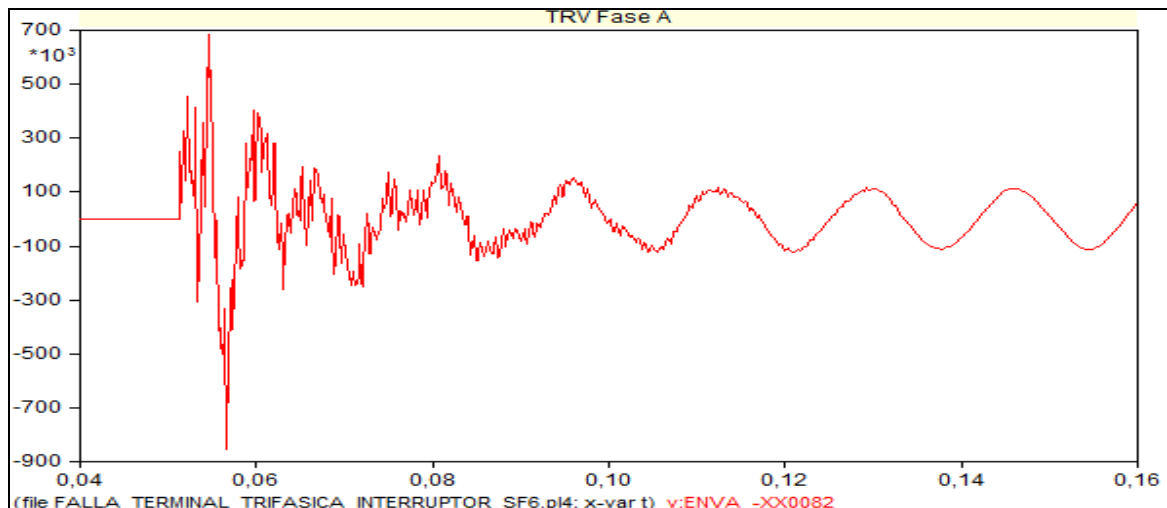
Con los voltajes obtenidos en el interruptor correspondientes a cada caso, se tiene la onda de voltaje pico y su tiempo transcurrido con los que se encuentran las diferentes envolventes de esfuerzos en estas ondas, lo cual servirá para determinar de cuántos parámetros (representación del *TRV*) está conformada la onda y poder calcular la tasa de crecimiento (*rate of rase*) a la que estará sometido el interruptor.

Las ondas consideradas para encontrar la tasa de crecimiento del *TRV*, son aquellas producidas por el despeje de una falla monofásica aplicadas en un corto tramo de la Línea El Inga – Yaguachi y las de apertura en una falla trifásica en terminales del interruptor en el lado de la salida de la línea en la S/E El Inga.

#### **4.3.1 TRAZADO DE LA ENVOLVENTE DE ESFUERZOS A LA CUAL ESTÁ SOMETIDA EL INTERRUPTOR**

##### **4.3.1.1 TRV debido a Falla Trifásica aplicada en los terminales de la Línea El Inga – Yaguachi**

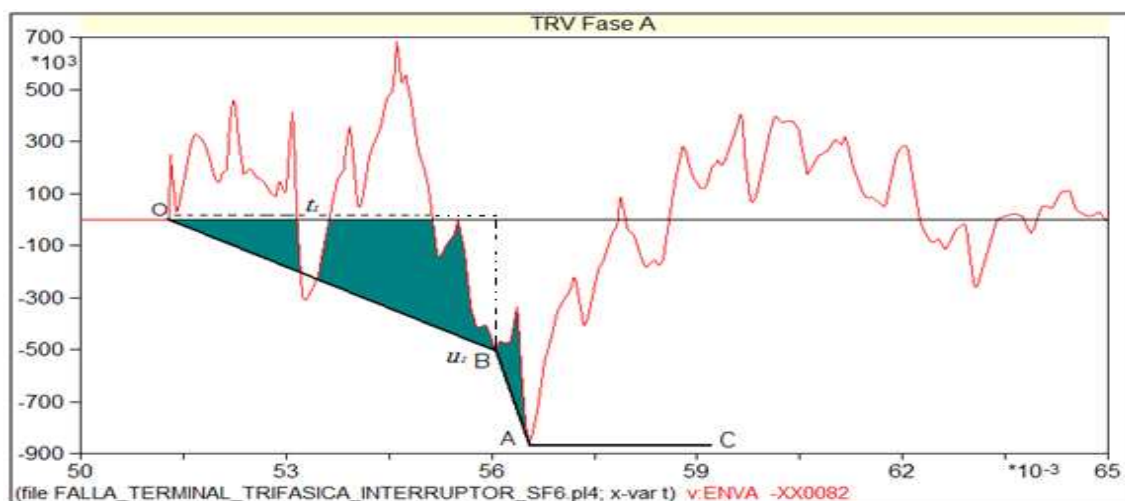
En la figura 4.4 se muestra el voltaje transitorio de recuperación en la fase A, obtenido en el corte de corriente debido a la falla trifásica aplicada en terminales del interruptor.



