



REPÚBLICA DEL ECUADOR
Escuela Politécnica Nacional
" E 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

DETERMINACIÓN DE MÉTODOS DE CONTROL DEL VOLTAJE TRANSITORIO DE RESTABLECIMIENTO DURANTE LA DESENERGIZACIÓN DE REACTORES CONECTADOS EN BARRAS DE 500 kV

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

SANTIAGO DAVID PILICITA VELOZ

santiago.pilicita@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR. -ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

fabian.perez@epn.edu.ec

Quito, mayo 2019

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Santiago David Pilicita Veloz, bajo mi supervisión.

DIRECTOR
DR. -ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Santiago David Pilicita Veloz, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis 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.

SANTIAGO DAVID PILICITA VELOZ

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis seres queridos, a mi madre Inés, a mi padre Luis (+), a mi padrastro Cesar, por mostrarme el camino hacia la superación

A mis hermanos José, Carlos, Anita y a mi sobrina Ariana, siempre me dieron su apoyo en cada instante de mi vida, los amo mucho.

A Jennifer gracias por haber llegado a mi vida.

A todas las personas que en el transcurso de mi vida me supieron brindar un consejo y guiarme por el camino correcto.

"No tengas miedo, que yo estoy contigo; no te desanimes, que yo soy tu Dios. Yo soy quien te da fuerzas, y siempre te ayudaré; siempre te sostendré con mi justiciera mano derecha."
Isaías 41:10

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento a Dios, por darme la vida, dándome fuerza y animo en cada momento, por bendecirme con mi familia y mis amigos.

A mis padres Inés, Luis (+) y mi padrastro Cesar, por el sacrificio que han hecho por mí, con el fin de cumplir mis metas, gracias por su amor, por su tiempo, por su paciencia, por sus consejos, sin ustedes no lo hubiera logrado.

A mis hermanos José, Carlos y Anita, por darme la guía por el camino del bien, por cada consejo que me supieron dar durante el transcurso de mi vida, gracias por apoyarme en todo lo que he deseado y ayudarme a conseguirlo.

A Jennifer, por estar a mi lado, brindarme su amistad, su amor y su paciencia, gracias por permitirme compartir este momento a tu lado.

Al Dr. Fabián Pérez, por sus consejos, su paciencia y su direccionamiento, sin los cuales el presente trabajo no habría sido posible.

Al Msc. Luis Dután, por su amistad, su ayuda incondicional, sus consejos que gracias a su experiencia y basto conocimiento, fueron un pilar fundamental para el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos, ustedes hicieron que mi vida en la politécnica, sea la mejor etapa de mi vida, gracias por su amistad incondicional, ustedes son los mejores amigos que Dios pudo haberme dado.

III

IV

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	1
Objetivo General	1
Objetivos específicos	2
1.2 Alcance	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Interruptor de Potencia	3
Clasificación de los interruptores de potencia	4
2.2. Reactor de Barra	7
2.3. El Arco Eléctrico	8
Proceso de Ionización	8
Arco eléctrico en el interruptor de potencia	9
Características del arco eléctrico	10
Proceso de interrupción del arco	10
2.4. Voltaje Transitorio de Restablecimiento	12
Tipos de corriente bajo condiciones normales de operación	13
Estándares para análisis de TRV	16
Consideraciones para el análisis de TRV	17

V

2.5. Métodos de control de TRV	20
Capacidad del interruptor	20
Pararrayos	24
Capacitores Grading	25
2.6. Modelos del Arco Eléctrico	26
Interruptor Ideal	26
Modelo de Cassie	27
Modelo de Mayr	28
Modelo combinado de Cassie-Mayr	28
3. IMPLEMENTACIÓN DEL CASO DE SIMULACIÓN	30
3.1. Característica de la bahía de reactor de barra	30
Valores estimados de inductancia y capacitancia para equipos varios	30
Fuentes equivalentes para demanda máxima y demanda mínima	32
Diagrama unifilar para bahía de reactor de barra	33
3.2. Implementación del caso de estudio en ATP	33
Equivalente de red del sistema	33
Fuentes de voltaje	34
Modelo de Línea/Cable	34
Modelación de los TC y TP	35
Reactores de barra	35
Interruptores de potencia	36
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
4.1. Consideraciones previas a la simulación	42
4.2. Operación de apertura del reactor en condición de demanda máxima	43
4.3. Aplicación de métodos de control	50
Aplicación de curvas de soportabilidad de interruptores de potencia	50

VI

Aplicación de pararrayos para control de TRV	59
Aplicación de capacitores grading para control de TRV	67
Aplicación de mando sincronizado para la apertura del interruptor	76
4.4. Operación de apertura del reactor en condición de demanda mínima.....	80
Aplicación de curvas de soportabilidad de interruptores de potencia, para control de TRV.....	83
Aplicación de pararrayos para control de TRV	84
Aplicación de capacitores grading para control de TRV	85
Aplicación de mando sincronizado para la apertura del interruptor	87
4.5. Discusión de resultados	89
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	92
5.1. CONCLUSIONES	92
5.2. RECOMENDACIONES	93
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
7. ANEXOS.....	97
ANEXO I.....	98
ANEXO II.....	100
ANEXO III.....	102
ANEXO IV	105
ORDEN DE EMPASTADO	115

ABSTRACT

The present technical study determines the mitigation methods to control high values of TRV that present themselves during the operation of opening bar reactors at a voltage level of 500 kV, through the implementation of a general case taken from the technical bibliography, in the ATP DRAW software.

To realize the analysis, prior to the determination of control methods, a detailed simulation of a typical bay reactor is required, with all the constitutive elements that can affect the TRV response, whereas the implementation of models for the electronic arc in the circuit breaker terminals, they may permit the discovery of the dynamic performance of the arc.

With the help of the simulation one determines the chopping current level that are more severe during the opening operation.

From the data obtained from the TRV in the different cases of studies, one proceeds to detail its values and waveforms, considering that these data are those which determine the methods required to apply for its control.

Finally the applied methods are based on the suppression of the peaks of TRV, whereas the rate of rise of recovery voltage, that allow one to have a quantitative idea of TRV and mitigate its effects, as it were: the reignition of the arc, staggering of voltage; that for consequent damages

KEYWORDS: Circuit breaker, current chopping, electric arc, shunt reactor, transient recovery voltage, the rate of rise of recovery voltage.

RESUMEN

El presente estudio técnico analiza y determina los métodos de mitigación para control de altos valores de Voltaje Transitorio de Restablecimiento (TRV por sus siglas en inglés) que se presentan durante la operación de apertura de reactores de barra a un nivel de voltaje de 500 kV, mediante la implementación de un caso general tomado de la bibliografía técnica, en el software ATP Draw.

Para realizar el análisis, previo a la determinación de métodos de control, se requiere de una modelación detallada de una bahía típica de reactor de barra, con todos los elementos constitutivos que pueden afectar a la respuesta del TRV, así como la implementación de modelos para el arco eléctrico en los terminales del interruptor, que permitan describir el comportamiento dinámico del arco.

Luego a través de simulación se determinan los niveles de corriente de corte que son más severos durante la operación de apertura.

De los datos obtenidos del TRV en los diferentes casos de estudios, se procede a detallar sus valores y formas de onda, considerando que estos datos son los que determinan los métodos que se requiere aplicar para su control.

Finalmente los métodos aplicados se basan en la supresión de los picos del TRV, así como la tasa de crecimiento del voltaje de recuperación, que permitan tener una idea cuantitativa del TRV y mitigar sus efectos, como son: la reignición del arco y el escalonamiento de voltaje; que por consiguiente provoca daños en los equipos asociados al reactor.

PALABRAS CLAVE: Arco eléctrico, corriente de corte, interruptor de potencia, reactor de barra, tasa de crecimiento del voltaje de recuperación y voltaje transitorio de restablecimiento.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el control pasivo de voltaje en los sistemas de transmisión, se lo realiza a través de elementos de compensación (reactores y capacitores) y considerando la implementación de sistemas de transmisión que funcionan a niveles de extra alto voltaje, la operación de los reactores de barra de las subestaciones merece un análisis particular. Generalmente la compensación se da para controlar altos niveles de voltaje en operación normal por medio de reactores.

Para el dimensionamiento del reactor y los equipos asociados en las bahías de reactores de barra, el propietario de estas instalaciones se basa en lo establecido en normas internacionales y ejecuta estudios eléctricos utilizando modelos disponibles por defecto en diversos programas computacionales. El estudio más importante hace referencia a la maniobra de apertura del reactor de barra donde se presentan problemas originados principalmente por el Voltaje Transitorio de Restablecimiento (TRV por sus siglas en inglés), el cual aparece a los terminales del interruptor de potencia mientras se realizan dichas maniobras, que en muchos casos son las causantes del reencendido del arco eléctrico.

Con este trabajo se busca ejecutar estudios transitorios para sistemas de extra alto voltaje en lo referente a la desconexión de los reactores de barra haciendo uso de una modelación adecuada del sistema bajo estudio y determinar métodos de control para valores altos de TRV. Las consecuencias de no realizar este tipo de estudios, podrían involucrar la ocurrencia de inconvenientes operativos tales como: el reencendido del arco eléctrico en el interruptor, daño en el interruptor así como en el reactor y demás equipos de bahía, luego de lo cual se produciría el disparo de la barra con los problemas de operación del sistema que ello conlleva.

1.1 Objetivos

Objetivo General

- Analizar el voltaje transitorio de restablecimiento que se produce durante la desconexión de reactores conectados en barras de 500 kV y su atenuación mediante la aplicación de métodos de control.

Objetivos específicos

- Implementar el modelo dinámico del interruptor basado en las ecuaciones de Cassie y Mayr que permita analizar el comportamiento del TRV ocasionado por el reencendido del arco eléctrico a sus terminales.
- Realizar la modelación en ATP, de una bahía de reactor de barra a 500 kV y sus elementos asociados, empleando el modelo seleccionado de interruptor de potencia implementado.
- Analizar el comportamiento del voltaje transitorio de restablecimiento, ante maniobras de apertura de reactor de barra en diferentes estados de demanda.
- Establecer los mejores métodos de control del TRV originado, con el fin de mitigar los efectos sobre el interruptor de potencia, el reactor de barra y los demás equipos de la bahía.

1.2 Alcance

El proyecto de titulación considera como primer punto una revisión y análisis de los modelos propuestos en la literatura técnica del arco eléctrico en interruptores de potencia. Dicha tarea estará enfocada en aquellos modelos que faciliten la simulación de altos valores de TRV ocasionados por el reencendido del arco eléctrico en los terminales de los interruptores, posteriormente se seleccionará el modelo adecuado para ser implementado dentro de la simulación en ATP.

Para las simulaciones se considerará un sistema de prueba de 500 kV, el cual será modelado en ATP en condiciones de demanda máxima y demanda mínima y cuya información esté disponible en la bibliografía técnica.

La modelación será llevada a cabo con la utilización del lenguaje de programación Models y permitirá la simulación transitoria del arco eléctrico y del TRV ante maniobras de apertura de un reactor conectado en barras de 500 kV. De esta manera, se obtendrán resultados confiables para su respectivo análisis y se podrán plantear posibles métodos de control en el caso de que el TRV originado sobrepase la capacidad del interruptor.

2

Clasificación de los interruptores de potencia

El interruptor de potencia se puede clasificar de acuerdo a los siguientes criterios: características externas, medio de la interrupción de la corriente o extinción del arco eléctrico y mecanismo de operación.

a) Características Externas

a. Tanque vivo

Este tipo de interruptor tiene la característica de que la parte mecánica además del compartimiento de porcelana que contiene la cámara de extinción es instalada sobre un aislador soporte, por lo tanto el potencial del tanque es distinto de cero, en la Figura 2.1 se muestra ejemplos de este tipo de interruptores [5].



Figura 2.1 Interruptores de tanque vivo [5].

b. Tanque muerto

En este tipo de interruptor el tanque y todos sus accesorios asociados, están con un potencial igual a cero, es decir el tanque del interruptor se encuentra aterrizado, en la Figura 2.2 se muestra un ejemplo de este tipo de interruptor [5].



Figura 2.2 Interruptor de tanque muerto [5].

4

2. MARCO TEÓRICO

En el siguiente capítulo se presenta la base teórica que fundamenta el presente trabajo de titulación, compuesto de 6 partes: la primera trata acerca de la teoría de los interruptores de potencia y el arco eléctrico, la segunda parte referente a reactores de barra, la tercera parte trata acerca del arco eléctrico, la cuarta parte es sobre los sobrevoltajes que se presentan debido a la operación del interruptor de potencia, la quinta presenta algunos métodos de control de TRV y la última parte habla acerca de los modelos de arco eléctrico en interruptores de potencia.

2.1. Interruptor de Potencia

El interruptor de potencia o también conocido como disyuntor de potencia, es uno de los equipos más importantes dentro de los sistemas de transmisión, ya que es el encargado de interrumpir la corriente que fluye a través del mismo ya sea en caso de fallas del sistema o condiciones normales de operación, en donde su operación puede ser manual o automática, con el fin de brindar protección tanto para las personas como para los equipos. Cabe señalar que hoy en día su aplicación se extiende a niveles de voltaje de operación hasta de 800 kV, mientras que a nivel experimental los voltajes sobrepasan los 1200 kV [1]-[3].

Por lo tanto estos dispositivos son probados en los laboratorios de alta potencia en donde son sometidos a diferentes pruebas según las necesidades, condiciones de operación y basándose en normas internacionales [4], con el fin de garantizar su funcionamiento bajo cualquier condición de operación, ya que el principal fenómeno eléctrico presentado en estos equipos es el arco eléctrico originado por la separación brusca de los electrodos en un medio aislante donde circula una corriente muy alta, que puede ser de naturaleza resistiva, capacitiva e inductiva, por lo que debe poseer algunas características especiales, como [2]:

- Nivel de aislamiento.
- Capacidad interruptora de corriente de falla.
- Corriente nominal de operación.
- Nivel nominal de voltaje.
- Tiempo y ciclos de operación, etc.

3

b) Medio de interrupción de la corriente

El medio de interrupción de la corriente se refiere a la manera de extinción del arco eléctrico que se presenta al separarse mecánicamente los contactos del interruptor [6].

a. Interruptores de aceite

Este tipo de interruptores fueron de los primeros en emplearse dentro de las subestaciones debido a su capacidad de interrumpir intensidades elevadas de corriente al igual que voltajes elevados. Al presentarse un arco eléctrico el aceite entra en contacto con él y se vaporiza haciendo que se forme rápidamente una burbuja de gas la cual está compuesta en su mayoría por hidrógeno; el hidrógeno se caracteriza por ser un excelente medio de extinción y refrigerante, además de que su constante de tiempo de deionización es baja, debido a todas estas condiciones favorables hacen que el aceite sea un medio adecuado para la extinción del arco [2].

Constructivamente consta de un recipiente de acero lleno de aceite en el cual se encuentran ubicados dos contactos en serie como se muestra en la Figura 2.3.

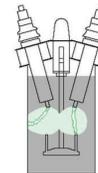


Figura 2.3 Proceso de interrupción del arco en un interruptor de aceite [2].

b. Interruptores de aire

En este tipo de interruptores el apagado del arco eléctrico es por la acción de un chorro de aire comprimido que barre el aire ionizado del arco, como se muestra en la Figura 2.4, por lo que es usado para niveles de voltaje desde 72,5 kV hasta los 138 kV [2], [6].

Sin embargo este tipo de interruptor presenta ciertas desventajas debido a su alto costo de instalación y mantenimiento, además del fuerte ruido que se produce debido a su operación. Estos interruptores dejaron de ser utilizados en su mayoría debido a la aparición de los interruptores de hexafluoruro de azufre [6].

5

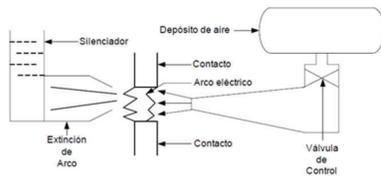


Figura 2.4 Diagrama esquemático de un interruptor de aire comprimido [6].

c. Interruptores de hexafluoruro de azufre (SF₆)

Este tipo de interruptor es el más usado en la actualidad ya que ha demostrado tener un excelente aislamiento; es un compuesto muy estable e inerte hasta los 500 °C, además de que no es inflamable y no reacciona con el agua ni con otros elementos como plásticos y metales. Sin embargo una vez que la temperatura excede el límite el SF₆ comienza a degradarse [7]. El presente trabajo de titulación hace un especial enfoque en este tipo de interruptores ya que éste será utilizado en el sistema bajo estudio.

Este tipo de material ha ofrecido una serie de ventajas como: reducir la distancias eléctricas, proteger al equipo del deterioro climático, ocupa menos espacio a pesar de que el SF₆ se descompone en otros subproductos, no pierde sus características aislantes ya que estos subproductos siguen siendo buenos aislantes cuando reaccionan en presencia del arco eléctrico, como se muestra en la Figura 2.5 [7]. Debido a estos motivos la tecnología del SF₆ ha desplazado al interruptor de aire comprimido y se ha vuelto en una de las tecnologías más usada.



Figura 2.5 Interruptor de auto soplado en SF₆ [7].

c) Según el mecanismo de operación

a. Accionamiento por resortes

Este tipo de accionamiento es posible mediante el almacenamiento de energía en resortes, tanto para la apertura como para el cierre del interruptor, debido a esto presenta una gran ventaja ya que al efectuarse la operación de cierre del interruptor se carga el resorte de apertura, garantizando siempre el disparo del interruptor, tal como se muestra en la Figura 2.6 [6].

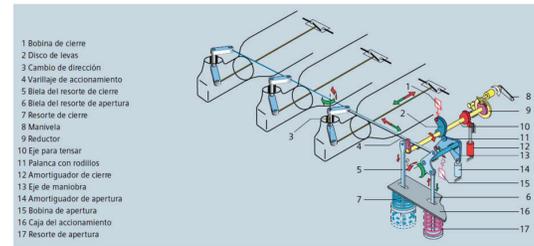


Figura 2.6 Esquema del sistema de accionamiento del interruptor por resortes [8].

b. Accionamiento neumático

En este tipo de accionamiento la energía se almacena en forma de aire comprimido, frecuentemente usados en interruptores de aire comprimido con el objetivo de utilizar el aire presurizado utilizado por la extinción del arco, además de que su uso se extiende a los interruptores de aceite y de SF₆ [9].

2.2. Reactor de Barra

Los reactores de barra son usados para compensar niveles bajos de voltaje, específicamente para controlar el aumento de voltaje en un circuito abierto o por la desconexión de grandes cargas.

Son comúnmente usados en subestaciones eléctricas que funcionan a un nivel de extra alto voltaje [10].

Es decir el objetivo principal para el uso de reactores es al compensación reactiva, como un medio económico para controlar el nivel de voltaje y contribuir a la estabilidad transitoria [11].

2.3. El Arco Eléctrico

Proceso de Ionización

La corriente de arco incrementa la temperatura del material aislante por lo que es capaz de ionizar el material aislante (gas) para mantener su circulación.

La iniciación del arco eléctrico y la emisión de electrones libres, son ocasionados por:

- Aumento de la temperatura debido a emisión termoiónica.
- Incremento de voltaje en el cátodo, provoca la emisión de campo.

Debido a las condiciones existentes, durante el proceso de separación de los contactos del interruptor provocan uno o ambos procesos mencionados anteriormente [12].

Cuando se inician el proceso de separación de los contactos en el interruptor, la presión y el área disminuyen, produciendo un incremento en la resistencia y a la vez de temperatura.

Si existe un incremento de temperatura, es más que suficiente para ocasionar la ionización térmica. Hay casos en que la resistencia es de un valor muy pequeño, pero a la vez hay un incremento de corriente extremadamente alto, en el orden de los cientos o miles de amperios, ocasionando una caída de voltaje muy pequeña [12].