**Figura 4.4** Voltaje transitorio de recuperación en la fase A en la falla trifásica en terminales del interruptor.

El TRV en la fase A alcanza un voltaje pico ( $u_C$ ) de 851,68 kV en un tiempo de 0,00525 ms y un primer pico de voltaje de restablecimiento ( $u_I$ ) de 496,92 kV en un tiempo de 0,00477 ms a partir desde la iniciación del voltaje

Con la onda obtenida se procede a dibujar la envolvente de esfuerzos a los que está sometido el interruptor y establecer la representación del TRV. Tal como se muestra en la figura 4.5.



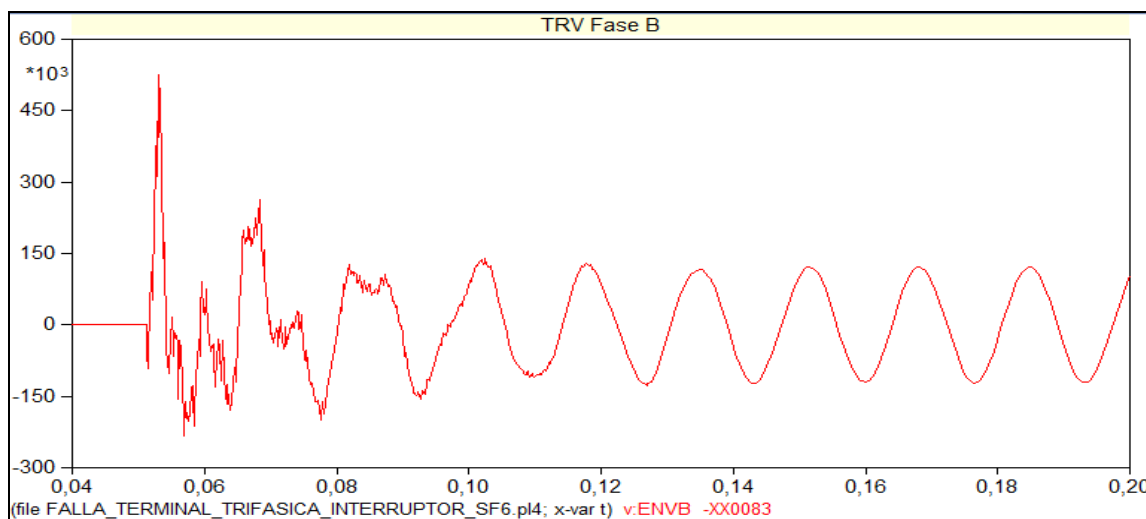
**Figura 4.5** Envolvente de esfuerzos en la fase A en falla trifásica en terminales del interruptor

Con la envolvente de esfuerzos encontrada se determina la representación del *TRV*, que en este caso es de cuatro parámetros. En base a estos resultados se puede encontrar la tasa de crecimiento de la siguiente manera:

$$RRRV = \frac{u_1}{t_1} = \frac{496,92 \text{ kV}}{4770 \mu s}$$

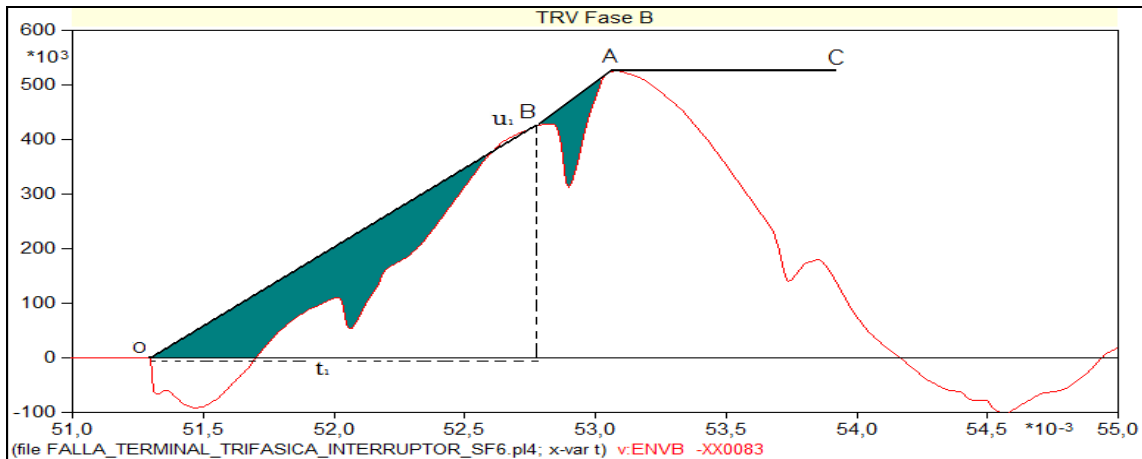
$$RRRV = 0,104 \frac{\text{kV}}{\mu s}$$

En la figura 4.6 se muestra que el *TRV* en la fase B alcanza un voltaje pico máximo de 524,75 kV en un tiempo de 0,0018 ms y un primer pico de voltaje de restablecimiento ( $u_1$ ) de 427,72 kV en un tiempo de 0,00153 ms a partir desde la iniciación del voltaje



**Figura 4.6** Voltaje transitorio de recuperación en la fase B en falla trifásica en terminales del interruptor

Con la onda obtenida se procede a dibujar la envolvente de esfuerzos a los que está sometido el interruptor en la fase B y establecer la representación del *TRV*. Tal como se muestra en la figura 4.7.