Al ser la distancia de separación entre los contactos muy pequeña la variación de voltaje es grande, siendo esta variación lo suficiente para provocar la emisión de electrones del cátodo provocando una ionización por impacto.

Al iniciarse el arco entre los contactos se liberan una cantidad suficiente de electrones del cátodo hacia el ánodo provocando la ionización del medio, el cual libera electrones permitiendo mantener el arco aun después de haber culminado la emisión de campo. Como consecuencia cada electrón emitido se multiplica en número. El proceso de difusión y recombinación continua respondiendo los electrones perdidos al ánodo, por lo tanto si el flujo de corriente es alto, el arco se establece con una temperatura suficiente como para convertirse en la fuente de conductividad eléctrica, como se muestra en la Figura 2.7 [13].

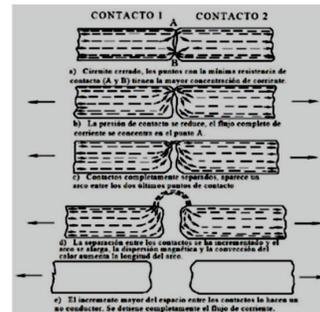


Figura 2.7 Proceso de interrupción, las flechas grandes muestran la dirección del movimiento de los contactos y las flechas pequeñas la dirección del flujo de corriente [2].

Arco eléctrico en el interruptor de potencia

De manera general el arco es representado como una resistencia conectada entre los contactos o electrodos. Debido a esta resistencia existe la presencia de una caída de voltaje que está conformada por 3 componentes: la caída de voltaje anódica, la caída de voltaje catódica y la caída de voltaje de canal plasmático [14].

Por lo tanto puede ser dividido en 3 regiones: la columna, la región catódica y la región anódica, como se muestra en la Figura 2.8.

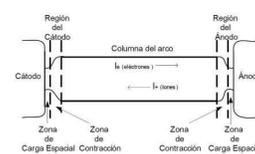


Figura 2.8 Esquema de las 3 regiones en una columna de arco uniforme [2].

La caída de voltaje en la región catódica está en función del material del cátodo, la caída de voltaje en la región anódica está en función de la geometría.

Características del arco eléctrico

Para la operación de apertura, como un elemento más que conforma el circuito, el arco se comporta como una resistencia no lineal con el voltaje del arco en fase con la corriente de arco.

El voltaje de arco puede ser considerado como una función de la corriente, sin embargo su forma y valor dependen de los efectos de enfriamiento y de los métodos de deionización que se utilice para la extinción del arco. También el voltaje de arco es afectado por otros factores como la longitud y las propiedades del medio circulante o este caso el medio aislante, especialmente por sus características de transferencia de calor [2].

La relación entre el voltaje y la corriente de arco es conocida como característica del arco, cuando los cambios en la corriente toma lugar muy lentamente se denomina estática y cuando los cambios son muy rápidos se denomina dinámica, como se muestra en la Figura 2.9 [15].

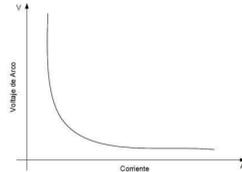


Figura 2.9 Característica estática de la columna de arco.

Como se puede observar, el arco tiene características VA de decaimiento, por lo cual el voltaje del arco no es una función del voltaje del sistema, sino que es determinada por la potencia requerida para sostener el arco [2].

Proceso de interrupción del arco

A través de medios mecánicos se realiza la operación de apertura o recierre de los contactos de un interruptor. Cuando los contactos se separan, se forma entre ellos un entrehierro, donde existe la presencia de un elemento interruptivo o dieléctrico como el SF₆, vacío, aceite, etc. Es en este elemento dieléctrico donde se forma el arco eléctrico, debido a la corriente que fluye a través de sus contactos ya que la corriente pierde su trayectoria original como se muestra en la Figura 2.5; es por eso que para extinguir el arco

10

RRRV (por sus siglas en inglés The rate of rise of the recovery voltage), en caso de que el interruptor no alcance sus condiciones para extinguir el arco en el primer cruce por cero posterior al inicio de la separación de los contactos del interruptor, se origina el restablecimiento del arco, ver Figura 2.10 [3], [17].

La posibilidad de la ocurrencia o no del restablecimiento, depende de la combinación de un proceso de intercambio térmico y de la diferencia de voltaje que existe entre los contactos, ver Figura 2.11 [2], [15].

Por lo tanto existen dos motivos por el cual puede darse el restablecimiento del arco:

1. Por efecto de la ionización residual y las altas temperaturas de la zona, el medio es capaz de enfriar al arco, causando la reactivación de la corriente post arco [2].
2. Cuando el voltaje (TRV), supera la capacidad del medio aislante ocasionando una descarga brusca y su posterior colapso.

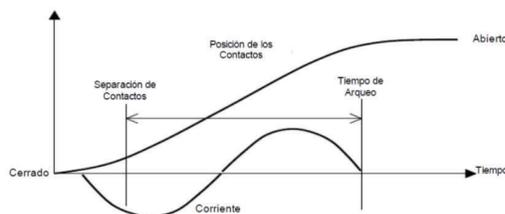


Figura 2.11 Interrupción de la corriente y separación de los contactos [2], [15].

Los dos tipos de restablecimiento se originan dentro de los primeros microsegundos, posterior al cruce por cero de la corriente, sin embargo dependiendo del tiempo posterior a la interrupción de la corriente, el restablecimiento puede ser considerado como reencendido o reignición del arco, si el fenómeno ocurre en un tiempo superior al cuarto de ciclo, es conocido como reencendido del arco y si ocurre en un tiempo inferior al cuarto de ciclo es conocido como reignición del arco [18].

2.4. Voltaje Transitorio de Restablecimiento

Los transitorios son causados por operaciones de conmutación. Cuando los contactos de un interruptor comienzan a separarse, se desarrolla un voltaje transitorio a través de los mismos. Este voltaje, es conocido como TRV, el cual está presente cuando la corriente de

12

se debe disminuir la conductividad de esta trayectoria y así deje de fluir corriente a través del entrehierro [15].

a) Operación de apertura

Básicamente esta operación se realiza para desconectar o interrumpir alguna parte del sistema, mediante la operación de apertura del sistema de accionamiento, estando cerrado el interruptor hace que los contactos se separen, como ya se mencionó anteriormente dicha separación hace que en los contactos se genere el arco eléctrico ya que el espacio está altamente ionizado. La interrupción de corriente consiste en que este espacio altamente ionizado sea convertido en un buen aislante con la finalidad de que la corriente deje fluir a través de él. A medida que la corriente senoidal se aproxima al cruce por cero, el elemento aislante ionizado pierde rápidamente la temperatura, con lo cual recupera sus características aislantes, según se aprecia en la Figura 2.10. En esta última condición, cuando los contactos se abren y la corriente se aproxima al cruce por cero, es en donde se desarrolla un voltaje transitorio a través de los contactos, dicho voltaje transitorio es conocido como TRV por sus siglas en inglés (Transient Recovery Voltage) y en donde su duración está en el orden de los milisegundos. Se hace especial énfasis en la operación de apertura ya que la misma es objeto de estudio de este trabajo de titulación [15], [16].

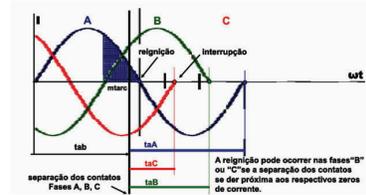


Figura 2.10 Operación de apertura controlada de un banco de reactores trifásicos [15].

Para que la operación de apertura sea exitosa, se debe satisfacer dos condiciones.

1. El arco debe enfriarse, es decir cuando la corriente se aproxime al cruce por cero.
2. Después del cruce por cero, el interruptor debe ser capaz de soportar el TRV, que aparece entre sus contactos.

Una apertura exitosa es dependiente de la tasa de disminución de corriente di/dt y la tasa de incremento de voltaje de recuperación después del cruce por cero dV/dt , conocido como

11

arco se extingue en un cruce por el cero natural y en los sistemas reales su duración es del orden de milisegundos [16].

Para obtener la forma de onda TRV, el análisis de la respuesta transitoria puede ser suficiente, ya que este voltaje es cero durante el estado estacionario; es decir, antes de la operación de apertura. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el voltaje de recuperación constará de dos componentes: uno transitorio, que ocurre inmediatamente cuando los polos se separan generando la corriente de arco, la cual tiene una tasa di/dt , si esta tasa es menor a un valor entonces la corriente de arco se extingue en el siguiente cruce por cero que encuentre, y un componente de estado estacionario, que es el voltaje que queda después de que el transitorio se apaga. La forma de onda real de la oscilación de voltaje está determinada por los parámetros del sistema de potencia (componentes del circuito). Su tasa de aumento y amplitud son de vital importancia para una operación exitosa del interruptor. Si la velocidad de recuperación del espacio de contacto en el instante del cruce por cero es más rápido que el RRRV, la interrupción tiene éxito en la región térmica (es decir, los primeros 4-8 μ s de la fase de recuperación). Sin embargo, si el RRRV es más rápido que la recuperación de la brecha, entonces la falla ocurrirá en la región térmica o en la región dieléctrica [16], [18].

Una buena comprensión de los fenómenos transitorios asociados con las operaciones de interruptores de circuito en los sistemas de potencia ha conducido a prácticas de prueba mejoradas y ha resultado en un dispositivo de conmutación más confiable. Los valores característicos recomendados para la simulación del TRV se fijan en los estándares [18] y [19], esto debido a que el análisis matemático del TRV resulta muy complejo, por lo tanto una simulación preferiblemente en el dominio de la frecuencia permitirá obtener una reproducción fiel de un caso real. Para comprender los diferentes requisitos aplicables a los interruptores de circuito, se analizarán los casos más frecuentes e importantes de interrupción de corriente. Las condiciones de conmutación para el análisis de TRV se han dividido en dos grupos que corresponden a la interrupción de la corriente bajo falla y las condiciones normales de operación. Cabe recalcar que el análisis será hecho para el tipo de interrupción bajo condiciones normales de operación, es decir la operación de apertura [17].

Tipos de corriente bajo condiciones normales de operación

Bajo condiciones normales de operación, existen tres tipos de corriente, resistiva, capacitiva e inductiva, el TRV tiene origen por cualquiera de estos 3 tipos de corriente (en sistemas reales son muchos más complejos) [16].

13

En la Figura 2.12, se muestran los 3 casos de conmutación de un interruptor y las diferentes formas de onda de TRV para cada uno de los tipos de circuitos.

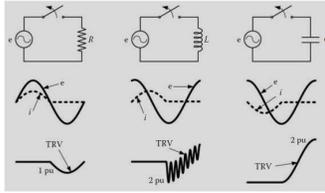


Figura 2.12 Voltaje transitorio de restablecimiento, para los casos resistivo, inductivo y capacitivo [16].

La interrupción de una corriente resistiva genera TRV que son mucho más fáciles de manejar debido a la capacidad de recuperación del aislamiento del interruptor, mientras que la inductiva y capacitiva es más complicada de manejar, ya que el voltaje de recuperación es del orden de 2 p.u. en comparación a un caso resistivo, y aún más alto en sistemas trifásicos. La conmutación inductiva puede generar un TRV de altas frecuencias, generalmente en el orden de los kHz, ya que la interrupción de la corriente para sistemas reales se hace prematuramente antes del cruce por cero, esta amplitud de corriente donde ocurre la interrupción se conoce como corriente de corte, ver Figura 2.13 (I_{ch} : current chopping) y puede causar un TRV severo [16]–[18].

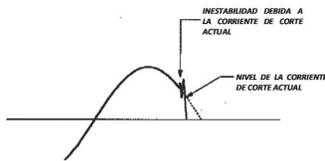


Figura 2.13 Corriente a través del interruptor [18].

a) Corrientes de origen inductivo

La operación de apertura del interruptor para la desenergización de reactores de barra, se enmarca en la interrupción de pequeñas corrientes inductivas. Durante la apertura del

Cuando este proceso se repite varias veces, debido a reinicios de alta frecuencia, el aumento de voltaje continúa con un aumento rápido de los mismos y es conocido como escalonamiento de voltaje, ver Figura 2.16. Las oscilaciones de alta frecuencia se rigen por los parámetros eléctricos del circuito afectado (frecuencia natural del circuito), la configuración del circuito y el diseño del interruptor, y dan como resultado un cruce por cero antes de la corriente real de frecuencia de potencia cero.

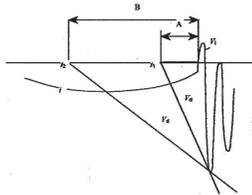


Figura 2.16 Limite de resistencia dieléctrica especificada del interruptor vs TRV [18].

Estándares para análisis de TRV

Dado que el TRV tiene su origen basado en el tipo de circuito (resistivo, capacitivo e inductivo) y también depende si se origina debido a una falla o a maniobras de apertura. Para cada una de estas instancias se definen estándares y procedimiento para su estudio y análisis, el presente trabajo hace especial enfoque en el estándar IEEE Std C37.015-2009 (Revision of IEEE Std C37.015-1993), el cual define las características básicas del TRV debido a la conmutación de reactores, considerando únicamente banco de reactores monofásicos aterrizados.

El estándar [18] considera todos los aspectos mencionados anteriormente, como lo es: la corriente de corte (current chopping), altas frecuencias debido a la frecuencia natural del circuito, el circuito básico para análisis de TRV (ver Figura 4.1), valores estándar, escalonamiento de voltaje, etc. además de métodos de control de TRV.

Estos métodos de control, mitigan el TRV que se da en los terminales del interruptor y sus posteriores reinicios (restablecimiento del arco eléctrico), en caso de no lograr una interrupción exitosa del circuito, por el efecto de la corriente de corte, la cual agrega energía a la oscilación del TRV, el nivel de corte determina la magnitud del sobrevoltaje, como se observa en la Figura 2.16 y Figura 2.17.

interruptor generalmente las corrientes inductivas no son considerablemente altas. Por lo tanto, se dan los efectos mencionados anteriormente, para el caso del reactor se da el fenómeno de corriente de corte, debida a la inestabilidad del arco eléctrico, ver Figura 2.13.

Si la corriente se interrumpe en el cruce por cero, la interrupción es normal (interruptor ideal) y los TRV generalmente están dentro de los valores especificados. Sin embargo, si ocurre una interrupción prematura (unos milisegundos antes del cruce por cero), debido a la corriente de corte, la interrupción será anormal (interruptor real) y puede causar reignición o reencendido del arco y como consecuencia un sobrevoltaje de alta frecuencia, como se muestra en la Figura 2.14 y Figura 2.15 [16].

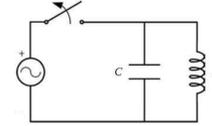


Figura 2.14 Circuito equivalente, operación de apertura del interruptor [16].

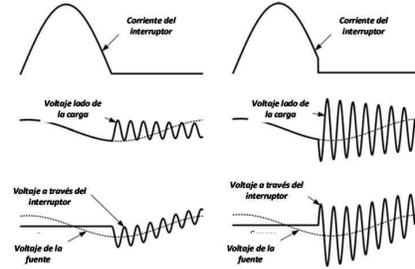


Figura 2.15 Formas de onda de la corriente a través del interruptor, del voltaje de lado de la carga y el voltaje a través del interruptor. (b) Interruptor Ideal (c) Interruptor real [16].

Cuando el interruptor corta la corriente en su cruce por cero o muy cercano a él, el voltaje aumenta casi instantáneamente, si el sobrevoltaje excede la resistencia dieléctrica especificada del interruptor automático, se produce una reignición o reencendido del arco.

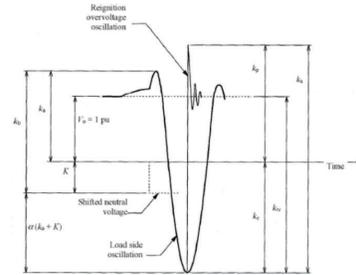


Figura 2.17 Caso general para la corriente de corte y posibles reigniciones del TRV [17].

Además del estándar [18], también se dispone del estándar IEEE Std C37.011-2011 (Revision of IEEE Std C37.011-2005), el cual es una guía para el estudio de TRV, en interruptores de potencia, aquí se pueden encontrar los tipos de TRV y sobre todo el tipo de interruptor que debe emplearse para que no exceda la soportabilidad dieléctrica, sin embargo la mayoría de la guía presentada en el estándar [19], se basa en fallas eléctricas que se dan dentro del sistema eléctrico de potencia (SEP).

Por lo tanto la corrientes que se dan durante una falla en comparación a las corrientes originadas por una maniobra de apertura, son muy elevadas por el orden de los kA, y las corrientes debidas a maniobras son solamente decenas de amperios.

Consideraciones para el análisis de TRV

Las características del TRV de un caso real a menudo suelen ser muy complejos y puede ser necesaria una simulación por computadora para la evaluación. En muchos casos, la característica de TRV predominante puede representarse mediante una respuesta exponencial, oscilatoria o triangular [19].

a) TRV Exponencial

El TRV exponencial normalmente ocurre cuando al menos un transformador y una línea se encuentran en el lado sin falla del interruptor del circuito y se produce el despeje de una falla trifásica en los terminales del interruptor, ver Figura 2.18.

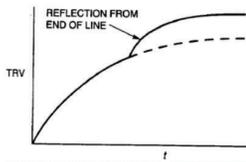


Figura 2.18 TRV Exponencial [19].

b) TRV Oscilatorio

Se produce cuando una falla está limitada por un transformador o un reactor en serie y no hay una línea de transmisión o impedancia de sobrevoltaje del cable para proporcionar amortiguación, ver Figura 2.19.

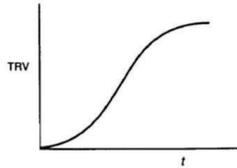


Figura 2.19 TRV Oscilatorio [19].

c) TRV Triangular

La impedancia de sobrevoltaje de la línea de transmisión Z, determina la naturaleza del TRV. La tasa de aumento del TRV en forma de diente de sierra es generalmente más alta que la experimentada con los TRV exponenciales u oscilatorios, Figura 2.20.

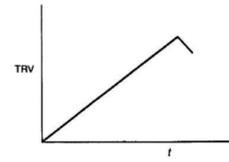
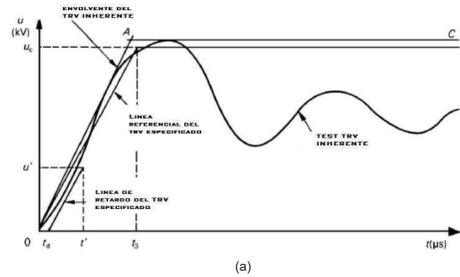


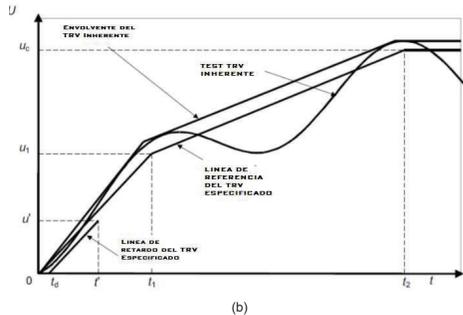
Figura 2.20 TRV Triangular [19].

Las envolventes de dos parámetros y cuatro parámetros, ilustradas en la Figura 2.21, se han introducido en IEEE Std C37.04b para facilitar la comparación entre un TRV obtenido durante la prueba y un TRV especificado.

De manera similar, es posible comparar una capacidad de TRV especificada por el interruptor automático y un TRV de sistema obtenido por simulación.



(a)



(b)

Figura 2.21 Envolvente de TRV (a) Envolvente de 2 parámetros (b) Envolvente de 4 parámetros [20].

Si la forma de onda del TRV obtenido durante la prueba, está por debajo de la envolvente (sea esta de 2 o 4 parámetros), el interruptor será capaz de soportar el TRV y se evita la reignición o reencendido del arco. Sin embargo si el TRV excede las envolventes, entonces se tendrá una reignición o reencendido del arco.

2.5. Métodos de control de TRV

El TRV puede tomar valores que pueden afectar severamente al sistema, causando daños sobre los equipos, por lo tanto su mitigación es de vital importancia.

En la literatura técnica se plantean algunas opciones para su control, como el aumento de la capacidad dieléctrica del interruptor (soportabilidad del interruptor), instalación de un pararrayos, la instalación de capacitores, entre otras, los cuales se describen a continuación.

Capacidad del interruptor

Por lo general, los estudios TRV deben llevarse a cabo para determinar si un TRV del sistema está cubierto por la capacidad TRV del interruptor de circuito demostrado por las pruebas de tipo, ya sea cuando se instalen interruptores automáticos nuevos o después de un cambio en el sistema[19].

Las clasificaciones TRV definen un límite soportado. Un TRV de circuito que excede este límite a la corriente de cortocircuito nominal, o el límite modificado para corrientes distintas a la nominal, es superior a las capacidades nominales o relacionadas del interruptor de circuito. Si se excede el límite de resistencia del interruptor automático, se debe usar un interruptor automático con una clasificación de voltaje más alta o un interruptor automático con mayor clasificación de corriente de cortocircuito, ver Figura 2.22 [19].

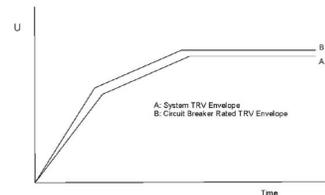


Figura 2.22 Envolvente de 4 parámetros del TRV y el interruptor [19].

Para definir este tipo de envolventes del interruptor, se plantea dos formas, las envolventes de 2 parámetros y de 4 parámetros.

Sin embargo para aplicaciones que tengan que ver con la conmutación del interruptor bajo condiciones normales de operación, las corrientes son pequeñas en comparación a corrientes de falla, por lo tanto para mitigar el TRV con la capacidad de soportabilidad del interruptor basta que la envolvente del TRV o la forma de onda del TRV, este bajo la envolvente definida o establecida por fabrica del interruptor, en caso de que no cumpla este requisito, se debe recurrir a un interruptor con mayor capacidad dieléctrica [19].

Las envolventes del TRV para 2 parámetros tal como se muestra en la Figura 2.21 están definidos de la siguiente manera:

u_c : Voltaje de Referencia (Valor pico de TRV)

t_2 : Tiempo de crecimiento de u_c en microsegundos.

Las envolventes del TRV para 4 parámetros están definidos de la siguiente manera:

u_1 : Primer Voltaje de Referencia (Valor pico de TRV)

t_2 : Tiempo de crecimiento de u_1 en microsegundos.

u_c : Segundo Voltaje de Referencia (Valor pico de TRV)

t_2 : Tiempo de crecimiento de u_c en microsegundos.

Estos parámetros han sido definidos por el estándar IEEE Std C37.06-2009, para interruptores por debajo de los 100 kV y para los interruptores que funcionan a un nivel de voltaje por encima de 100 kV.

a) Clasificación de soportabilidad de interruptores

Las capacidades TRV clasificadas y relacionadas del interruptor están definidas por los parámetros dados en IEEE Std C37.06.

Con base en la evaluación de muchas configuraciones reales del sistema, los estándares asumen, para interruptores que funcionan a un nivel de voltaje de 100 kV o superiores, que tengan corrientes de falla superiores al 30% de su valor nominal darán lugar a una característica TRV que tiene una envolvente de cuatro parámetros definida por cuatro parámetros (u_1 , t_1 , u_c , t_2). Tal como se muestra Figura 2.21 b.

Para corrientes de falla para interruptores de 100 kV o superiores que estén entre 10% y 30% de su valor nominal, y para todas las corrientes de falla para interruptores por debajo de 100 kV, la norma asume una envolvente TRV descrita por dos parámetros (u_c , t_3), como se ilustra en Figura 2.21 a.

Para interruptores clasificados a menos de 100 kV, la envolvente TRV se describe mediante dos parámetros en todo el rango de corriente.

b) Especificaciones de interruptores

En caso de que se requiera el aumento de la capacidad dieléctrica del interruptor, estos deben ser especificados adecuadamente para su instalación y posterior funcionamiento.

El estándar [18], define de manera general las especificaciones necesarias para interruptores a ser instalados en bahía de reactores, como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Especificaciones del Interruptor para reactores de barra [18].

Especificación	Descripción
Capacidad Dieléctrica	Las cantidades que deben indicarse, según corresponda, son el voltaje máximo del sistema, el nivel de voltaje soportado en la frecuencia de potencia y los niveles de voltaje soportado por los relámpagos y los impulsos de conmutación. Estos valores deben ser al menos iguales a los de cualquier interruptor automático aplicado a al voltaje del sistema aplicable.
Capacidad corriente nominal de Interrupción	Para interruptores automáticos utilizados para conmutar reactores de derivación conectados a líneas de transmisión, la

Pararrayos

Los pararrayos o descargadores de sobrevoltaje de óxido metálico, pueden ser utilizados para limitar la magnitud de TRV a través del interruptor a valores que estén dentro de un rango aceptable.

Los descargadores de sobrevoltaje se pueden instalar de fase – tierra en uno o ambos lados de los interruptores automáticos.

Sin embargo, dependiendo de la clasificación requerida y los niveles de protección de los descargadores para el control de TRV, esto generalmente requiere estudios apropiados con la simulación adecuada de los mismos. Este método puede proporcionar una solución más económica que aumentar la capacidad de interrupción para resistir un mayor TRV [21].

a) Protección de reactores de barra

Los reactores shunt normalmente están protegidos por pararrayos. Se recomienda un margen de protección entre el nivel máximo de protección del descargador y el nivel de aislamiento del reactor [18].

Los pararrayos de óxido metálico se clasifican en función de la capacidad de absorber una cantidad determinada de energía y, posteriormente, de soportar la aplicación inmediata de un determinado valor de sobrevoltaje a 60 Hz (un sobrevoltaje temporal) durante 10 s. En donde el pararrayos es una resistencia no lineal dependiente de voltaje y funciona al limitar el voltaje a su característica de voltaje-corriente (es decir, esencialmente corta el voltaje).

En caso de que el interruptor corte una corriente suficiente como para producir un sobrevoltaje de corte (pico de sobrevoltaje de recuperación) que exceda la característica voltaje-corriente del pararrayos, el pararrayos conducirá la corriente, pero solo mientras el voltaje exceda la característica del pararrayos. El pararrayos descargará, por lo tanto, una fracción de la energía del lado de la carga y el voltaje del lado de la carga continuará oscilando. La posibilidad de una reignición no se elimina, pero se reduce porque el pico de voltaje de recuperación es menor que su valor esperado (sin aplicar ningún método de mitigación), como se muestra en la Figura 2.23.

Especificación	Descripción
	capacidad de interrupción de fallas puede no ser un requisito, pero la capacidad de corriente de corto tiempo y pico de soportabilidad de los interruptores de circuito debe ser igual a los aplicables a los interruptores que proporcionan protección de corriente de falla para la zona del reactor de derivación.
Capacidad del Reactor Shunt	Para los reactores su especificación debe establecerse en términos de MVA y voltaje nominal.
Corriente a través del Reactor Shunt	La corriente del reactor de derivación que debe interrumpirse es correspondiente a la clasificación del reactor de derivación.
Características del circuito del lado de la carga	Aquí se debe especificar cuál es la inductancia L del Reactor y la capacidad total del circuito LC, en donde LC es la capacidad aportada por el reactor shunt y los demás equipos asociados.
Limitación de sobrevoltajes	Se debe especificar el límite de sobrevoltaje máximo de supresión, se recomienda usar un k_v de 2 p.u. para voltajes superiores a 60 kV y 2.5 p.u. para voltajes inferiores a 60 kV.
Conexión a tierra	Para la conexión a tierra, debe indicarse si está conectado directamente a tierra, sin conexión a tierra o a tierra a través de un reactor para el neutro. Para el caso donde el reactor está conectado a tierra a través de un reactor para el neutro, la inductancia del reactor también debe ser establecida.
Tiempo de operación	Los tiempos de interrupción de diferentes dispositivos variarán dependiendo principalmente del tiempo de apertura mecánica. A menos que haya una razón particular para hacerlo, no se debe especificar un tiempo de interrupción, pero puede desear establecer alguna limitación con respecto a la simultaneidad entre polos e interruptores para interruptores automáticos
Resistencia mecánica	Dado que los reactores de derivación se cambian con frecuencia, se debe establecer el número de operaciones de apertura cerrada necesarias antes del mantenimiento. Un interruptor que tenga una capacidad de resistencia mecánica extendida es la elección adecuada para esta aplicación.

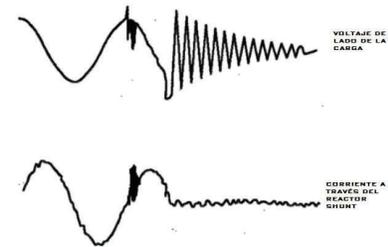


Figura 2.23 Interrupción de la corriente del reactor, se muestra la supresión del pico de sobrevoltaje por el pararrayos [18].

Si el sobrevoltaje de pico de supresión es menor que la característica del pararrayos, el pararrayos no funcionará, pero puede operar para eventuales sobrevoltajes de reignición más altas (escalonamiento de voltaje) y limitar el voltaje pico a pico a un máximo del doble del nivel de protección [21].

Capacitores Grading

El estándar [19], menciona que la instalación de un capacitor entre los terminales del interruptor o entre fase – tierra en el lado de la carga, permitirá tener los siguientes efectos:

- Disminuye la frecuencia de oscilación y el RRRV del TRV del lado de la carga.
- Aumenta el tiempo de retraso del TRV del lado de la carga.

Históricamente se usaron resistencias en los interruptores de chorro de aire para reducir el RRRV y facilitar la interrupción. Como los interruptores automáticos SF6 son más sensibles a la parte inicial del TRV (primeros microsegundos), el uso de condensadores adicionales ha demostrado ser más eficiente.

Para que el capacitor tenga efecto sobre el TRV, debe ser instalado cerca del terminal del lado de la carga del interruptor, en caso de que el capacitor este instalado demasiado lejos del interruptor el tiempo de retardo del voltaje de recuperación disminuye y la amplitud del primer salto de voltaje aumenta de modo que el capacitor no será efectivo para reducir el TRV.

Los capacitores conectados entre los terminales del interruptor han demostrado ser más eficiente al momento de mitigar el TRV en comparación al capacitor conectado entre fase – tierra. Se necesita una menor capacitancia para obtener una reducción dada del RRRV si está conectado entre los terminales de un polo en lugar de fase – tierra.

2.6. Modelos del Arco Eléctrico

Como se menciona en la sección 2.3. El Arco Eléctrico, el TRV, en la mayoría de ocasiones, su análisis suele ser muy complejo; por lo tanto, requiere de simulación en computadora para determinar sus características, efectos y posteriores soluciones. El uso de un modelo ideal de interruptor, no permitirá una apreciación a los efectos antes mencionados del TRV y principalmente sobre el arco eléctrico, por lo tanto el emplear un modelo matemático del arco eléctrico permitirá visualizar de manera muy aproximada al fenómeno real que sucede durante la apertura del reactor de barra.

Los modelos del arco eléctrico se dividen en 2 categorías.

- Modelos físicos
- Modelo Tipo Caja Negra

Los modelos físicos se basan en un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales, que permiten describir las características físicas del arco en base a los principios de momento, energía y conservación de masa. Mientras que los modelos tipo caja negra, emplean una ecuación diferencial simple para describir el comportamiento del arco eléctrico.

Interruptor Ideal

Generalmente el modelo ideal de un interruptor dentro de un software de simulación cualquiera, es representado mediante la utilización de resistencias, para aproximar el cierre y apertura del interruptor, en donde se tiene una resistencia variable, la cual toma un valor muy pequeño durante el cierre y un valor extremadamente alto durante la apertura, tal como se muestra en la Figura 2.24.

La ventaja de usar este tipo de modelo, es en cuanto al uso de datos, si el sistema a modelar dentro del software es muy extenso (barras, generadores, transformadores, reactores, capacitores, etc.) es recomendable el uso de un interruptor ideal, debido a la cantidad de datos que se generan durante la simulación, si se llega a emplear el modelo dinámico del arco, la información a generarse sería tan grande provocando un desborde de memoria y largos tiempos de simulación [3].

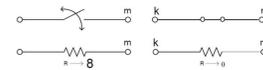


Figura 2.24 Esquema del interruptor ideal [12].

Modelo de Cassie

Este tipo de modelo asume un canal de arco con temperatura constante, densidad de corriente e intensidad de campo eléctrico. Los cambios de la conductancia del arco resultan de los cambios en la sección transversal del arco; la eliminación de energía se obtiene por convección (ver Figura 2.25) [2].

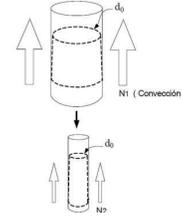


Figura 2.25 Canal de arco eléctrico según Cassie [2].

Este modelo viene dado por la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\left(\frac{v}{v_0} \right)^2 - 1 \right) = \frac{1}{\tau_c} \left(\left(\frac{1}{v_0 g_c} \right)^2 - 1 \right)$$

Ecuación 2.1 Ecuación diferencial del modelo de Cassie [2].

En donde v_0 es el voltaje inicial del arco en estado estable, v es el voltaje, g es la conductancia y τ_c es la constante de tiempo y está dada por la siguiente expresión $\tau_c = \frac{Q_0}{P_0}$ donde Q_0 y P_0 son energía y potencia respectivamente.

Este modelo es aplicable para aquellas condiciones en donde se requiere simular comportamiento del arco a corrientes relativamente grandes (100 A a 100 kA), es decir altas temperaturas en donde el plasma del arco es muy alta.

Modelo de Mayr

Este modelo supone que los cambios de temperatura de arco son dominantes, y el tamaño y el perfil de la columna de arco son constantes. La conducción térmica es el principal mecanismo de eliminación de energía (ver Figura 2.26).

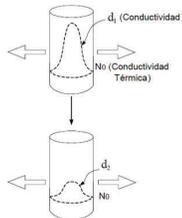


Figura 2.26 Canal del arco eléctrico de acuerdo a Mayr [3].

$$\frac{1}{g_m} \cdot \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{v i}{P_0} - 1 \right) = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{i^2}{P_0 g_m} - 1 \right)$$

Ecuación 2.2 Ecuación diferencial del modelo de Mayr [3].

En donde g_m es la conductancia del arco, i es la corriente de arco, v es el voltaje de arco y P_0 es la pérdida de potencia de estado estacionario.

Este modelo describe el comportamiento del arco eléctrico cercano al cruce por cero, en donde la temperatura del arco es mucho menor comparado al modelo de Cassie, por lo tanto su aplicación en cuanto a la simulación del comportamiento del arco eléctrico se limita a pequeñas corrientes de pre-arco hasta 100 A [3].

Modelo combinado de Cassie-Mayr

Emplear ambos modelos por separado limita los resultados que se pueden obtener durante una simulación del arco eléctrico debido a la capacidad de corriente que puede manejar cada modelo, por lo tanto en la necesidad de obtener un rango más amplio de corriente y resultados confiables, una combinación entre ambos modelos a través de una serie de resistencias, permite obtener una resistencia total que representa el comportamiento del arco, como se muestra a continuación [2].

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_c} + \frac{1}{G_M}$$

Ecuación 2.3 Modelo combinado de Cassie-Mayr [3].

En donde G_c es la conductancia de Cassie y G_M es la conductancia de Mayr. El presente modelo obedece al diagrama de bloques mostrado en Figura 3.8.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL CASO DE SIMULACIÓN

En el presente capítulo, se detalla la implementación del caso de estudio en ATPDraw, para lo cual se hizo uso de un caso disponible de la literatura técnica, para reactores conectados en barras de extra alto voltaje, en donde el reactor será un banco de reactores monofásicos de una potencia total de 30 MVar.

Además se detalla los modelos implementados, para los demás equipos que conforman la bahía del reactor de barra, como el interruptor, transformador de potencial, transformador de corriente, etc.

3.1. Característica de la bahía de reactor de barra

Valores estimados de inductancia y capacitancia para equipos varios

La gran mayoría de reactores instalados para la compensación de voltaje, están comprendidos entre 30 – 300 MVar (trifásicos), también existen reactores monofásicos de una capacidad hasta 125 MVar que pueden ser conectados en un grupo trifásico [22]. Para diferentes niveles de voltaje en la Tabla 3.1, se especifica dimensiones de uso típico de reactores.

Tabla 3.1 Dimensiones típicas de reactores de barra para extra alto voltaje y alto voltaje [23].

Voltaje Nominal [kV]	Potencia nominal del reactor, trifásico [MVA]	Corriente Nominal [A]	Pérdidas totales, trifásico [kW]
735	330	259	289
550	133-300	140-135	489-552
525	50-135	55-149	135-439
460	100	126	315
400	50-200	72-289	150-540
380	100	152	400
362	60	96	180

En el caso de una bahía de reactor de barra dentro de una subestación, la conexión del reactor al interruptor de potencia no excede los 150 metros de largo con valores de inductancia y capacitancia de aproximadamente 1µH/m y 10 pF/m, respectivamente [23].

Para el estudio de TRV, se considera elementos o equipos adicionales al reactor y al interruptor, como lo son transformadores de potencial y transformadores de corrientes, estos equipos aportan con valores de capacitancias que afectan a la respuesta de TRV durante la operación de apertura del interruptor; los cuales serán valores típicos definidos en la norma [19], estos valores son estimados para un estudio de TRV.

30

Los interruptores son instalados sobre bushings para aislar al interruptor y así evitar la descargar directa a tierra, los bushings aportan con capacitancias entre la fase – tierra como se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Capacitancias para aisladores bushing al aire libre [19].

Voltaje máximo del sistema [kV]	Capacitancia [pF]			
	Aire-aceite, aire-SF ₆ hoja laminada, aceite y papel aislante	Aire-SF ₆ , SF ₆ insulated	SF ₆ -aceite, SF ₆ y aceite aislante	Aire-aceite, aire-SF ₆ , aisladores sólidos
15 - 72.5	150-650	25-150	-	30-200
72.5 - 800	100-200	25-150	100-500	100-500

También los transformadores de corriente (TC) y los transformadores capacitivos de potencial (CVT's), tienen un efecto capacitivo entre fase – tierra, estos valores estimados se muestran en Tabla 3.3 y Tabla 3.4.

Tabla 3.3 Efecto capacitivo de un transformador inductivo de potencial [19].

Voltaje máximo del sistema	Capacitancia del transformador de potencial	Capacitancia del transformador de corriente
15-72.5	125-500	75-260
72.5-800	150-450	150-450

Tabla 3.4 Efecto capacitivo de un transformador inductivo [19].

Clase de Voltaje [kV]	Capacitancia [pF]
145	4000-22000
170	4000-16500
245	3000-12500
362	2150-9500
550	1500-6300
800	2000-6200

Finalmente, para los interruptores se definen valores estimados de capacitancias que existen entre fase – tierra, como los interruptores a ser implementados dentro la simulación son de doble cámara para el sistema de 500 kV, existe una capacitancia adicional entre las dos cámaras. Estos valores se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Valores estimados de capacitancia para interruptores de potencia [19].