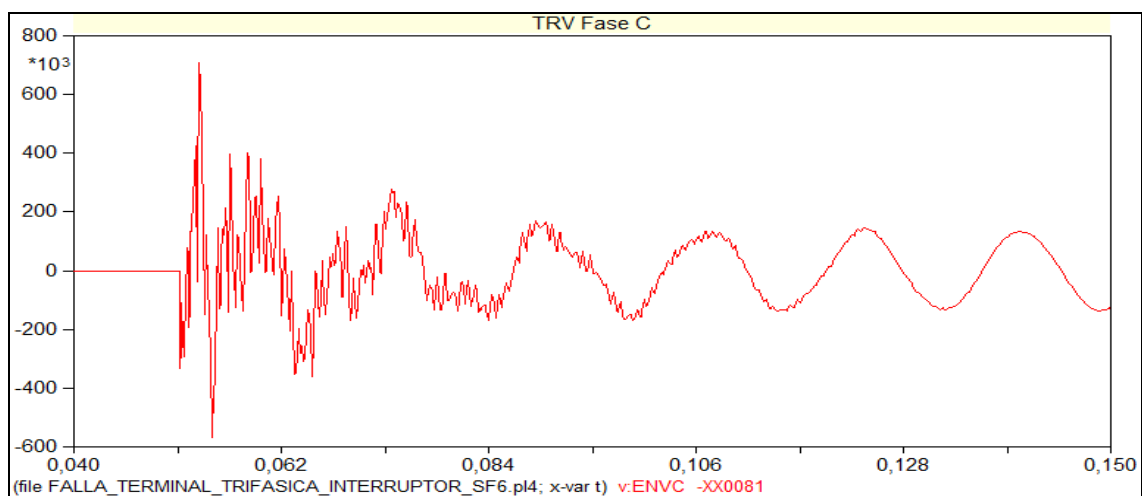
**Figura 4.7** Envolvente de esfuerzos en la fase B en falla trifásica en terminales del interruptor

Calculo de la tasa de crecimiento para la fase B:

$$RRRV = \frac{u_1}{t_1} = \frac{427,72 \text{ kV}}{1530 \mu\text{s}}$$

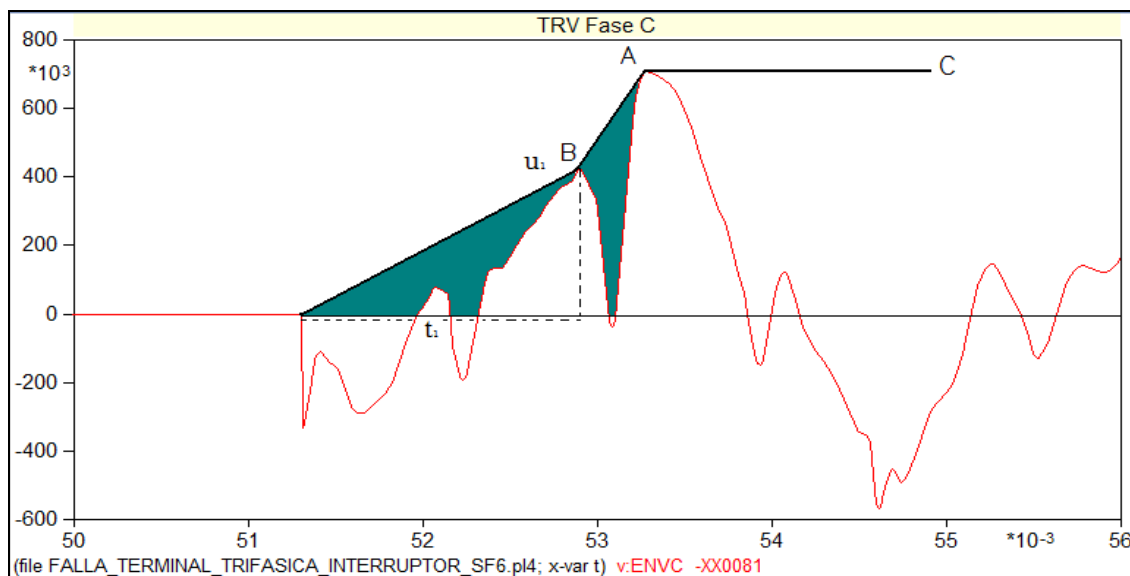
$$RRRV = 0,279 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}$$

En la Figura 4.8 se muestra que el TRV en la fase C alcanza un voltaje pico máximo de 706,19 kV en un tiempo de 0,0020 ms y un primer pico de voltaje de restablecimiento ( $u_1$ ) de 426,95 kV en un tiempo de 0,0016 ms a partir desde la iniciación del voltaje.