Descripción del equipo	Capacitancia [pF]			
	Voltaje máximo del sistema por debajo de 100 kV		Voltaje máximo del sistema por encima de 100 kV	
	Abierto	Cerrado	Abierto	Cerrado
Interruptores automáticos de exterior, tanque vivo, aire, aceite, vacío o SF ₆	20-50	40-100	25-150	50-250
Interruptores de SF ₆ al aire libre	25-40	60-120	30-130	80-250

Por lo tanto, el sistema de estudio estará conformado por un reactor de potencia de 30 MVar (conformado por reactores de 10 MVar monofásicos), interruptor de potencia, incluyendo las capacitancias recomendadas en las tablas de esta sección, TC y TP.

Fuentes equivalentes para demanda máxima y demanda mínima

Para el equivalente de red para el escenario de demanda máxima y mínima se emplean los datos mostrados en la Tabla 3.6, los cuales fueron obtenidos de una base de datos modelada en PowerFactory.

Tabla 3.6 Resultados de la prueba de cortocircuito PowerFactory, para el sistema de 500 kV.

RESULTADOS				
RESULTADOS	Subestación:	Inga		
	Año	2018		
	Barra 500 kV			
	Demanda Máxima			
	Skss 1Φ (MVA)	2211,7	R0 (ohm)	1,88
	Ikss 1Φ (kA)	7,661	X0 (ohm)	30,39
	Ip 1Φ (kA)	19,778	R1 (ohm)	2,49
	Skss 3Φ (MVA)	5863,0	X1 (ohm)	46,84
	Ikss 3Φ (kA)	6,770	R2 (ohm)	2,43
	Ip 3Φ (kA)	17,477	X2 (ohm)	46,92
	Demanda Mínima			
	Skss 1Φ (MVA)	1781,2	R0 (ohm)	1,88
Ikss 1Φ (kA)	6,170	X0 (ohm)	30,39	

32

RESULTADOS			
Ip 1Φ (kA)	15,807	R1 (ohm)	3,67
Skss 3Φ (MVA)	4423,9	X1 (ohm)	62,05
Ikss 3Φ (kA)	5,108	R2 (ohm)	3,55
Ip 3Φ (kA)	13,086	X2 (ohm)	61,67

En base a los valores estimados y distancias recomendadas se establecen las características eléctricas y físicas de la bahía de reactor de barra.

Diagrama unifilar para bahía de reactor de barra

La mayoría de configuraciones de las bahías de reactor de barra, tienen una gran similitud en cuanto a sus componentes y su tipo de conexión, además disponen de equipos de medida, como son el TP y el TC.

El estándar IEEE Std C37.015™-2009, recomienda el circuito básico que se debe emplear para estudios de operación de apertura en reactores de barra como se muestra en la Figura 3.1 y se incluirán los demás equipos asociados al reactor de barra, para obtener una similitud a un caso real, como se muestra en el siguiente diagrama unifilar.

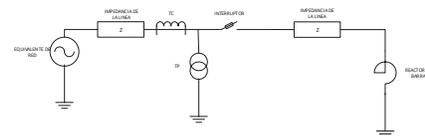


Figura 3.1 Esquema de barras de una bahía de reactor de barra típica.

A diferencia del esquema recomendado en [18], se consideró para la simulación la impedancia de la línea, los elementos de medida (TC y TP) y el interruptor de potencia.

3.2. Implementación del caso de estudio en ATP

Una vez determinada la configuración y los valores de parámetros eléctricos a usar dentro de la simulación, se procede a implementar el caso de estudio en ATPDraw.

Equivalente de red del sistema

El equivalente de red, está basado en un equivalente Thévenin, al cual se le debe proporcionar parámetros R-L, de secuencia positiva y negativa, los mismos que están

33

disponibles en la Tabla 3.6, el icono que lo representa en ATPDraw, se muestra en la Figura 3.2.



Figura 3.2 Icono de ATP, representa al equivalente de red del sistema.

Fuentes de voltaje

Son fuentes AC sinusoidales, que pueden ser configuradas como fuentes monofásicas o trifásicas, para el caso de estudio permite determinar el nivel de voltaje al cual está realizándose la maniobra de apertura, frecuencia nominal del sistema 60 Hz y un nivel de voltaje de 500 kV, en la Figura 3.3 se muestra el icono que representa a este elemento en el ATP.



Figura 3.3 Icono de ATP, representa a la fuente de voltaje del sistema.

Modelo de Línea/Cable

El presente modelo, permite el cálculo de los parámetros eléctricos de las configuraciones de líneas disponibles en ATP, los cuales son: líneas aéreas (overhead line), cables de un solo núcleo (single core cable) y cables subterráneos (envolving pipe); a partir de las dimensiones y configuración constructiva de cada una de las fases (Eje: Geometría de la torre y subestaciones); además de la disposición y tipo de conductor instalado (AAC, ACAR, ACSR, etc.). Son usados de acuerdo al tipo de estudio y además el tipo de transitorio a analizar.

Para el presente trabajo se escogió el modelo JMarti, el cual es un modelo dependiente de frecuencia con matriz de transformación constante, permitiendo representar a la bahía en parámetros distribuidos.

Los datos a ser ingresados en ATP (geometría y el tipo de conductor) serán mostrados en el ANEXO I

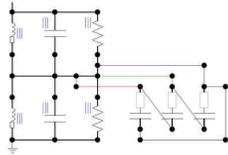


Figura 3.6 Modelación del reactor de barra en ATP [18].

Interruptores de potencia

Para la implementación del interruptor de potencia en el software ATP, se hace uso de los modelos del arco eléctrico de Cassie y Mayr, ya que estos modelos permiten obtener resultados confiables y cercanos al comportamiento real del arco eléctrico en los terminales del interruptor, lo que no se puede obtener usando los modelos ideales del interruptor, el cual se basa en una conductancia que toma dos valores 0 o infinito y además realiza la operación de apertura precisamente en el cruce por cero.

Un interruptor real, debido a la inestabilidad del arco eléctrico, realiza su operación de apertura unos milisegundos antes del cruce por cero y esta característica depende del fabricante. Para interruptores SF6, a un nivel de 500 kV, se puede llegar a forzar el corte de entre 10 a 16 A [24].

Considerando lo mencionado anteriormente, el presente trabajo hace uso de los modelos basados en las ecuaciones de Cassie y Mayr que se muestran en el capítulo anterior, con ayuda del lenguaje MODELS disponible en ATP.

El modelo del interruptor implementado en la simulación debe cumplir las dos ecuaciones. Tiene que tener propiedades de acuerdo con el modelo matemático, y su incorporación al modelo de red debe ser fácil. Se eligió un modelo de dos polos con conductividad variable, como se muestra en la Figura 3.7.

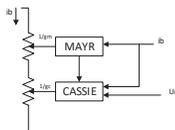


Figura 3.7 Modelo del interruptor en ATP.

Modelación de los TC y TP

Como se mencionó en la sección 3.1, los elementos de medición tienen un efecto capacitivo entre fase – tierra, el cual afecta a la respuesta del TRV dentro de un sistema real, por lo tanto es considerado dentro de la simulación a través de los modelos en ATP "RLCY3", el cual es un ramal de carga RLC, su icono representativo en ATP se muestra en la Figura 3.4, conectado en "estrella".



Figura 3.4 Icono del modelo RLCY3, rama RLC conexión "Y".

Reactores de barra

En la modelación de reactores de barra se debe considerar además del valor de la inductancia para una potencia reactiva de 30 MVAR, las capacitancias parasitas que se tienen, entre fase - tierra de cada una de las fases y la capacitancia que se forma entre las inductancias de fase - fase, como se recomienda en [18] y se muestra en la Figura 3.5.

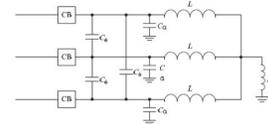


Figura 3.5 Parámetros eléctricos de un caso general para la operación de apertura del reactor shunt [18].

Los valores para los parámetros eléctricos de inductancia y capacitancia, son tomados de la Tabla 3.5. En la Figura 3.6, se muestra la implementación del reactor en ATP.

El modelo de interruptor, consta de dos resistencias óhmicas conectadas en serie. Uno representa la parte de Mayr, el otro representa la parte de Cassie del interruptor automático. El término interruptor de circuito se usa en lugar de arco porque la resistencia no actúa como un arco a lo largo de la simulación. La conductancia de ambas resistencias es controlada en cada paso de tiempo por dos reguladores cuyas salidas siguen el modelo matemático definido por ecuaciones diferenciales.

El modelo matemático mostrado en la Figura 3.7, es descrito por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_m} + \frac{1}{g_c}$$

Ecuación 3.1 Conductividad total.

Donde g_m , g_c y g , representan a las conductancias de Mayr, Cassie y la conductancia total respectivamente.

Para obtener la posibilidad de modelar la ecuación diferencial de Mayr de esta manera en ATP, la ecuación diferencial que se muestra en la Ecuación 2.2, se transformó primero en la siguiente forma incremental.

$$\left[\frac{g_2 - g_1}{t_2 - t_1} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{i_{b1}^2}{P_0} - g_1 \right) \right]$$

Ecuación 3.2 Ecuación obtenida a partir de la ecuación de Mayr.

En donde $g_2 - g_1$ representa el diferencial de la conductancia de Mayr y $t_2 - t_1$ representa el diferencial del tiempo. A partir de esta ecuación, se obtuvo expresión matemática para el cálculo de la conductividad del arco en cada paso de simulación, como se muestra en la Ecuación 3.3.

$$g_2 = \frac{\Delta t}{\tau_m} \frac{i_{b1}^2}{P_0} + g_1 \left[1 - \frac{\Delta t}{\tau_m} \right]$$

Ecuación 3.3 Expresión matemática para el cálculo de la conductividad.

La implementación de la Ecuación 3.3, representa la parte básica del regulador para el modelo del interruptor (arco) de Mayr. De la teoría de Mayr, se sabe que el arco eléctrico en el interruptor se comporta de acuerdo con esta ecuación solo en el intervalo de tiempo muy estrecho alrededor del cruce por cero. Como resultado, se modelaron dos partes adicionales en el regulador. El primero debe proporcionar las condiciones iniciales

adecuadas para la ecuación, mientras que el segundo se usa para determinar el éxito de la extinción del arco [25].

Para la definición de las condiciones iniciales, se asumió un voltaje de arco constante en la llamada área de altas corrientes (mucho antes del cruce por cero). La conductividad de arco necesaria para esta fase se calcula a partir del voltaje de arco definido y la corriente de arco trazada.

Como criterio para la extinción exitosa del arco, se eligió un valor de la resistencia, calculado de acuerdo con la ecuación de arco de Mayr, superior a $10^{10} \Omega$. Si la resistencia de la parte del arco de Mayr comienza a disminuir antes de que se alcance este valor, ésta es la señal de que el arco comienza a circular a través del interruptor nuevamente [24].

El modelo de Cassie se realiza de la misma manera que el modelo de Mayr. Primero, la ecuación diferencial de Cassie, que se muestra en la Ecuación 2.1, se transforma en la siguiente forma incremental.

$$\frac{g_2 - g_1}{t_2 - t_1} = \frac{1}{\tau_c} \left[i_b \cdot v_b - g_1 \right]$$

Ecuación 3.4 Forma Incremental obtenida a partir de la ecuación de Cassie

En donde g_2-g_1 representa el diferencial de la conductancia de Cassie y t_2-t_1 representa el diferencial del tiempo. A partir de la Ecuación 3.4, se obtiene la expresión matemática para la conductividad de la parte del modelo de Cassie, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$g_2 = \frac{\Delta t}{\tau_c} \cdot \frac{i_{b1} \cdot u_{b1}}{u_c^2} + g_1 \left[1 - \frac{\Delta t}{\tau_c} \right]$$

Ecuación 3.5 Expresión matemática para el cálculo de la conductividad de Cassie

Como se describió para el modelo de Mayr, también se deben agregar dos partes a la componente principal en el modelo de Cassie: el primero determina las condiciones iniciales, que funciona de la misma manera que en el modelo de Mayr, y el otro para la evaluación de la extinción exitosa del arco. En esta parte, se usa el valor de la resistencia de la parte de Mayr, mientras que la resistencia de la parte de Cassie no aumenta tan rápidamente después del cero actual.

a) Implementación con MODELS para el Interruptor

La implementación de los modelos del arco eléctrico entre los terminales del interruptor en ATP, se lo realiza con ayuda del lenguaje de programación MODELS, que permite describir el comportamiento dinámico de sistemas físicos complejos. Su estructura es similar a otras estructuras de otros lenguajes de programación, como el lenguaje Fortran.

La selección del lenguaje de programación en ATP, para la simulación del arco en los terminales del interruptor es MODELS, porque describe los procedimientos de operación, los valores de retención para llevar el estado y la historia de su funcionamiento, permiten establecer las directrices para el intercambio de información, entre el modelo y circuito implementado. Además los ficheros se crean de forma independiente al programa inicial y pueden ser llamados desde cualquier otro programa cuantas veces sea necesario.

Un modelo creado en MODELS, puede ser incorporado como un elemento nuevo en la librería MODELS del ATPDRAW, y así el modelo sea representado a través de un icono.

Para lograr la implementación se hizo uso de la siguiente estructura [4].

- MODEL** - Nombre del modelo a implementarse.
- DATA** - Datos ingresados por el usuario.
- INPUT** -Variables de entrada.
- OUTPUT** -Variables de salida.
- VAR** -Variables o elementos que varían dentro del model.
- HISTOR** -Permite hacer referencia a valores previos a los valores actuales, inclusive antes de iniciar la simulación.
- INIT** -Describe la iniciación del algoritmo a implementarse.
- ENDINIT** -Cierre del algoritmo o del bloque INIT.
- EXEC** -Contiene el algoritmo operacional que se desarrolla dentro de la simulación, siendo ejecutado para cada paso de tiempo en el cual el model ha sido empleado por una declaración.
- ENDEXEC** -Cierre de la sentencia EXEC.
- ENDMODEL** -Cierre del modelo implementado.

El código implementado basado en el modelo combinado de Cassie y Mayr se muestra en el ANEXO II, en ambos modelos, algunos de los parámetros del cual depende la conductancia se toman como valores constantes, para las ecuaciones de Cassie y

(constante de tiempo), V0 (Voltaje mínimo en régimen permanente) y para el caso del modelo de Mayr τ (constante de tiempo), P0 (Potencia disipada de arco) [4].

Los valores de las constantes mencionadas, fueron obtenidos en estudios previos, por lo tanto se hace uso de estos valores dentro del modelo, como se muestra en la Tabla 3.7 [25].

Tabla 3.7 Parámetros de las ecuaciones de Mayr y Cassie [25].

MODELO	CONSTANTE ELÉCTRICA	CONSTANTE DE TIEMPO
MAYR	$P_0= 8800$ [vatios]	$\tau = 2.2e-7$ [s]
CASSIE	$V_0= 2350$ [voltios]	$\tau = 8e-7$ [s]

Finalmente, se procede a la implementación de la Ecuación 3.3 y la Ecuación 3.5 y así se obtiene como resultado la conductancia dinámica de arco en ambas ecuaciones.

La modelación de la conductancia total se muestra en la Figura 3.8, se obtiene a partir de la combinación de las dos ecuaciones, a través de la conexión en serie de las dos resistencias de cada modelo del arco eléctrico, como se muestra en la Ecuación 3.1.

Para obtener un mayor entendimiento en cuanto a la implementación del modelo, se puede resumir los procedimientos mediante el siguiente diagrama de bloques.[15]

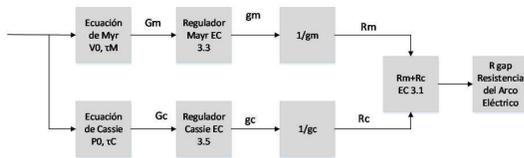


Figura 3.8 Diagrama de bloques para el modelo del arco eléctrico.

Como resultado final se muestra el icono representativo del modelo implementado (ver Figura 3.9 y Figura 3.10).



Figura 3.9 Icono representativo de las ecuaciones de Cassie y Mayr.

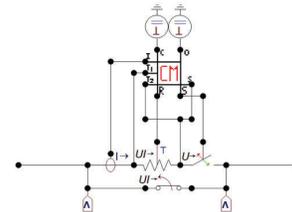


Figura 3.10 Implementación del Modelo del Arco Eléctrico en ATP

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos de los métodos de mitigación a altos valores de voltaje transitorio de restablecimiento aplicados al sistema de estudio. En base a normas técnicas, se verifica principalmente los límites de TRV.

4.1. Consideraciones previas a la simulación

Los interruptores generalmente no tienen dificultad en cuanto a la interrupción de corrientes en un circuito inductivo, debido a que la corriente es obligada a cruzar por cero antes de lo previsto (es decir, antes del cruce natural por cero de la onda sinusoidal de corriente), por lo que el valor de esta corriente no es muy alto, siendo denominadas como corriente de corte (current chopping). Sin embargo, debido a esta corriente y posteriores reigniciones se pueden originar sobrevoltajes transitorios significativos.

El estándar IEEE Std C37.015™-2009 define dos clases de sobrevoltajes que ocurren durante las maniobras de apertura de un reactor (Inductor) [18], los cuales son:

- Sobrevoltajes con frecuencias hasta los 5 kHz.
- Sobrevoltajes de reignición con frecuencias de hasta varios cientos de kHz.

La conmutación de los reactores directamente a tierra puede analizarse utilizando el circuito monofásico equivalente que se muestra en la Figura 4.1 [18].

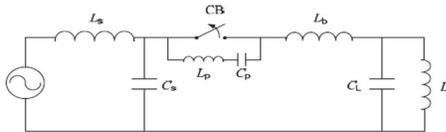


Figura 4.1 Circuito equivalente monofásico [18].

Dónde:

- L_s es la inductancia del lado de la fuente.
- C_s es la capacitancia de lado de la fuente.
- CB es el interruptor.
- L_p, C_p son la capacitancia e inductancia paralela al interruptor.
- C_t son la capacitancia del lado del inductor.
- L es la inductancia del reactor.

- I_{ch} Es la corriente de corte instantánea (A)
- C_t Es la capacitancia total en paralelo con el disyuntor (F)
- λ Es el número de corte para un disyuntor monofásico ($AF^{0.5}$)
- N interruptores automáticos con N unidades de interrupción por polo.

El número de corte del interruptor λ es determinado mediante pruebas en laboratorios, el cual puede ser aplicado a todo tipo de interruptor excepto a los interruptores en vacío (ver Tabla 4.).

Tabla 4.1 El número de corte del interruptor [18].

Tipo de interruptores	Número de corte $\lambda F^{0.5}$
Mínimo aceite	$5.8 \times 10^4 - 10 \times 10^4$
Soplado de aire	$15 \times 10^4 - 20 \times 10^4$
Soplado SF6	$4 \times 10^4 - 19 \times 10^4$
Auto-explusión SF6	$3 \times 10^4 - 10 \times 10^4$
Arco giratorio SF6	$0.39 \times 10^4 - 0.77 \times 10^4$

Finalmente el valor de C_t es dado por la siguiente ecuación, determinada en base a la Figura 4.1:

$$C_t = C_p + \frac{C_s C_L}{C_s + C_L}$$

Ecuación 4.2 Capacitancia total paralelo al interruptor de potencia.

Dónde:

- C_p Es la capacitancia paralelo al interruptor de potencia (F)
- C_s Es la capacitancia a tierra del lado de la fuente (F)
- C_L Es la capacitancia a tierra de lado de la carga

Para determinar la corriente de corte (I_{ch}), los valores de las capacitancias empleadas dentro del caso de estudio se toman de la norma IEEE Std C37.011-2005, la cual recomienda valores típicos de capacitancias necesarias para el estudio del TRV, tanto del reactor, como de transformadores de medida (TP's y TC's) y especialmente capacitancias que conforman al interruptor de potencia, logrando así determinar una $I_{ch} = 10$ A, para un interruptor de potencia con medio de extinción del arco mediante soplado SF6. A manera de ejemplo, se muestra una corriente de corte de $I_{ch} = 10$ A en la Figura 4.3.