**Figura 4.8** Voltaje transitorio de recuperación en la fase C en falla trifásica en terminales del interruptor

Con la onda obtenida, se procede a dibujar la envolvente de esfuerzos a los que está sometido el interruptor en la fase C y establecer la representación del TRV. Tal como se muestra en la figura 4.9.



**Figura 4.9** Envolvente de esfuerzos en la fase C en falla trifásica en terminales del interruptor

Calculo de la tasa de crecimiento para la fase C:

$$RRRV = \frac{u_1}{t_1} = \frac{426,95 \text{ kV}}{1600 \mu s}$$

$$RRRV = 0,266 \frac{\text{kV}}{\mu s}$$

**Tabla 4.2.** Comparación de resultados con valores estándar

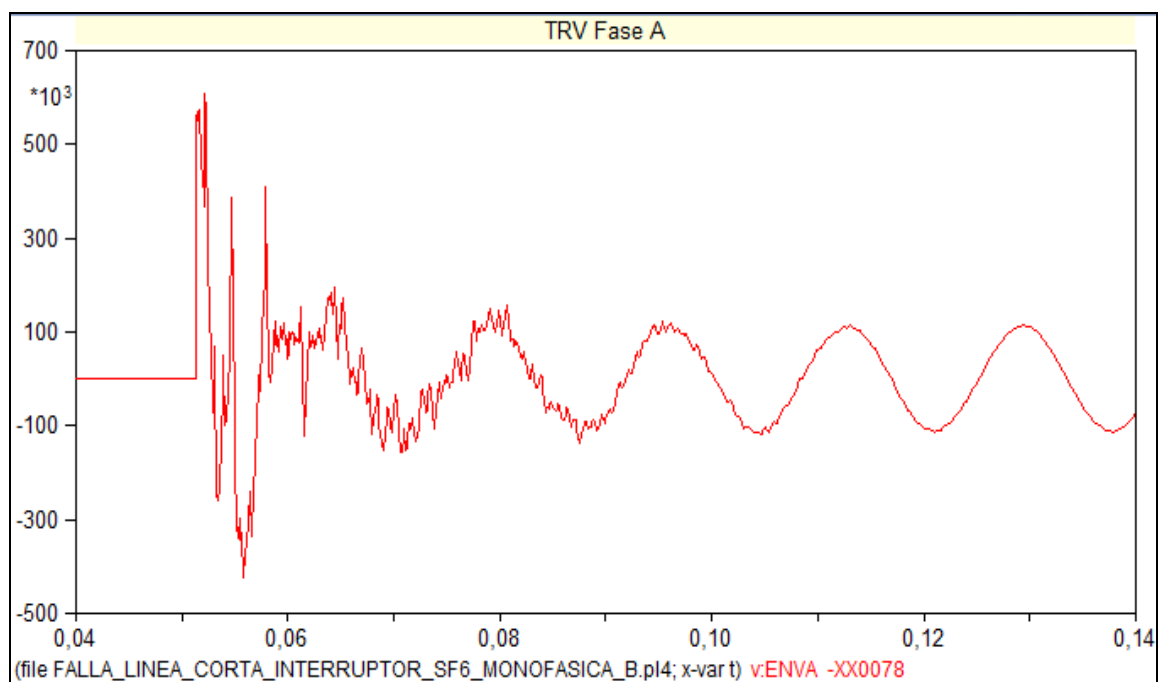
COMPARACIÓN DE LA NORMA CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS				
FALLA TRIFÁSICA EN LOS TERMINALES DEL INTERRUPTOR				
Tabla de Resultados				Norma IEC 62271-100
FASE	Voltaje $U_1$ kV	Tiempo $t_1$ $\mu s$	Rate of Rise $U_1/t_1$ kV/ $\mu s$	Rate of Rise $U_1/t_1$ kV/ $\mu s$
A	496,92	4770	0,104	2
B	427,72	1530	0,279	
C	426,95	1600	0,266	

En la tabla 4.2, se presenta un resumen de los resultados obtenidos comparados con el valor estándar de la norma según la cual, la tasa de crecimiento (Rate of Rise) en los interruptores no debe sobrepasar el valor indicado, que para este caso es 2.

Por lo tanto, al observar los valores calculados de acuerdo al caso de simulación con respecto a la tasa de crecimiento, cumplen con lo establecido por la Norma.