- L_b representa a la inductancia conectada en serie.

Para determinar los métodos de control de voltaje transitorio de restablecimiento que se puede aplicar durante la operación de apertura del reactor, se realiza la simulación de la bahía del reactor de barra de la subestación el Inga a un nivel de 500 kV considerando dos estados de demanda: demanda máxima y demanda mínima. En el ANEXO III se muestra el sistema que se considera para el análisis de los dos estados de demanda de la operación del reactor.

En cuanto a la representación del interruptor de doble cámara utilizado para el análisis dentro de la simulación, es representado en base a las ecuaciones de Cassie y Mayr como se muestra en la Figura 4.2.

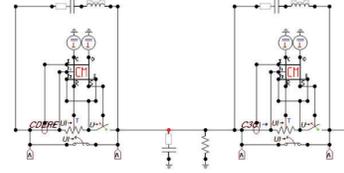


Figura 4.2 Esquema de simulación del interruptor de potencia de doble cámara en ATP.

4.2. Operación de apertura del reactor en condición de demanda máxima

El presente análisis hace uso de los resultados obtenidos durante la operación de apertura del interruptor en condiciones de demanda máxima, los cuales se obtuvieron en base a la topología de una bahía típica de reactor de barra, es decir considerando todos los elementos que son necesarios para realizar un estudio de TRV, para lo cual se debe tener en cuenta las características del reactor y del circuito.

La corriente de corte (current chopping) del interruptor se determina en base a la norma IEEE Std C37.015™-2009, por la siguiente ecuación [18].

$$I_{ch} = \lambda \sqrt{N C_t}$$

Ecuación 4.1 Expresión matemática para obtener la corriente de corte [18].

Dónde:

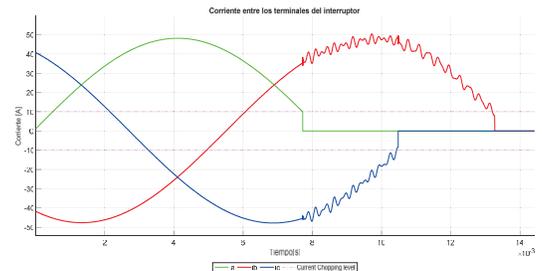
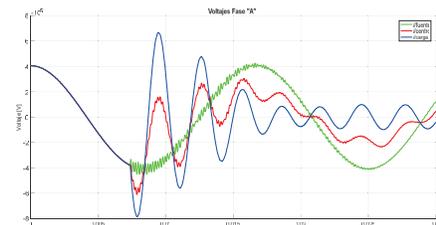
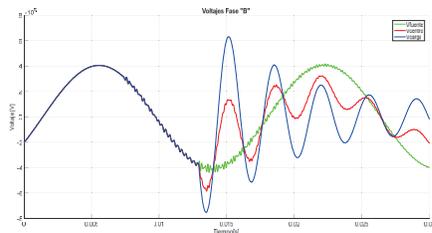


Figura 4.3 Operación de apertura del interruptor de potencia fase a, b y con una corriente de corte de 10 A.

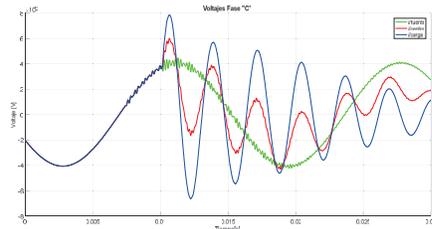
La operación de apertura hace que la corriente se extinga instantes antes al cruce por cero de la corriente, lo que ocasiona diferentes valores de voltajes tanto en el lado del reactor de barra y en el centro de las dos cámaras que conforman el interruptor de potencia, además la forma de onda obtenida en el lado del reactor tiene una oscilación en el orden de los kHz debida a la frecuencia natural del circuito, como se muestra en la Figura 4.4. Siendo esta diferencia de voltajes entre los terminales del interruptor que ocasiona una variación de voltaje.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.4 Voltaje de lado de la carga, voltaje en el centro de las cámaras del interruptor y voltaje de lado de la carga (a) Fase A (b) Fase B (c) Fase C.

Esta variación de voltaje que existe durante un corto tiempo en los terminales del interruptor conlleva a ciertos riesgos dentro de la subestación, ya que en caso de no ser posible el control del fallo del interruptor se debe disparar la barra, involucrando a sus equipos e inclusive a la estabilidad del sistema.

Comúnmente en los sistemas de extra alto voltaje, específicamente en sistemas de 500 kV, se hacen uso de interruptores de doble cámara, por lo tanto se tiene diferentes respuestas de TRV; entre los terminales del interruptor de la cámara del lado derecho, los

terminales de la cámara del lado izquierdo y entre los terminales de ambas cámaras, por lo tanto el TRV del interruptor está medido entre los terminales de ambas cámaras (el terminal del lado de la fuente y el terminal del lado del reactor), dado que este valor de voltaje es el más alto, como se muestra en la Figura 4.5.

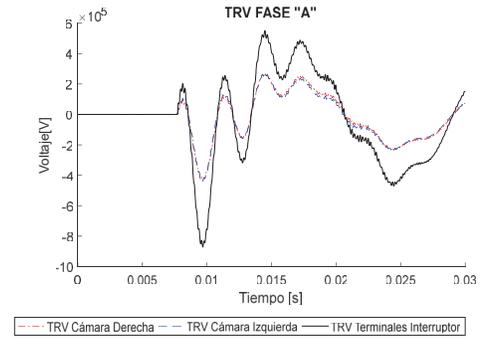


Figura 4.5 TRV de la Fase "A" de ambas cámaras del interruptor de potencia, cámara derecha (lado del reactor), cámara izquierda (lado de la fuente).

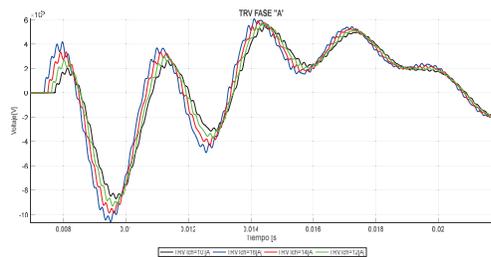
En cuanto al valor de la corriente de corte está determinada considerando el peor escenario que pueda darse durante la operación de apertura, además de que este valor de corriente es una característica propia del interruptor, es decir, es dado por fábrica y en base al registro de pruebas que se muestra en la Tabla 4.2 [24].

Tabla 4.2 Resumen de las pruebas de conmutación de reactores en barras de compensación [24].

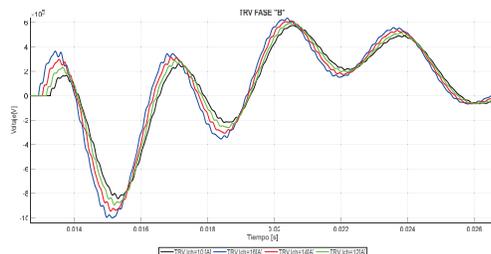
Tipo de Interruptor	Voltaje kV	Longitud de la línea m	I_{ch} A	n	C nF	Λ
SF ₆	400	230	14	3	5.51	10.5×10^4
SF ₆	400	< 10	16	3	11	8.8×10^4
SF ₆	765	< 10	10	4	2.4	10×10^4
SF ₆	275	< 10	18	2	6.9	15.3×10^4
SF ₆	275	< 10	8	2	1.2	16.3×10^4
SF ₆	275	< 10	22	1	13	19.3×10^4

Tipo de Interruptor	Voltaje kV	Longitud de la línea m	I_{ch} A	n	C nF	Λ
Aire	500	170	70	6	9.8	28.8×10^4
Aire	500	170	80	6	9.8	32.9×10^4
Aire	500	-	35	6	4.5	21.3×10^4

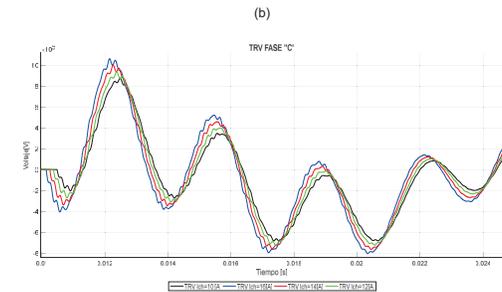
Se tiene que para un interruptor tipo puffer o soplado de SF₆ de doble cámara a un nivel de 500 kV posee una capacidad de corriente de corte en un rango de 10 A hasta 16 A (ver Figura 4.6).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.6 TRV en los terminales del interruptor de potencia para $I_{ch}=(10, 12, 14, 16)$ A. (a) Fase "A" (b) Fase "B" (c) Fase "C".

Para caracterizar al TRV se hace uso de los valores obtenidos durante la operación de apertura del interruptor, lo cual permite tener una idea cuantitativa de sus efectos. Como se puede observar en la Figura 4.5 y Figura 4.4, el valor pico más alto se da en un tiempo menor a 30 ms, por lo que no se realiza un análisis posterior a este tiempo, dado que los resultados obtenidos después de los 30 ms no se tiene efecto sobre los equipos debido a la atenuación de la onda.

Sin embargo, los valores anteriores a 30 ms por sus picos elevados pueden causar la reignición o reencendido del arco, en caso de que el interruptor no opere exitosamente, estos valores son mostrados en la Tabla 4.3, y se toma como ejemplo el I_{ch} de 16 A, ya que éste es el peor de los escenarios.

Tabla 4.3 Valores TRV máximos y mínimos de las 3 fases, medidos desde los terminales del interruptor

	VOLTAJE MAX	VOLTAJE MIN	Vmáx	Vmín
	kV	kV	p.u	p.u
FASE A	608.623	-1,060.970	1.49	-2.60
FASE B	635.782	-1,001.130	1.56	-2.45
FASE C	1,061.000	-803.297	2.60	-1.97

Para poder controlar estos altos valores de TRV que se presentan durante la operación de apertura del reactor de barra, se plantea las siguientes soluciones: colocación de un pararrayos de lado del reactor, aumento de la capacidad del interruptor de potencia, instalación de capacitores del reactor, instalación de capacitores paralelo al interruptor y además mando sincronizado.

4.3. Aplicación de métodos de control

Aplicación de curvas de soportabilidad de interruptores de potencia

El interruptor al ser un equipo primario, es el primero en actuar, por lo que si el mismo interruptor no logra mitigar el TRV, se podría generar dos opciones: la reignición o el reencendido del arco.

Este tipo de estudio por lo general se lo realiza para determinar si el valor de TRV del sistema, que se origina por la operación de apertura del reactor, está cubierto por la capacidad del TRV del interruptor de la bahía [19]. Por lo tanto, es el principal estudio que se debe hacer en cuanto a métodos de control del TRV.

Para entender acerca de la soportabilidad de interruptores, se definen los siguientes términos, para interruptores que operan a voltajes mayores a 100 kV:

a) Interruptores que operan a un nivel de 100 kV

Para los interruptores que operan a un nivel superior a 100 kV, la forma de onda de TRV se define por la forma de onda exponencial más alta y una forma de onda de una señal coseno, como se muestra en la Figura 4.7 [26].

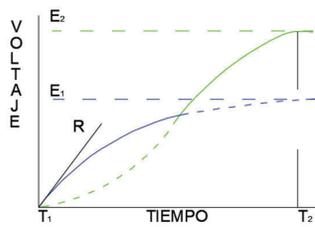


Figura 4.7 Forma de onda exponencial-coseno [25]

Dónde:

50

E_1 : Está dado por la Ecuación 4.3.

$$E_1 = K_f x \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) x V$$

Ecuación 4.3 Expresión matemática para el cálculo de E_1 .

K_f : Es el factor de primer polo.

E_2 : Es la magnitud nominal de la componente exponencial-coseno, dada por [27].

T_1, T_2 : Son los tiempos de E_1 y E_2 respectivamente.

b) Clasificación de las corrientes de falla

El interruptor debe ser capaz de interrumpir las corrientes de cortocircuito que son menores que la corriente de cortocircuito nominal. Esto requiere soportar una envolvente TRV donde el valor E_2 es más alto y el tiempo T_2 es más corto que los valores correspondientes a la corriente nominal de cortocircuito.

Se debe tener en cuenta que a medida que disminuye la corriente, E_2 aumenta y T_2 disminuye. Para los interruptores de 100 kV o más, la tasa de aumento, R , primero aumenta a medida que disminuye la corriente; luego se llega a un punto donde una disminución adicional en la corriente causa una disminución en R , hasta que al 30% de la corriente nominal y para valores menores al 30 %, la onda del coseno exponencial cambia a una onda de coseno, como se muestra en la Figura 4.8.

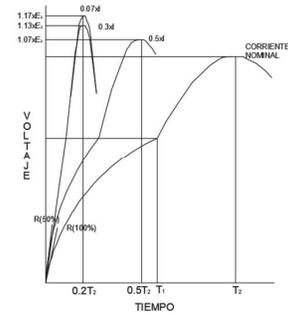


Figura 4.8 Envolturas del TRV, para interruptores que operan a voltajes superiores a 100 kV [27].

51

La soportabilidad de los interruptores para sistemas de extra alto voltaje, ya está definida por las normas IEEE Std. C37.011-2011 y la IEEE Std. C37.06-2009, además estos límites de soportabilidad son detallados en la sección 2.5 del presente documento, las mismas establecen que el disyuntor para poder interrumpir cualquier corriente sea ésta originada por una falla o maniobra, debe ser capaz de soportar entre sus contactos el TRV formado en este caso por la operación de apertura del reactor de barra. Dichos valores se muestran en la Tabla 4.4 [20].

Tabla 4.4 Valores estándar de TRV de 4 y 2 parámetros

Voltaje máximo	Prueba	Factor de amplitud	Primera referencia de voltaje	Tiempo	Valor pico TRV	Tiempo	Tiempo
kV _{rms}		p.u	kV	μs	kV	μs	μs
U_r		K_{sf}	U_r	t_1	U_c	t_2	t_p
550	T100	1.40	438	219	817	876	2
550	T60	1.50	438	146	876	438	2
550	T30	1.54	-	-	899	-	27
550	T10	1.76	-	-	1030	-	22

Para el caso de estudio, el interruptor debe ser capaz de controlar los altos valores de TRV, además como se menciona en [24], los valores obtenidos en pruebas para la corriente de corte (I_{sc}), las cuales fueron realizadas a interruptores que funcionan a un nivel de extra alto voltaje mayor a 400 kV, determinan valores típicos de entre 10 a 16 A, y únicamente se empleará las curvas de soportabilidad T30 y T10 (30 % y 10% de la corriente nominal de cortocircuito respectivamente), debido a la alta tasa de crecimiento que posee, ocasionada por la carga inductiva de la bahía de reactor de barra; las demás curvas T60 y T100 (60% y 100% de la corriente nominal de cortocircuito), tienen una mayor aplicación a TRV por origen de carga capacitiva.

El análisis determina la posibilidad de que exista reignición o reencendido, entre los contactos del interruptor, en base a las formas de onda y valores del TRV, como se muestra en la Figura 4.9.

52

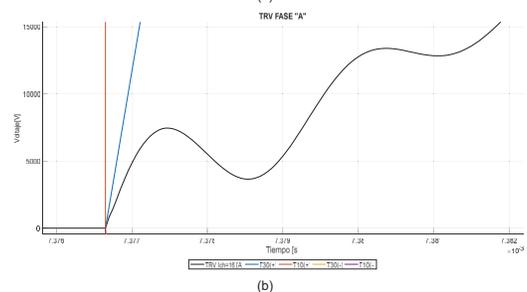
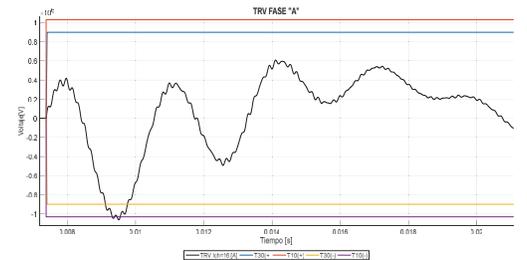


Figura 4.9 Curvas de soportabilidad de interruptores T10 y T30, aplicado al TRV de la Fase "A" (a) Representación completa del TRV (b) Primeros picos del TRV durante 5 μs

53

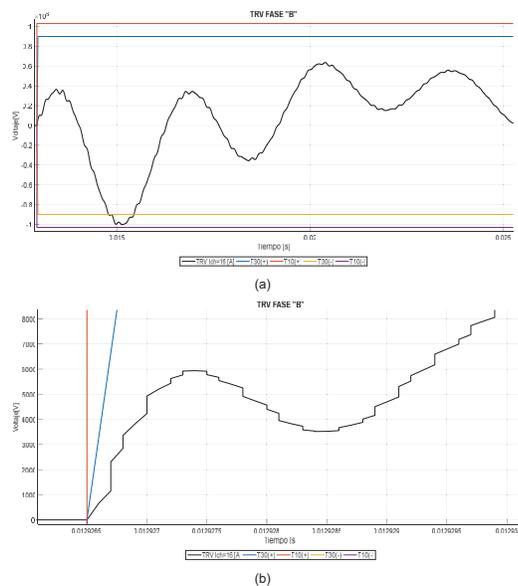


Figura 4.10 Curvas de soportabilidad de interruptores T10 y T30, aplicado al TRV de la Fase "B" (a) Representación completa del TRV (b) Primeros picos del TRV durante 5 μ s

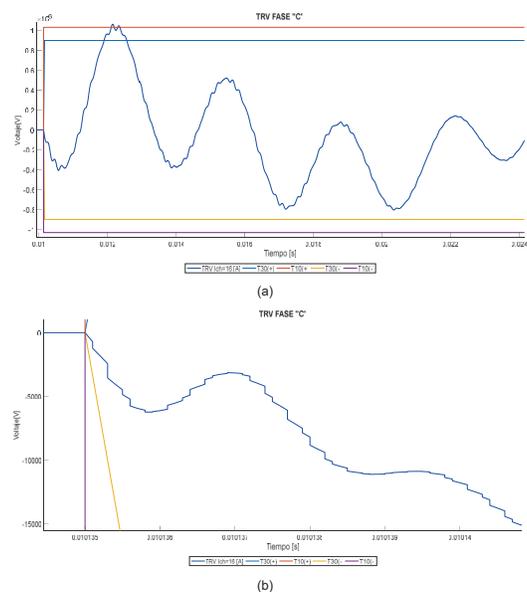


Figura 4.11 Curvas de soportabilidad de interruptores T10 y T30, aplicado al TRV de la Fase "C" (a) Representación completa del TRV (b) Primeros picos del TRV durante 5 μ s

Para el caso de I_{ch} de 16 A se obtuvo los resultados mostrados en la Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11, en donde se muestra el TRV obtenido de las fases "A", "B" y "C" respectivamente. Durante los primeros 5 μ s de iniciado el TRV en las 3 fases no existe reignición, lo cual se puede apreciar en la parte b de cada una de las figuras antes mencionadas; sin embargo, para el segundo pico que tiene una polaridad negativa para la fase "A", "B" y polaridad positiva para la fase "C", a su vez es el valor pico mínimo y valor pico máximo del TRV respectivamente, en cada una de las 3 fases exceden la

soportabilidad del interruptor T10 y T30, lo cual implica físicamente la reignición de la corriente entre los contactos, debido a que esto sucede antes del $\frac{1}{4}$ de ciclo.