#### 4.3.1.2 TRV debido a Falla Monofásica aplicada en un corto tramo de la Línea El Inga – Yaguachi

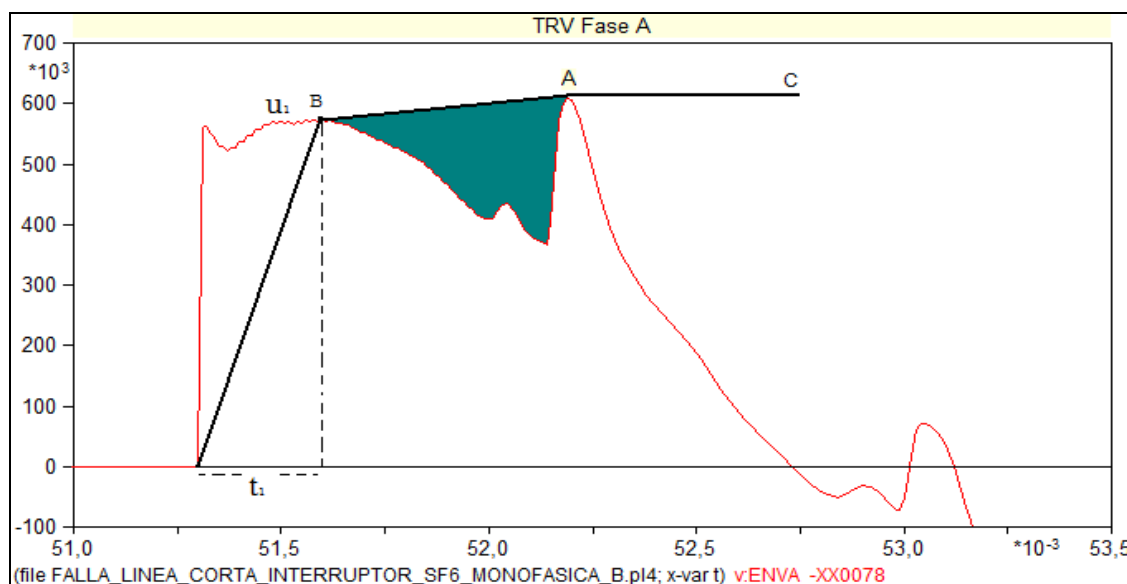
En la Figura 4.10 se muestra el voltaje transitorio de recuperación en la fase A, obtenido en el corte de corriente debido a la falla monofásica aplicada en un corto tramo de la Línea El Inga - Yaguachi.



**Figura 4.10** Voltaje transitorio de recuperación en la fase A, debido a falla monofásica en un corto tramo de la línea

El TRV en la fase A alcanza un voltaje pico ( $U_C$ ) de 608,62 kV en un tiempo de 0,000082 ms y un primer pico de voltaje de restablecimiento ( $U_I$ ) de 573,71 kV en un tiempo de 0,000477 ms a partir desde la iniciación del voltaje

Con la onda obtenida, se procede a dibujar la envolvente de esfuerzos a los que está sometido el interruptor en la fase A y establecer la representación del TRV. Tal como se muestra en la figura 4.11.



**Figura 14.11** Envolvente de esfuerzos en la fase A, debido a falla monofásica en un corto tramo de la línea

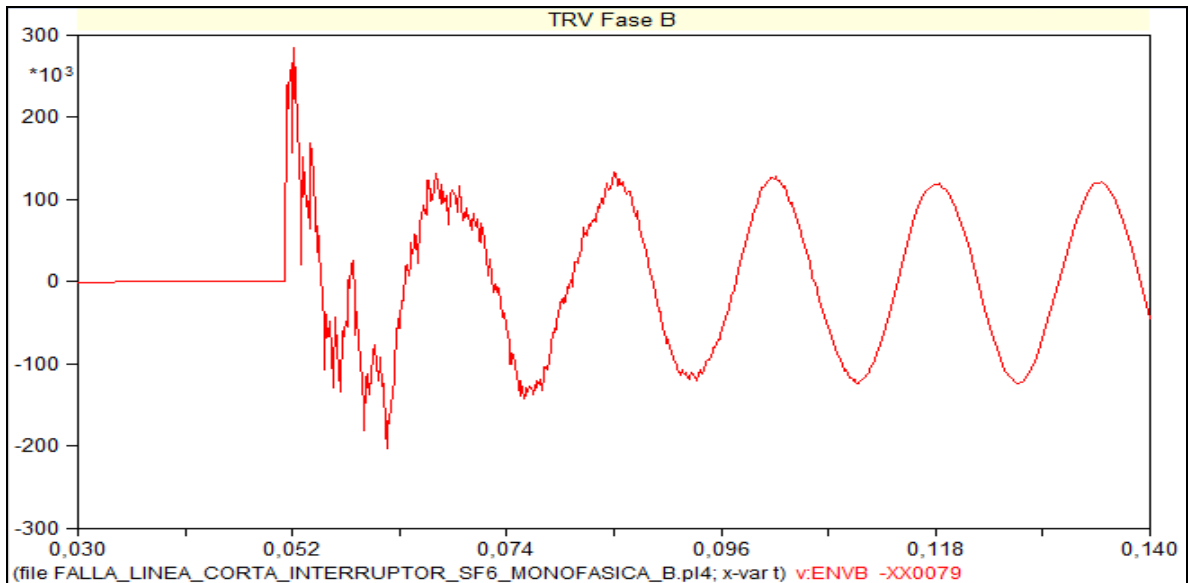
Con la envolvente de esfuerzos encontrada se determina la representación del TRV, que en este caso es de cuatro parámetros. En base a estos se puede encontrar la tasa de crecimiento de la siguiente manera:

$$RRRV = \frac{U_1}{t_1} = \frac{573,71 \text{ kV}}{477 \mu\text{s}}$$

$$RRRV = 1.202 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}$$

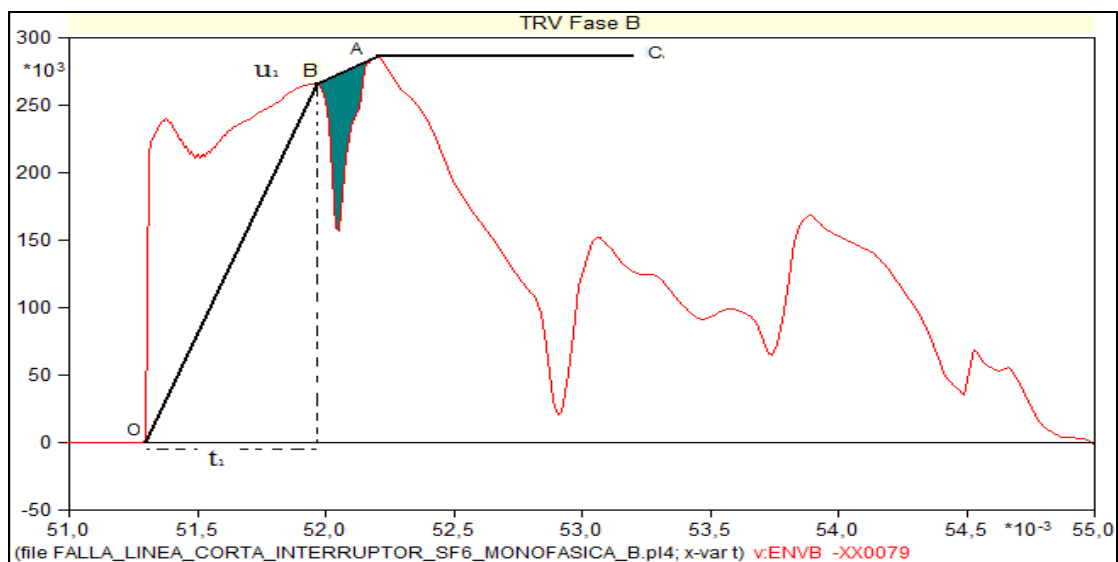
En la figura 4.12 se muestra que el TRV en la fase B alcanza un voltaje pico máximo de 285,48 kV en un tiempo de 0,00091 ms y un primer pico de voltaje de restablecimiento ( $U_1$ ) de 265,59 kV en un tiempo de 0,00066 ms a partir desde la iniciación del voltaje.





**Figura 4.12** Voltaje transitorio de recuperación en la fase B, debido a falla monofásica en un corto tramo de la línea

Con la onda obtenida, se procede a dibujar la envolvente de esfuerzos a los que está sometido el interruptor en la fase B y establecer la representación del TRV. Tal como se muestra en la figura 4.13.



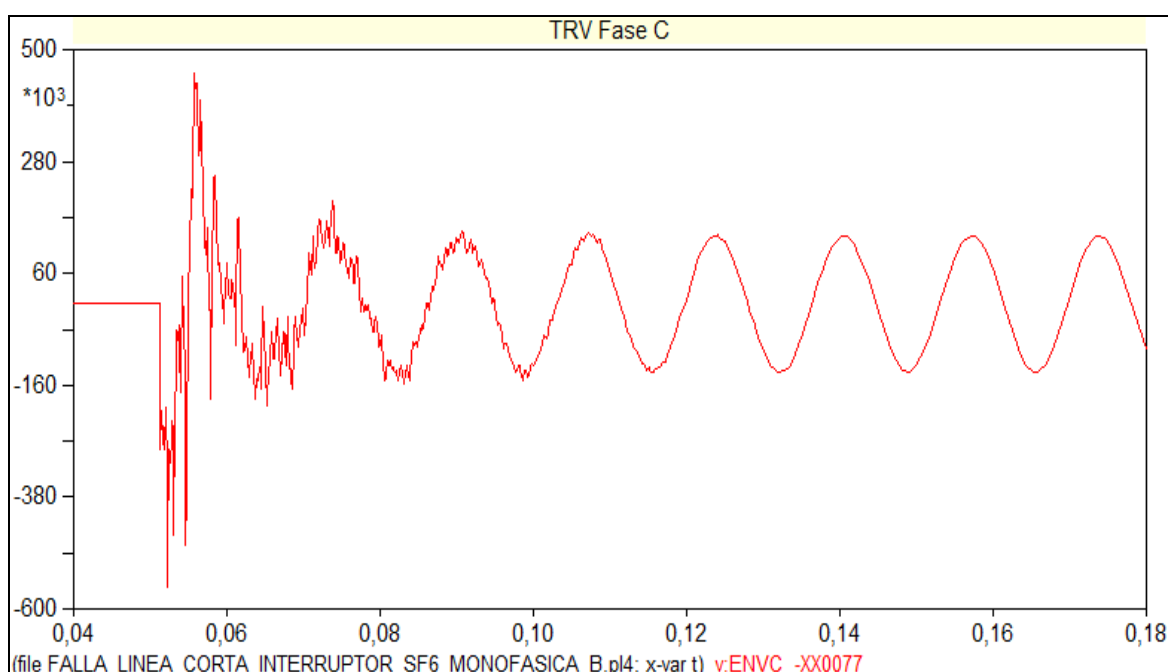
**Figura 4.13** Envolvente de esfuerzos en la fase B, debido a falla monofásica en un corto tramo de la línea