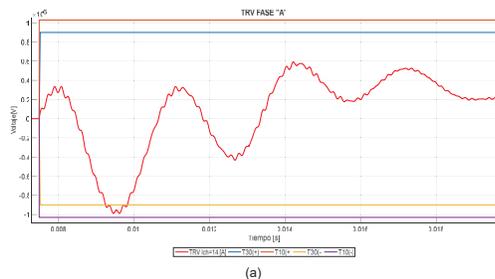
Únicamente para el I_{ch} de 16 A, se realiza el análisis gráfico durante los primeros 5 μ s, ya que este es el peor escenario posible, y además los valores del I_{ch} de 14 A hasta 10 A para este mismo intervalo de tiempo, son de menor valor a los obtenidos en este caso y se descarta la posibilidad de reignición durante los primeros microsegundos del TRV, ya que no exceden los límites de soportabilidad que se muestran en la Tabla 4.4.

Para los demás casos de I_{ch} únicamente el análisis se realiza observando los valores picos máximos y mínimos de cada una de las fases, dependiendo dentro de que rango de tiempos está, además de los resultados obtenidos se determina si es reignición o reencendido de la corriente en los contactos del interruptor.

Tabla 4.5 Valor pico de TRV de las 3 fases para una I_{ch} de 16 A

	Fase "A"	Fase "B"	Fase "C"
Voltaje TRV MV	-1.06	-1.001	1.061

De la Tabla 4.4, se tiene que la soportabilidad para un interruptor tipo T10 es de 1.03 MV y para un interruptor tipo T30 es 899 kV, y el valor pico mínimo para cada una de las fases es la que se muestra en la Tabla 4.5, lo cual muestra de manera cuantitativa como el TRV excede los límites de soportabilidad. Para la Fase A, el TRV excede con 30 kV para un interruptor T10 y 161 kV para un interruptor T30.



(a)

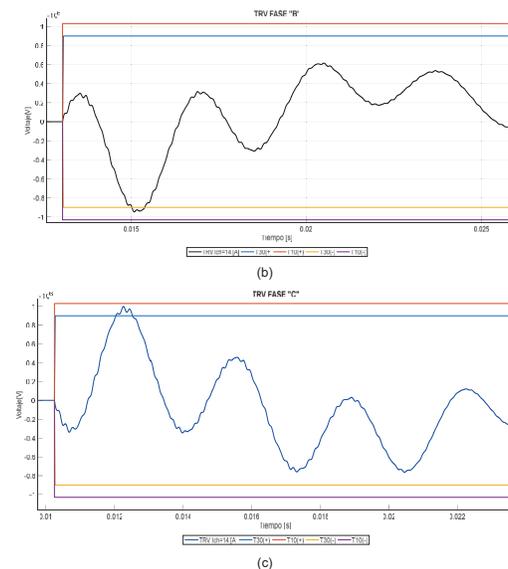


Figura 4.12 Formas de Ondas de TRV para un I_{ch} de 14 A (a) Fase "A" (b) Fase "B" (c) Fase "C"

Para el caso de I_{ch} de 14 A, gráficamente se puede observar que el TRV excede la soportabilidad del interruptor, en las 3 fases en comparación con las curvas de soportabilidad de un interruptor T30, de igual forma que en el caso anterior estos resultados ocurren antes del $\frac{1}{4}$ de ciclo (ver Figura 4.12), a continuación se muestran los resultados de los valores picos (máximos y mínimos) del TRV, que permitirá obtener una idea cuantitativa.

Tabla 4.6 Valor pico de TRV de las 3 fases, para un I_{ch} de 14 A

	Fase "A"	Fase "B"	Fase "C"
Voltaje TRV kV	-988.58	-946.65	999.60

Para este caso, las 3 fases exceden el límite de soportabilidad de T30, como se puede ver en la Tabla 4.6 y haciendo una comparación con los límites de soportabilidad de la Tabla 4.4.

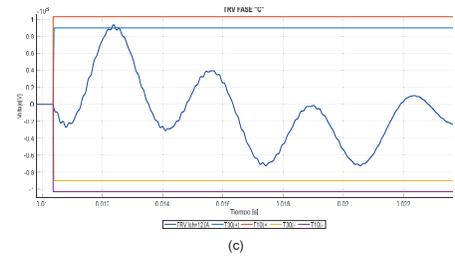
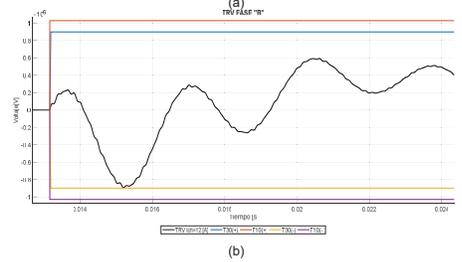
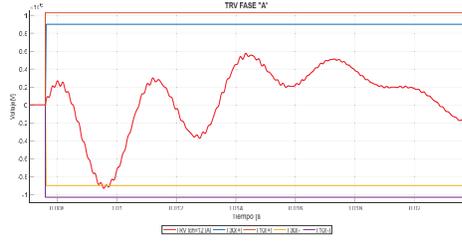


Figura 4.13 Formas de Ondas de TRV para un I_{ch} de 12 A (a) Fase "A" (b) Fase "B" (c) Fase "C"

Como muestra la Figura 4.13, para el presente caso se tiene que ninguna de las 3 fases excede el límite de soportabilidad de un interruptor T10, sin embargo si excede el límite de soportabilidad de un interruptor T30, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Valor pico mínimo de TRV de las 3 fases para un I_{ch} de 12 A

	Fase "A"	Fase "B"	Fase "C"
Voltaje TRV kV	-930.38	-895.35	937.27

Aplicación de pararrayos para control de TRV

En la Figura 4.14, se muestra la implementación del pararrayos en ATPDraw el cual se hace uso para el presente análisis.

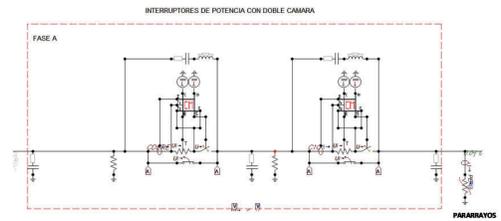


Figura 4.14 Implementación del pararrayos en ATP

Generalmente el dimensionamiento de pararrayos para subestaciones está enfocado para fallas en líneas de transmisión además de sobrevoltajes atmosféricos. Observando los valores obtenidos en la Tabla 4.5, Tabla 4.6 y Tabla 4.7, en donde se muestra que el TRV alcanza valores significativos; por lo tanto es importante realizar un estudio también para sobrevoltajes de maniobra, ya que pueden sobrepasar el voltaje soportado por los equipos de la bahía.

Las especificaciones técnicas del pararrayos se definen a continuación [17], [28]:

- a) Voltaje nominal de la red (U_n): Voltaje máximo entre fases durante el servicio normal.
- b) Voltaje nominal (U): El pararrayos cumple con la norma IEC 60099-4, la cual establece que debe resistir el voltaje nominal durante 10 s, es decir el U , debe ser como mínimo igual al sobre voltaje temporal de 10 s.
- c) Voltaje de trabajo continuo (U_c o $MCOV$): Es el voltaje eficaz máximo admisible a frecuencia industrial que se puede aplicar de forma continua entre los terminales del pararrayos.
- d) Sobrevoltaje temporal (TOV): Son sobrevoltajes de frecuencia industrial oscilantes de duración relativamente larga (algunos ciclos y varias horas), se produce en las fases sanas de la red, durante una pérdida a tierra en una o varias fases.
- e) Capacidad de energía: Es la energía que puede soportar un pararrayos y se mide en kJ/kV.

Para el caso de estudio se empleó diferentes tipos de pararrayos los cuales pertenecen a la clase 4; con una capacidad de voltaje de red U_n 245-550 kV y una capacidad de energía de 10,5 kJ/kV (U), como se muestra en la Tabla 4.8.

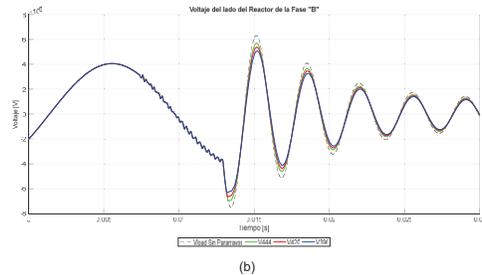
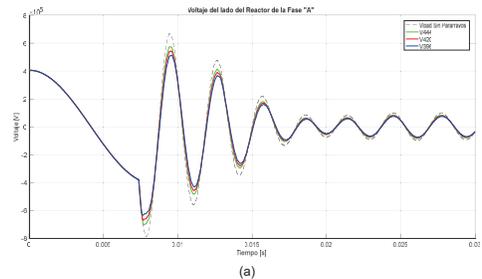
Este tipo de pararrayos está especificado para protección contra: sobrevoltajes de maniobra, sobrevoltajes atmosféricos, subestaciones de extra alto voltaje, transformadores y otros equipos en sistemas de 500 kV.

Tabla 4.8 Datos de protección garantizados por el fabricante para un voltaje de red 245-550 kV

Voltaje nominal de red	Voltaje nominal	Voltaje de trabajo continuo máxima		Capacidad de sobrevoltajes temporales		Voltaje residual máximo con onda de corriente 30/60µs		
		Según IEC	Según ANSI/IEEE	1s	10s	1kA	2kA	3kA
		U_c	$MCOV$					
U_n	U	U_c	$MCOV$	1s	10s	1kA	2kA	3kA
550	396	317	318	459	435	773	800	820
	420	336	336	487	462	819	849	870

Voltaje nominal de red	Voltaje nominal	Voltaje de trabajo continuo máxima		Capacidad de sobrevoltajes temporales		Voltaje residual máximo con onda de corriente 30/60µs		
		Según IEC	Según ANSI/IEEE	1s	10s	1kA	2kA	3kA
U_n	U	U_c	$MCOV$	1s	10s	1kA	2kA	3kA
444	349	353	353	515	486	866	897	920

Para el presente análisis se hace uso de los pararrayos que funcionan a una voltaje máximo de red de 550 kV_{rms}, los cuales tienen una voltaje nominal de 444, 420 y 396 kV_{rms} como se muestra en Tabla 4.8.



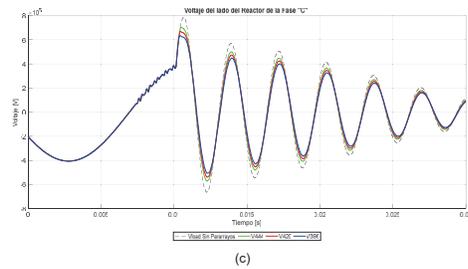


Figura 4.15 Formas de onda de voltaje del lado del reactor de las tres fases, aplicando los 3 pararrayos con un voltaje continuo máximo de 444 kV, 420 kV y 396 kV (a) Fase "A" (b) Fase "B" (c) Fase "C".

En la simulación realizada los pararrayos fueron ubicados del lado del reactor, ya que en este lado se tienen los picos más altos de sobrevoltaje, permitiendo limitar los sobrevoltajes a valores inferiores como se puede observar en la Figura 4.15 y reducir los picos de sobrevoltaje que se originan del lado del reactor de barra, como se muestra en la Tabla 4.9, Tabla 4.10 y Tabla 4.11.

Tabla 4.9 Voltaje fase-tierra máximo y mínimo de las 3 fases, sin pararrayos.

		Fase "A"	Fase "B"	Fase "C"
		V_{máx}	kV	666.71
	p.u	1.63	1.54	1.92
V_{mín}	kV	-786.45	-752.46	-663.53
	p.u	-1.92	-1.84	-1.62

Tabla 4.10 Voltaje máximo de las 3 fases del lado del reactor, con los 3 tipos de pararrayos de 444, 420 y 396 kV de voltaje nominal.

Voltaje Nominal Pararrayos kV	V _{máx} "A" p.u	V _{máx} "B" p.u	V _{máx} "C" p.u
444	1.41	1.39	1.73
420	1.33	1.32	1.64
396	1.26	1.24	1.55

Tabla 4.11 Voltaje mínimo de las 3 fases del lado del reactor, con los 3 tipos de pararrayos de 444, 420 y 396 kV de voltaje nominal.

Voltaje Nominal Pararrayos kV	V _{mín} "A" p.u	V _{mín} "B" p.u	V _{mín} "C" p.u
444	-1.72	-1.71	-1.40
420	-1.64	-1.63	-1.32
396	-1.56	-1.55	-1.24

Para determinar el efecto que tiene este método aplicado al caso de estudio, se hace una comparación porcentual, de los resultados obtenidos sin la aplicación del método de control y los obtenidos con el método de control, en base a los datos obtenidos en las Tabla 4.9, Tabla 4.10 y la Tabla 4.11, como se muestra en la Ecuación 4.4.

$$V(\%) = \frac{V_{SM} - V_{CM}}{V_{SM}}$$

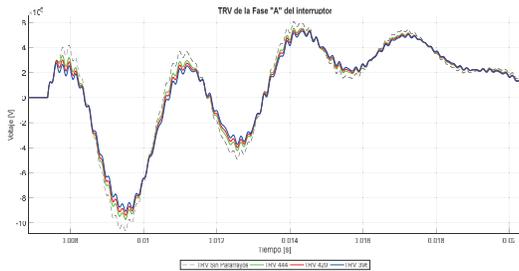
Ecuación 4.4 Expresión matemática para determinar el porcentaje de reducción del pico de voltaje.

Dónde:

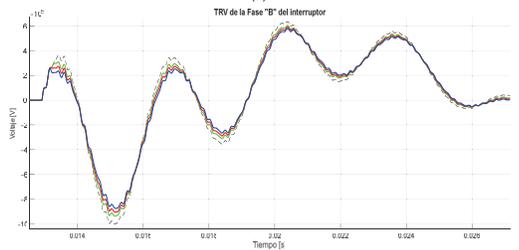
- V Valor porcentual de incremento o decremento del pico de voltaje.
- V_{SM} Valor obtenido sin la aplicación del método de control.
- V_{CM} Valor obtenido con la aplicación del método de control.

Observando los resultados obtenidos de la fase "C", se obtiene una reducción del pico de voltaje de hasta un 19.36% para el valor máximo y un 23.69% para el valor mínimo, empleando un pararrayos de voltaje nominal 396 kV clase 4, se toma como referencia los valores de la fase "C", debido a que es el de mayor amplitud.

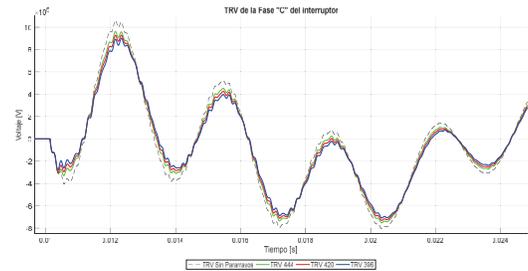
Dado que existe una diferencia de voltaje entre el lado de la fuente y el lado del reactor, ésta es el origen del TRV en los terminales de los interruptores, obteniendo los voltajes que se presentan en la Tabla 4.3, los cuales son mitigados o reducidos con la implementación de los tres tipos de pararrayos como se puede apreciar en los resultados mostrados en Figura 4.16.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.16 TRV medido entre los terminales del interruptor de potencia, aplicando los 3 pararrayos de voltaje continuo máximo de 444 kV, 420 kV y 396 kV (a) Fase "A" (b) Fase "B" (c) Fase "C".

La mitigación del sobrevoltaje originado en el lado del reactor, influye directamente a los valores de TRV que se obtienen en los terminales del interruptor de potencia como se muestra en la Figura 4.16, permitiendo una reducción significativa en sus valores picos máximos y mínimos, como ejemplo cuantitativo se muestran en la Tabla 4.12 y

Tabla 4.13, los resultados obtenidos en las tres fases, en comparación a los obtenidos sin emplear ningún método de control.

Tabla 4.12 TRV valor pico máximo y mínimo de las 3 fases aplicando los 3 tipos de pararrayos

VALOR MÁXIMO			
Tipo Pararrayos	TRV Fase "A" kV	TRV Fase "B" kV	TRV Fase "C" kV
444	553.094	605.134	963.006
420	542.326	592.743	929.120
396	531.307	580.535	901.818
Sin Pararrayos	608.623	635.782	1,061.000
VALOR MÍNIMO			
Tipo Pararrayos	TRV Fase "A" kV	TRV Fase "B" kV	TRV Fase "C" kV
444	-970.894	-937.894	-752.889
420	-938.503	-905.362	-731.167
396	-907.893	-875.002	-709.249
Sin Pararrayos	-1,060.970	-1,001.130	-803.297

Tabla 4.13 TRV en p.u. valor máximo y mínimo de las 3 fases aplicando los 3 tipos de pararrayos

VALOR MÁXIMO			
Tipo Pararrayos	TRV Fase "A"	TRV Fase "B"	TRV Fase "C"
	p.u	p.u	p.u
444	1.35	1.48	2.36
420	1.33	1.45	2.28
396	1.30	1.42	2.21
Sin Pararrayos	1.49	1.56	2.60

VALOR MÍNIMO			
Tipo Pararrayos	TRV Fase "A"	TRV Fase "B"	TRV Fase "C"
	p.u	p.u	p.u
444	-2.38	-2.30	-1.84
420	-2.30	-2.22	-1.79
396	-2.22	-2.14	-1.74
Sin Pararrayos	-2.60	-2.45	-1.97

El pararrayos de voltaje nominal de 396 kV_{rms} reduce en un 15% y un 11.71% el valor pico máximo y mínimo respectivamente de la fase "C".

Durante la operación, los pararrayos de cada una de las fases absorben cierta cantidad de energía para lograr mitigar los altos valores de TRV, es decir, que por cada maniobra de apertura del reactor, el pararrayos físicamente cuenta una descarga. Como se puede observar en la Figura 4.17, el pararrayos de 396 kV absorbe mayor cantidad de energía en comparación a los pararrayos de 420 kV y 444 kV.

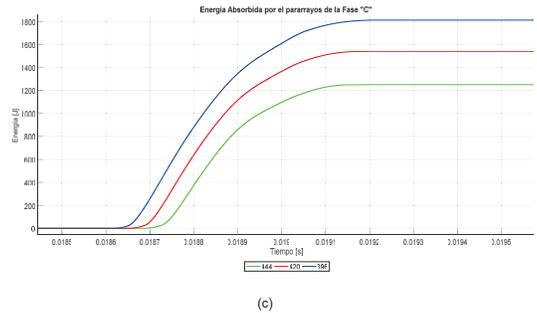
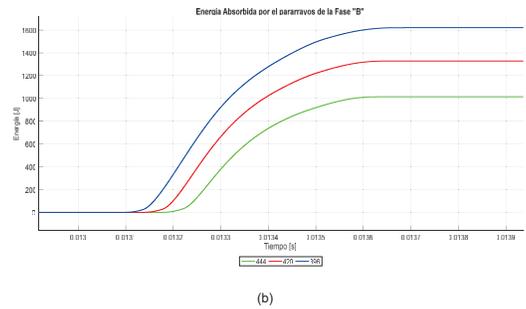
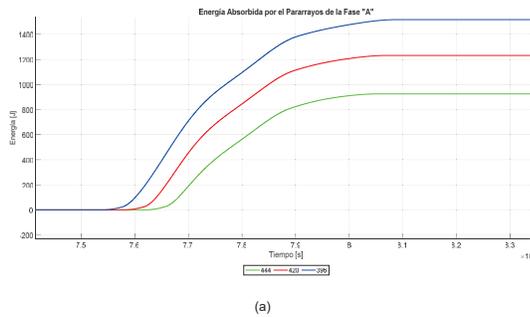


Figura 4.17 Energía absorbida por los pararrayos de cada una de las fases (a) Fase "A" (b) Fase "B" (c) Fase "C"

Aplicación de capacitores grading para control de TRV

a) Capacitor grading fase - tierra

En la Figura 4.18 se muestra la implementación del capacitor grading en ATPDraw el cual se hace uso para el presente análisis.