Calculo de la tasa de crecimiento para la fase B.

$$RRRV = \frac{U_1}{t_1} = \frac{265,59 \text{ kV}}{660 \mu\text{s}}$$

$$RRRV = 0.402 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}$$

En la figura 4.14 se muestra que el TRV en la fase C alcanza un voltaje pico máximo de 557,92 kV en un tiempo de 0,00099 ms y un primer pico de voltaje de restablecimiento ( $U_1$ ) de 284,98 kV en un tiempo de 0.00054 ms a partir desde la iniciación del voltaje.



**Figura 4.14** Voltaje transitorio de recuperación en la fase C, debido a falla monofásica en un corto tramo de la línea

Con la onda obtenida, se procede a dibujar la envolvente de esfuerzos a los que está sometido el interruptor en la fase C y establecer la representación del TRV. Tal como se muestra en la figura 4.15.

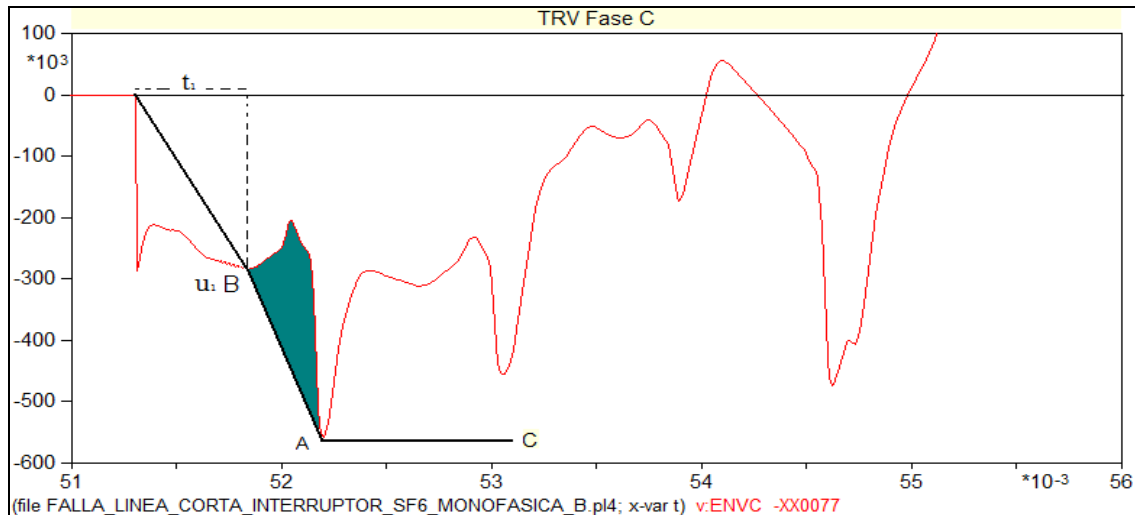


Figura 4.15 Envoltorio de esfuerzos en la fase C, debido a falla monofásica en un corto tramo de la línea

En base a la figura 4.15 se calcula de la tasa de crecimiento para la fase C.

$$RRRV = \frac{U_1}{t_1} = \frac{284,98 \text{ kV}}{540 \mu\text{s}}$$

$$RRRV = 0.527 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}$$

Tabla 4.3. Comparación de resultados con valores estándar

COMPARACIÓN DE LA NORMA CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS				
FALLA MONOFÁSICA EN LINEA CORTA				
Tabla de Resultados				Norma IEC 62271-100
FASE	Voltaje $U_1$ kV	Tiempo $t_1$ $u_s$	Rate of Rise $U_1/t_1$ kV/ $u_s$	Rate of Rise $U_1/t_1$ kV/ $u_s$
A	573,71	477	1,202	2
B	265,59	660	0,404	
C	284,98	540	0,529	

En la tabla 4.3, se presenta un resumen de los resultados obtenidos versus el valor estándar de la norma, según la norma la tasa de crecimiento en los interruptores no debe sobrepasar el valor dado que para este caso es 2.