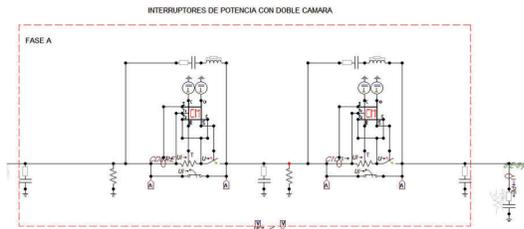


Figura 4.18 Implementación del capacitor grading en ATPDraw

Como se pudo observar en la sección anterior, para el presente caso de estudio el valor de TRV obtenido excede el valor de 2 p.u., por lo tanto el pararrayos tiene un impacto significativo en cuanto a la reducción de los picos de sobrevoltaje, ya que generalmente suprime sobrevoltajes que pueden estar por los valores de 2 o 3 p.u. que se asemejan a los sobrevoltajes atmosféricos.

Otra forma de controlar estos sobrevoltajes, es mediante la instalación de capacitores monofásicos en cada una de las fases, lo que evita la posible reignición en la mayoría de los interruptores. Los capacitores recomendados en [19] para control de TRV, oscilan entre 100-1500 pF.

Para el presente trabajo de titulación se hace uso de capacitores de 1500 pF, el cual es un valor de capacitancia similar a lo que recomienda la norma C37.011-2011 - IEEE Guide for the Application of Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers, para transformadores de potencial capacitivo, para un nivel de voltaje de 500 kV.

La incorporación del capacitor a la salida del interruptor, permite la reducción de la tasa de recuperación de voltaje (RRRV); sin embargo, debido a la frecuencia a la cual oscila el TRV, que depende de la frecuencia natural del circuito y que llega hasta un valor de 2 kHz, hace que el capacitor entre en un proceso de carga y descarga, el cual da como resultado el retraso del valor máximo de TRV. Es decir, el TRV disminuye su frecuencia de oscilación; sin embargo, por el efecto de carga y descarga que se produce, el capacitor hace que el valor máximo del voltaje de recuperación aumente, como se muestra en la Figura 4.19.

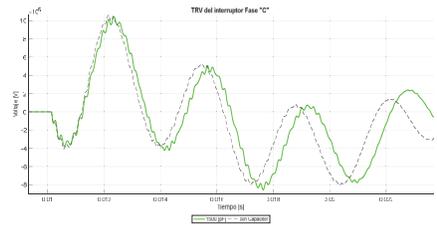
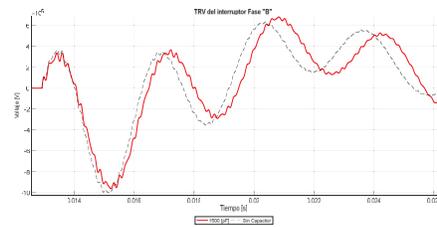
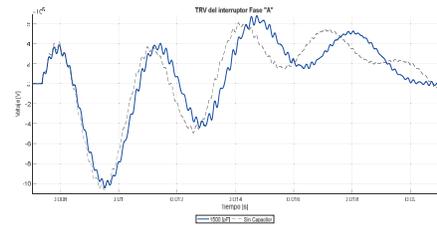


Figura 4.19 TRV medido entre los terminales del interruptor de potencia de las 3 fases (a) Fase "A" (b) Fase "B" (c) Fase "C".

En la Figura 4.19 para las fases "A" y "B" el efecto de los capacitores ocasiona un valor mayor en el tercer pico del TRV. Usar un capacitor de mayor medida, no aportaría en nada a la mitigación de TRV y los valores de hasta 100 pF únicamente se recomiendan para voltajes menores de 245 kV [19]. Los valores de TRV obtenidos se pueden observar en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Comparación del Voltaje Pico Máximo y Mínimo de TRV, tomado entre los terminales del interruptor.

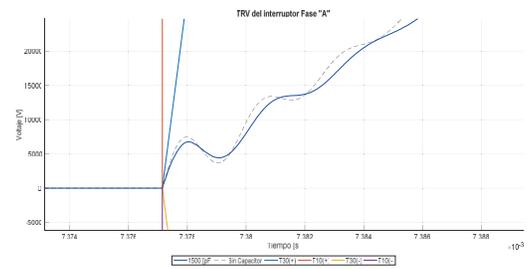
	Valor máximo		Valor mínimo	
	kV	p.u.	kV	p.u.
TRV A CAPACITOR	680.776	1.67	-1,043.250	-2.56
TRV B CAPACITOR	681.929	1.67	-963.422	-2.36
TRV C CAPACITOR	1,041.330	2.55	-856.220	-2.10
TRV A	608.623	1.49	-1,060.970	-2.60
TRV B	635.782	1.56	-1,001.130	-2.45
TRV C	1,061.000	2.60	-803.297	-1.97

De igual forma que en la sección anterior se hace uso de la Ecuación 4.4, para establecer la reducción del pico del TRV obtenido en este método y los obtenidos en el caso original (sin aplicación de métodos de control).

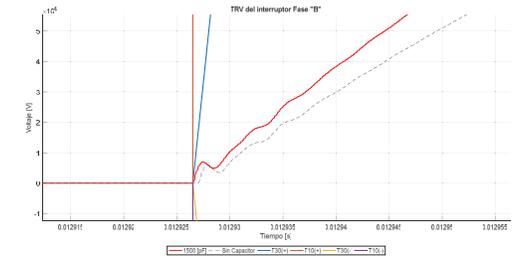
Como resultado se tiene una reducción del voltaje pico máximo del TRV y un incremento en el valor pico mínimo, de 1.85 % y de 6.58 %, respectivamente de la fase "C". Del análisis realizado se observa también que las ventajas principales de los capacitores utilizados son:

- Reducir la tasa de crecimiento del TRV (RRRV) durante los primeros milisegundos en donde del TRV presenta los primeros picos de voltaje y,
- Evitar el escalonamiento de voltaje.

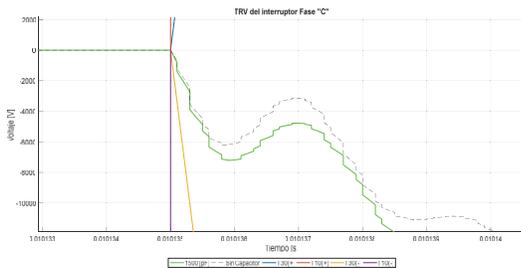
Reducir los primeros picos de TRV permite evitar la reignición o el reencendido del arco eléctrico como se observa en la Figura 4.20.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.20 Primeros picos del TRV de las tres fases (a) Fase "A" (b) Fase "B" (c) Fase "C"

Como se puede observar en la Figura 4.20, aunque la magnitud de voltaje que se presenta durante los primeros picos es un valor pequeño comparado con 500 kV, si es suficiente para generar una reignición en caso de que el TRV exceda las curvas de soportabilidad del interruptor.

De los resultados obtenidos se observa que el método del capacitor fase – tierra (grading) es aplicable para reducir únicamente los primeros picos del TRV, lo que se consigue a través de la reducción de la tasa de crecimiento (RRRV) y aumentando el tiempo de retraso del TRV del lado del reactor (Figura 4.19). La reducción de la tasa RRRV se muestra en la Tabla 4.15., sin embargo observando los resultados en la Fase "C" se puede evidenciar como el RRRV no disminuye sino aumenta.

Tabla 4.15 RRRV obtenido del método del capacitor fase - tierra

	Fase A	Fase B	Fase C
	kV/us	kV/us	kV/us
Sin Capacitor	7.45	6.99	-6.91
Con Capacitor	6.75	3.45	-8.02

b) Capacitor grading paralelo al interruptor

En la Figura 4.21 se muestra la implementación del capacitor grading en ATPDraw el cual se hace uso para el presente análisis.

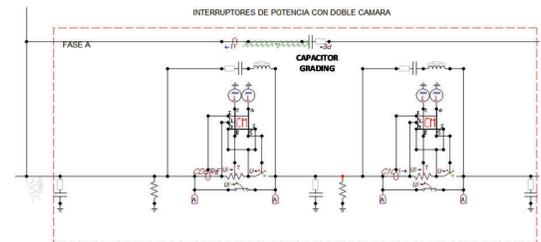
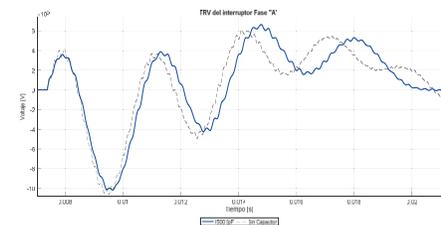


Figura 4.21 Implementación del capacitor grading conectado entre los terminales del interruptor en ATPDraw.

La referencia [19] recomienda el uso de capacitores grading fase – tierra del lado del reactor, o también conectados entre los terminales del interruptor de potencia, permitiendo así la disminución de la frecuencia de oscilación y el RRRV del TRV del lado del reactor.

Por lo tanto, el siguiente análisis considera un capacitor por fase conectado entre los terminales del interruptor, manteniendo el mismo valor de capacitancia considerado en el método anterior, es decir, 1500 pF.



(a)

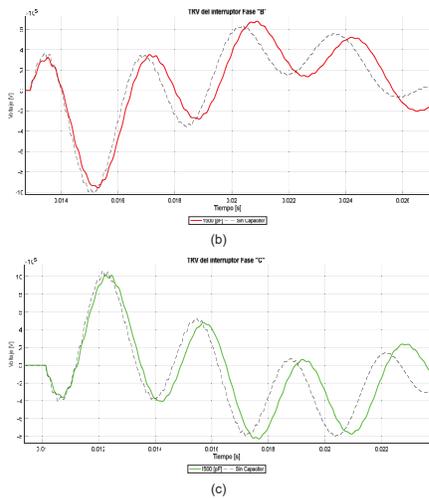


Figura 4.22 TRV medido en los terminales del interruptor de potencia, sin capacitor y capacitor conectado entre los terminales del interruptor (a) Fase "A" (b) Fase "B" (c) Fase "C"

Tabla 4.16 Valor pico máximo y mínimo del TRV medido entre los terminales del interruptor, de las 3 fases.

	VALOR PICO DEL TEV			
	MÁXIMO		MÍNIMO	
	V	p.u.	V	p.u.
TRV A CAPACITOR	664.080	1.63	-1,017.900	-2.49
TRV B CAPACITOR	679.359	1.66	-959.124	-2.35
TRV C CAPACITOR	1,019.970	2.50	-829.472	-2.03
TRV A	608.623	1.49	-1,060.970	-2.60
TRV B	635.782	1.56	-1,001.130	-2.45
TRV C	1,061.000	2.60	-803.297	-1.97

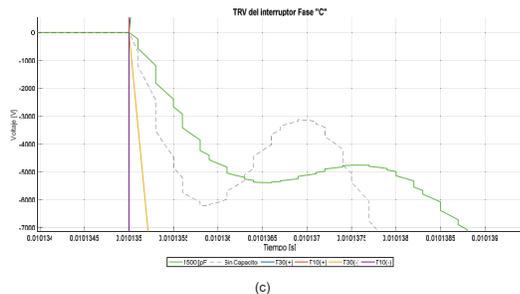


Figura 4.23 Primer pico del TRV de las 3 fases (a) Fase "A" (b) Fase "B" (c) Fase "C", comparación de los métodos de conexión de capacitores grading.

La reducción en el primer pico del TRV se puede observar en la Figura 4.23, debido a que la forma de onda obtenida posee una pendiente (RRRV) menor en comparación con aquella registrada al no aplicar ningún método de control. Esto permite que los valores del TRV sean menores al caso original, como se muestra en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17 RRRV obtenido del método capacitor conectado en paralelo al interruptor

	Fase A	Fase B	Fase C
	kV/us	kV/us	kV/us
Sin Capacitor	7.45	6.99	-6.91
Con Capacitor	3.17	1.50	-1.00

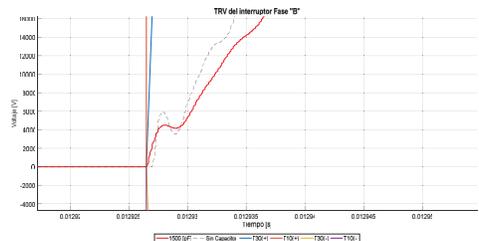
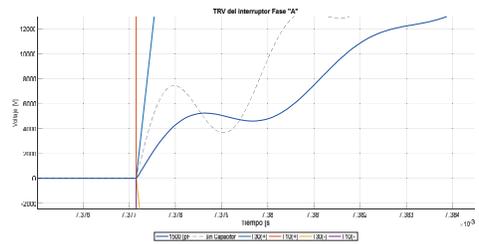
Aplicación de mando sincronizado para la apertura del interruptor

El desarrollo tecnológico en el área de la conmutación sincronizada, permite controlar el instante de separación de contacto de cada polo del interruptor, a fin de evitar la reignición del arco eléctrico después de la desconexión de cargas inductivas [25].

Esto se logra mediante el monitoreo de la señal de corriente que pasa a través de los polos del interruptor en la posición cerrada. Cuando se da una orden de apertura, un circuito electrónico procesa la información recibida del transformador de corriente para elegir el instante de activación de apertura de la bobina de cada polo, con el fin de asegurar que la distancia a través de los contactos, en el momento en que la corriente cruza por cero, sea lo suficientemente larga como para evitar que exista reignición del arco.

De igual forma que en la sección anterior se hace uso de la Ecuación 4.4, para establecer la reducción del pico del TRV obtenido en este método y los obtenidos en el caso original (sin aplicación de métodos de control).

En cuanto a los resultados obtenidos con el presente método y en comparación a los obtenidos con el método del capacitor fase – tierra (ver Tabla 4.14), la reducción de los picos del TRV es aún mayor, como se puede observar en la Tabla 4.16 y en la Figura 4.22. Tomando como ejemplo comparativo la fase "C", en el método anterior, se tiene una reducción del valor pico máximo de 1.85 %, en comparación con el método actual, en donde se tienen una reducción de 3.86 %. En general se tiene una reducción mayor en la segunda forma de conexión del capacitor que en la primera forma de conexión, como se puede evidenciar en la Figura 4.23.



Para diseñar este tipo de sincronización se debe considerar que el sobrevoltaje generado el momento de la apertura de los polos no sobrepase el límite de soportabilidad, evitando de esta manera la reignición del arco eléctrico. Para ello, se establecen zonas seguras de operación dadas en amperios o su equivalente en milisegundos, considerando la onda de corriente variable en el tiempo [29].

Para los interruptores modernos la zona segura para una interrupción sin reignición es menor a 3 ms, como se muestra en la Figura 4.24 [29].

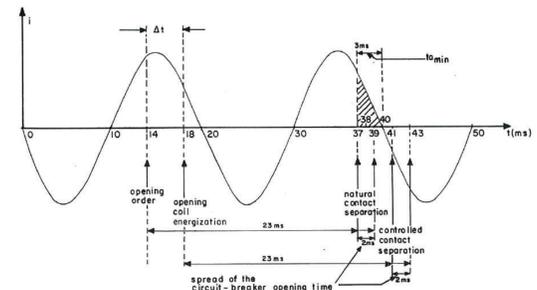


Figura 4.24 Corriente de una fase del interruptor y tiempos de separación de los contactos, con conmutación sin control y conmutación con mando sincronizado [17].

Como consecuencia de la disminución de la corriente de corte (I_{br}), el TRV medido entre los terminales del interruptor disminuye en su valor pico, en cada una de las 3 fases como se muestra en la Figura 4.25, en la cual se muestra el TRV obtenido considerando corrientes I_{br} de: 10, 12, 14 y 16 A. De esta misma figura se observa que, mientras la apertura sea más próxima al cruce por cero de corriente, el TRV disminuye y queda por debajo de la curva de soportabilidad del interruptor (ver Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12 y Figura 4.13).

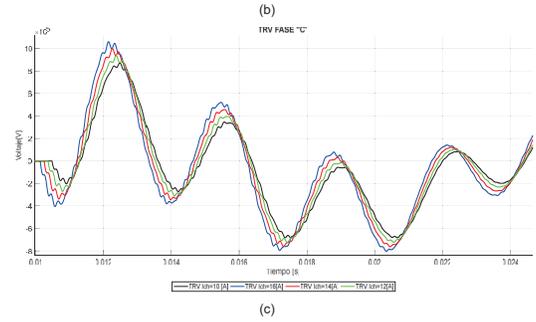
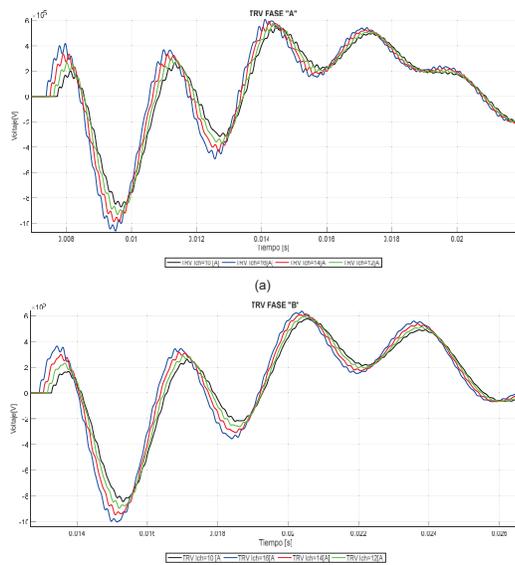


Figura 4.25 Resultado gráfico aplicando mando sincronizado durante la apertura del interruptor del reactor de barra, de la fase "A", "B" y "C".

La aplicación de interruptores de mando sincronizado, permite obtener los siguientes resultados.

Tabla 4.18 Valor pico máximo del TRV.

I _{ch}	FASE A	FASE B	FASE C
	VOLTAJE kV	VOLTAJE kV	VOLTAJE kV
10	556.8030	575.4910	873.6570
12	575.0410	593.0340	937.2730
14	592.1340	614.9110	999.6000
16	608.7500	635.7770	1,061.0900

Tabla 4.19 Valor pico mínimo del TRV.

I _{ch}	FASE A	FASE B	FASE C
	VOLTAJE kV	VOLTAJE kV	VOLTAJE kV
10	-871.5490	-843.7020	-686.1960
12	-930.3790	-895.3530	-723.5720
14	-988.5820	-946.6580	-763.7870
16	-1,061.2800	-1,001.5700	-803.5120

Tabla 4.20 Tiempos de apertura de la corriente de corte.

FASES	Cruce por 0 ms	Corriente de corte			
		10 A ms	12 A ms	14 A ms	16 A ms
A	8.2752	7.7204	7.6070	7.4931	7.3766
B	13.8350	13.2740	13.1598	13.0438	12.9265
C	11.0410	10.4810	10.3660	10.2510	10.1350

Como se puede observar en la Tabla 4.18 y la Tabla 4.19, mientras más próximo sea la apertura del interruptor al cruce por cero, el valor del TRV será menor, es así que si se tiene un nivel de I_{ch} de 16 A se tendrá un valor de TRV de 608.75 kV y si se tiene I_{ch} de 10 A éste valor disminuye a 556.8030 kV.

Tabla 4.21 Resultados del tiempo de apertura del interruptor de las 3 fases.

FASES	Corriente de corte			
	10 A ms	12 A ms	14 A ms	16 A ms
A	0,5548	0,6682	0,7821	0,8986
B	0,5610	0,6752	0,7912	0,9085
C	0,5600	0,6750	0,7900	0,9060

De los resultados obtenidos en la Tabla 4.20 y la Tabla 4.21, se puede observar el tiempo de apertura del interruptor de cada una de las 3 fases y la diferencia de tiempo que existe en cada uno comparada con el cruce por cero respectivamente, dando como resultado un tiempo de apertura menor a 1 ms, para cada una de las fases.