Por lo tanto al observar los valores calculados de acuerdo al caso de simulación con respecto a la tasa de crecimiento, cumplen con lo establecido por la Norma.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- En este trabajo se analizó el comportamiento del interruptor de potencia que utiliza la tecnología del gas SF<sub>6</sub>, incorporando los modelos de arco eléctrico propuestos por Mayr y Cassie. Se llevó a cabo la simulación del interruptor en la línea El Inga – Yaguachi en la S/E El Inga, que forma parte del Plan de Expansión 2010 – 2020 a nivel de 500 kV para el Sistema Nacional de Transmisión. Con las simulaciones realizadas se obtuvieron resultados de los transitorios producidos en diferentes condiciones de operación, proporcionando valores más cercanos a la realidad, estos valores se toman en cuenta para la selección del disyuntor considerando estudios del *TRV*.
- La modelación del interruptor de potencia consiste en el modelado de caja negra que considera al arco eléctrico como un bipolo, la simulación del interruptor se realiza a partir de la señal de corriente de excitación del sistema, mediante las soluciones de las ecuaciones de Mayr y Cassie consideradas. Se obtiene una respuesta que es la resistencia del arco eléctrico en función del tiempo; éste modelo al ser comparada con el interruptor ideal, presenta las mismas tendencias en las formas de onda del *TRV*, mostrando detalles más pronunciados.
- Durante el análisis comparativo de los diferentes eventos de simulación se muestra que el interruptor ideal simplemente hace la operación de apertura sin tomar en cuenta el fenómeno del arco eléctrico ni el medio de extinción, además el modelo ideal requiere que la corriente tenga un valor de cero para poder operar, con el modelo de arco en SF<sub>6</sub> implementado es distinto ya que

realiza la operación casi de manera instantánea sin importar el nivel de corriente que se registre al momento de la orden de apertura.

- En los casos simulados el *TRV* más elevado se tiene en la desconexión de la línea El Inga – Yaguachi en vacío, con un valor pico de 1164,2 kV en bornes del interruptor y con una corriente de interrupción de 1275,5 A.
- Los *TRVs* obtenidos en la simulación de fallas trifásicas o fallas simétricas, aplicadas en terminales del interruptor y en un corto tramo de la línea no presentan mayor incremento; sin embargo, son las que limitan la capacidad de interrupción del disyuntor. Los valores obtenidos son de 851,68 y 814,61 kV respectivamente.
- Las corrientes registradas en los casos de simulación de fallas trifásicas son las corrientes de interrupción más elevadas, con valores de 22,442 kA para la falla aplicada en terminales del interruptor y 20,992 kA en la interrupción de la falla aplicada en un corto tramo de la línea. El nivel de corriente de interrupción puede ser definido entonces por la corriente en la falla aplicada en terminales del interruptor.
- En la simulación de la falla monofásica aplicada en un corto tramo de la línea se obtuvo un *TRV* de 608,62 kV y una corriente de interrupción de 18,429 kA, aunque estos valores no resultan tan severos, son los que probablemente se tendrán en caso de ocurrir una falla monofásica, este tipo de falla en la realidad se producen con más frecuencia.
- Con los resultados obtenidos se realizó el cálculo y la comparación de la *RRRV* con las especificadas en la Norma IEC 62271-100, siendo estos valores los que determinan la envoltura de esfuerzos dieléctricos del interruptor. Entre los valores obtenidos se tiene *RRRVs* que van desde 0,104 a 1,202 kV/  $\mu$ s los cuales se ajustan a los valores de la Norma que especifica un valor límite de 2 kV/  $\mu$ s.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Debido a que los valores obtenidos en este proyecto son únicamente del estudio de la operación de apertura del interruptor se recomienda realizar estudios de energización y recierres del interruptor.
- En cada una línea de transmisión de 500 kV contempladas en este proyecto se recomienda realizar el estudio del comportamiento del *TRV*, ya que en este trabajo solo se consideró el tramo El Inga \_ Yaguachi.
- Se recomienda realizar el estudio de sobrevoltajes incluyendo el modelo de interruptor propuesto en todo el sistema implementado a nivel de 500 kV.
- Con los datos obtenidos en este trabajo se podría realizar una simulación digital de la envoltura de esfuerzos a los cuales está sometido el interruptor, proporcionando así, resultados más consistentes de la *RRRV* obtenidos en este trabajo.
- El modelo del interruptor propuesto es recomendable para la interrupción de corrientes inductivas, por lo tanto se puede realizar conexión / desconexión de transformadores y banco de reactores.
- Para la selección del disyuntor tomando en cuenta el *TRV*, se recomienda considerar el estudio realizado en este proyecto, puesto que los valores y las formas de ondas obtenidas son más detalladas que del interruptor ideal.