4.4. Operación de apertura del reactor en condición de demanda mínima

En el análisis de demanda mínima se empleará el mismo procedimiento que demanda máxima, modificando únicamente el equivalente de fuente.

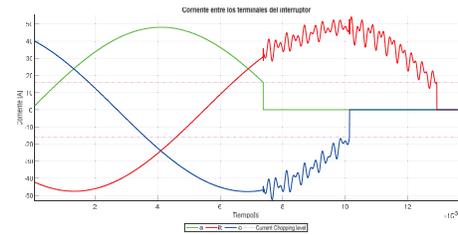
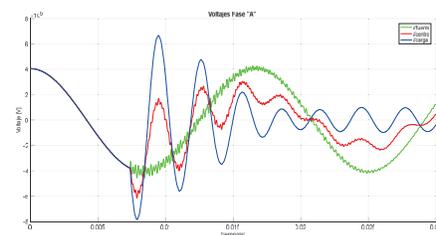


Figura 4.26 Operación de apertura del Interruptor I_{ch} de 16 A

De igual forma que en el caso de demanda máxima se eligen diferentes valores de la corriente de corte (current chopping), de los cuales se obtendrá diferentes respuestas de TRV, el análisis se basará en base a las peores condiciones del sistema, como se muestra en la Figura 4.26.

Debido a la interrupción prematura al cruce por cero de la corriente se produce una diferencia de voltaje entre la carga y la fuente, lo cual produce el TRV entre los terminales del interruptor como se muestra en la Figura 4.27 y ocasionando una diferencia de voltaje como se ve en la Figura 4.28.



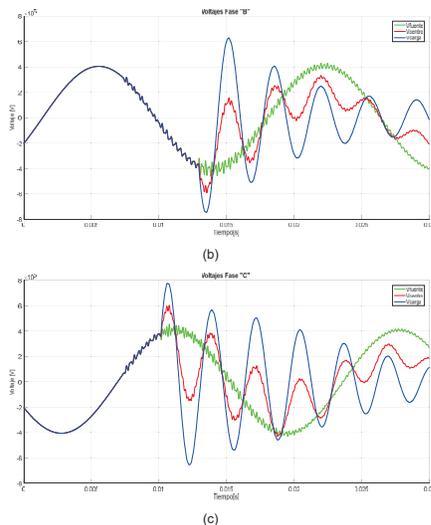


Figura 4.27 Voltaje de lado de la fuente, voltaje en el centro de las cámaras del interruptor y voltaje de lado de la carga (a) Fase A (b) Fase B (c) Fase C

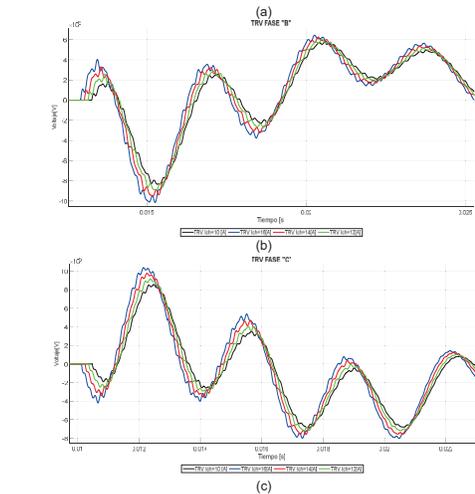
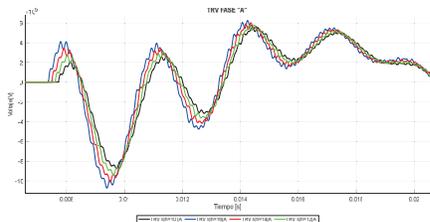


Figura 4.28 TRV medido entre los terminales del interruptor de potencia para I_{cn} de 10, 12, 14 y 16 A. (a) Fase "A" (b) Fase "B" (c) Fase "C".

Aplicación de curvas de soportabilidad de interruptores de potencia, para control de TRV

Para el presente análisis, únicamente se presenta la tabulación de resultados mientras que los resultados gráficos se muestran en el ANEXO IV.

Tabla 4.22 Valor pico de TRV de las 3 fases, para un I_{cn} de 16 A.

	Fase "A"	Fase "B"	Fase "C"
Voltaje TRV MV	-1.072	-1.015	1.038

Como se muestra en las figuras del ANEXO IV, Figura A4. 1, Figura A4.2 y Figura A4.3, los primeros microsegundos del TRV en las tres fases no existe una posibilidad de reignición, dado que el TRV no excede la curva de soportabilidad del interruptor, sin embargo los valores picos (máximos y mínimos) del TRV para las fases "A" y "C", exceden

el límite de soportabilidad del interruptor antes del $\frac{1}{4}$ de ciclo, lo que puede llevar a una reignición del arco eléctrico, esto se puede apreciar con los valores obtenidos en la Tabla 4.22 en comparación con los límites de soportabilidad de los interruptores tipo: T10 en donde el límite de soportabilidad es de 1.03 MV y para el interruptor tipo T30 el límite es de 899 kV, como se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.23 Valor pico de TRV de las 3 fases, para un I_{cn} de 14 A.

	Fase "A"	Fase "B"	Fase "C"
Voltaje TRV [MV]	-1.007	-0.95081	0.97795

En base a los datos obtenidos en la Tabla 4.23 y comparados con la capacidad de los interruptores tipo T10 y T30 las 3 fases no exceden la capacidad dieléctrica, ya que el TRV está por debajo de la envolvente T10, sin embargo si excede las envolventes de T30.

Tabla 4.24 Valor pico de TRV de las 3 fases, para un I_{cn} de 12 A.

	Fase "A"	Fase "B"	Fase "C"
Voltaje TRV kV	-942.48	-890.52	917.85

Finalmente para un nivel de corriente de corte de 12 A, se tiene que las 3 fases no exceden la envolvente del interruptor T10 en ninguna de las 3 fases, sin embargo el TRV si excede la envolvente del interruptor tipo T30, en las fases "A" y "C" (ver Tabla 4.24).

Aplicación de pararrayos para control de TRV

La implementación del presente método en ATP, es similar al mostrado en la Figura 4.14.

Para el caso de demanda mínima, los valores mínimos y máximos obtenidos en el análisis son los que se muestran en la Tabla 4.25.

Tabla 4.25 Valor pico máximo y mínimo del TRV medido entre los terminales del interruptor de las 3 fases, sin la aplicación del pararrayos

		Fase "A"	Fase "B"	Fase "C"
		Vmax	kV 624.855	644.413
	p.u	1.53	1.58	2.54
Vmin	kV	-1,072.660	-1,015.560	-802.504
	p.u	2.63	2.49	1.97

El análisis se aplica únicamente al caso de I_{cn} de 16 A, dado que es el caso más crítico que se tiene, los resultados obtenidos se observan en la Tabla 4.26.

Tabla 4.26 TRV valor máximo y mínimo de la Fase "C" aplicando los 3 tipos de pararrayos

VALOR MÁXIMO			
Tipo Pararrayos	TRV Fase "A" V	TRV Fase "B" V	TRV Fase "C" V
444	576104	611912	947448
420	561352	597596	914826
396	547243	584924	883848
Sin Pararrayos	624855	644413	1038530
VALOR MÍNIMO			
Tipo Pararrayos	TRV Fase "A" V	TRV Fase "B" V	TRV Fase "C" V
444	-976412	-959847	-758136
420	-940997	-933037	-738973
396	-906188	-906711	-719611
Sin Pararrayos	-1072660	-1015560	-802504

Tabla 4.27 TRV en p.u. valor máximo y mínimo de las 3 fases aplicando los 3 tipos de pararrayos

VALOR MÁXIMO			
Tipo Pararrayos	TRV Fase "A" p.u	TRV Fase "B" p.u	TRV Fase "C" p.u
444	1.41	1.50	2.32
420	1.38	1.46	2.24
396	1.34	1.43	2.16
Sin Pararrayos	1.53	1.58	2.54
VALOR MÍNIMO			
Tipo Pararrayos	TRV Fase "A" p.u	TRV Fase "B" p.u	TRV Fase "C" p.u
444	2.39	2.35	1.86
420	2.30	2.29	1.81
396	2.22	2.22	1.76
Sin Pararrayos	2.63	2.49	1.97

Para el análisis se hace uso de la Ecuación 4.4 determinando así el porcentaje de reducción del valor pico máximo y mínimo del TRV.

En base a los datos obtenidos de la Tabla 4.27, la reducción del valor pico máximo del TRV obtenida con la aplicación del pararrayos de 396 kV para la fase "A" es de 15.52%, para la fase "B" es de 10.72% y para la fase "C" se tiene una reducción de 14.89%, estos resultados únicamente considerando los valores picos más altos, para las fases "A" y "B", son los picos negativos y para la fase "C" es el pico positivo, como se muestra en el ANEXO IV, Figura A4.6.

Aplicación de capacitores grading para control de TRV

El estudio considera un capacitor de 1500 pF.

a) Capacitor grading fase – tierra

Los resultados obtenidos, que se muestran en la Tabla 4.28 mediante la instalación de un capacitor fase – tierra a la salida del interruptor, se obtiene una reducción de 4.2% para el pico mínimo de la fase "A", 1.35% para el pico mínimo de la fase "B" y para el pico máximo de la fase "C" se tiene una reducción del 1.2%.

Las gráficas resultantes se muestran en el ANEXO IV, en la Figura A4.7 y Figura A4.8.

Tabla 4.28 Comparación del voltaje pico máximo y mínimo de TRV, tomado entre los terminales del interruptor.

	VOLTAJE 1 FASE			
	Valor Máximo		Valor mínimo	
	V kV	p.u	V kV	p.u
TRV A CAPACITOR	676.443	1.66	-1,027.700	-2.52
TRV B CAPACITOR	696.768	1.71	-1,001.830	-2.45
TRV C CAPACITOR	1,026.040	2.51	-847.848	-2.08
TRV A	624.855	1.53	-1,072.660	-2.63
TRV B	644.413	1.58	-1,015.560	-2.49
TRV C	1,038.530	2.54	-802.504	-1.97

Tabla 4.29 RRRV Obtenido del método capacitor fase – tierra.

	Fase A	Fase B	Fase C
	kV/us	kV/us	kV/us
Sin Capacitor	9.44	8.33	-9.03
Con Capacitor	7.60	7.07	-11.42

Además de los resultados obtenidos del RRRV que se muestran en la Tabla 4.29, para las fases "A" y "B", existe una reducción de la tasa de crecimiento, sin embargo para la fase "C", no hay reducción dado que el valor obtenido con la aplicación es de -11.42 kV/μs, comparada con el caso original el cual es de -9.03 kV/μs.

b) Capacitor grading paralelo al interruptor

El capacitor conectado entre los terminales del interruptor en el caso de demanda mínima, permite obtener resultados que muestran: una reducción del 4.5% para el pico mínimo de la fase "A", 5.26% para el pico mínimo de la fase "B" y 0.73% para el pico máximo de la fase "C".

Las gráficas resultantes se muestran en el ANEXO IV, Figura A4.9 y Figura A4.10.

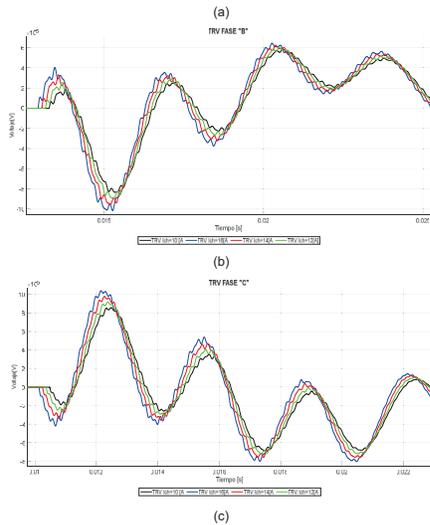


Figura 4.29 Ilustración del mando sincronizado durante la apertura del interruptor del reactor de barra, de la fase "A", "B" y "C".

Los resultados obtenidos en el presente análisis son los que se muestran a continuación.

Tabla 4.32 Valor pico máximo del TRV

Ich	FASE A	FASE B	FASE C
	VOLTAJE kV	VOLTAJE kV	VOLTAJE kV
10	556.3290	585.4300	857.2010
12	579.0010	605.9760	917.8550
14	602.1500	625.7170	977.9530
16	624.8550	644.4130	1,038.5300

Tabla 4.30 Comparación del voltaje pico máximo y mínimo de TRV, tomado entre los terminales del interruptor

	VOLTAJE			
	Valor Máximo		Valor mínimo	
	kV	p.u	kV	p.u
TRV A CAPACITOR	663.099	1.62	-1,024.450	-2.51
TRV B CAPACITOR	682.709	1.67	-962.110	-2.36
TRV C CAPACITOR	1,030.920	2.53	-842.032	-2.06
TRV A	624.855	1.53	-1,072.660	-2.63
TRV B	644.413	1.58	-1,015.560	-2.49
TRV C	1,038.530	2.54	-802.504	-1.97

Tabla 4.31 RRRV Obtenido del método capacitor paralelo al interruptor

	Fase A	Fase B	Fase C
	kV/μs	kV/μs	kV/μs
Sin Capacitor	9.33	8.33	-9.03
Con Capacitor	3.48	3.04	-1.00

De los resultados obtenidos en la Tabla 4.31, se tiene una reducción significativa del RRRV, para cada una de las 3 fases.

Aplicación de mando sincronizado para la apertura del interruptor

Similar a los resultados obtenidos en el análisis de demanda máxima, la implementación de un mando sincronizado para su uso durante la apertura del reactor de barra, permite disminuir los altos valores del TRV y mantener estos mismos por debajo de la curva de soportabilidad de los interruptores tipo T10 y T30, como se muestra en la Figura 4.29.

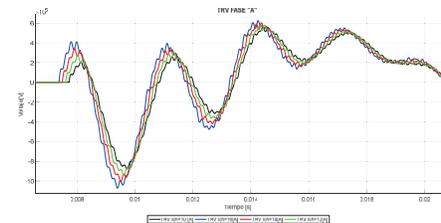


Tabla 4.33 Valor pico mínimo del TRV

Ich	FASE A	FASE B	FASE C
	VOLTAJE kV	VOLTAJE kV	VOLTAJE kV
10	-876.7510	-833.8030	-687.5510
12	-942.4850	-890.5240	-722.0810
14	-1,007.7300	-950.8160	-756.4420
16	-1,072.6600	-1015.5600	-802.5040

A medida que la operación de apertura del interruptor se aproxima al cruce por cero, menor será el valor pico máximo o mínimo del TRV, como se muestra en la Tabla 4.32 y la Tabla 4.33.

Tabla 4.34 Tiempos de apertura de la corriente de corte

FASES	Corriente de corte				
	Cruce por 0 ms	10 A ms	12 A ms	14 A ms	16 A ms
A	8.2752	7.7179	7.6049	7.4906	7.3738
B	13.8350	13.2720	13.1570	13.0410	12.9240
C	11.0410	10.4790	10.3650	10.2500	10.1320

Tabla 4.35 Resultados del tiempo de apertura del interruptor de las 3 fases

FASES	Corriente de corte			
	10 A ms	12 A ms	14 A ms	16 A ms
A	0.5573	0.6703	0.7846	0.9014
B	0.5630	0.6780	0.7940	0.9110
C	0.5620	0.6760	0.7910	0.9090

De los resultados obtenidos en la Tabla 4.34 y la Tabla 4.35, en donde se puede observar el tiempo de apertura del interruptor de cada una de las 3 fases y la diferencia de tiempo que existe en cada uno comparadas con el cruce por cero respectivamente, dando como resultado un tiempo de apertura menor a 1 ms, para cada una de las fases.

4.5. Discusión de resultados

De los resultados obtenidos, se realiza un resumen, el cual hace un análisis comparativo para cada uno de los métodos aplicados al caso de estudio.

La discusión de resultados se enfocara, para un I_{ch} de 16 A, sin embargo en el caso de las curvas de soportabilidad y mando sincronizado, si se considera los demás niveles de corriente desde 10 A hasta los 16 A.

Se hace uso de los resultados obtenidos en el escenario de demanda máxima.

Tabla 4.36 Discusión de resultados

Método de control para el sobrevoltaje (TRV)	Resultados obtenidos	Ventaja	Desventaja
Ninguno	Para un nivel de I_{ch} de 16 A, se tiene que en la fase "C", un valor pico máximo del TRV de 1.061 MV, siendo este valor el más crítico de las 3 fases, es decir sobrepasa el 2 p.u. Posible reignición del arco eléctrico, ya que el TRV excede la soportabilidad del interruptor tipo T10 y T30 antes del ¼ de ciclo del voltaje.	Ninguna	<ul style="list-style-type: none"> Escalonamiento de Voltaje. Reignición del arco eléctrico. Daño en los equipos.
Curvas de soportabilidad	Límite de soportabilidad del interruptor tipo T10 es de 1.03 MV y T30 es de 899 kV. I_{ch} =16 A, el valor pico máximo del TRV de la fase "C" es de 1.061 MV y el valor pico mínimo de la fase "A" es de 1.069 MV. Para I_{ch} que está entre 10 a 14 A, los valores de TRV obtenidos están por debajo del límite de soportabilidad del interruptor T10.	El aumento de la capacidad de extinción del arco eléctrico, garantiza que el TRV será mitigado adecuadamente y evita posibles reigniciones y reencendidos.	El aumento de capacidad del interruptor requiere mayor espacio físico en caso de que la subestación este ya operativa.
Pararrayos	En este caso el pararrayos corta únicamente los picos del TRV, como ejemplo se ilustra la fase "C", ya que en esta fase se tiene el valor más alto y es el valor pico máximo de 1.061 MV. Empleando los 3 tipos de pararrayos, clase 4 de Ur 550 kV con un voltaje nominal de red de 396 kV, 420 kV y 440 kV, cortan al pico hasta los siguientes valores 901.81 kV, 929.12 kV y 963 kV respectivamente, estos resultados se muestran en la Tabla 4.12.	Permite el corte de los picos sean estos máximos o mínimos del TRV.	El pararrayos no ayuda a reducir la tasa de crecimiento del TRV (RRRV).
Capacitor grading fase-tierra	Como ejemplo ilustrativo se usa los valores obtenidos de la fase "C", los demás valores se muestran en la Tabla 4.14. El valor pico máximo obtenido es de 1.061 MV. Y su RRRV, sin capacitor es de 6.91 kV/µs y con el capacitor instalado es de 8.02 kV/µs, obteniendo como resultado el aumento del RRRV.	Debe ser instalado en el terminal del lado del reactor, dado que va conectado entre F-N, su instalación sería fácil, debido al espacio físico requerido.	Su capacidad de reducir el RRRV, comparada con el capacitor conectado entre los terminales del interruptor, es menor.

90

Método de control para el sobrevoltaje (TRV)	Resultados obtenidos	Ventaja	Desventaja
Capacitor grading paralelo al interruptor	La diferencia con el método anterior es la conexión del capacitor, de igual forma se hace uso de los resultados de la fase "C", con un valor pico máximo de 1.061 MV, el RRRV obtenido sin la aplicación del capacitor es de 6.91 kV/µs y aplicando el capacitor la tasa de crecimiento se reduce a 1 kV/µs.	En comparación con el capacitor F-N, este método permite una mayor reducción del RRRV, permitiendo atenuar más la curva y reduciendo sus picos.	La desventaja se presentaría en subestaciones operativas, ya que probablemente no se tenga disponibilidad del espacio físico requerido.
Mando Sincronizado	Dado la naturaleza del arco eléctrico, forzar su apertura justamente en el cruce por 0, resulta casi imposible, por lo tanto se considera un rango de análisis desde un I_{ch} de 10 A hasta el caso más crítico, el cual es 16 A, si la apertura resulta ser exitosa en 10 A, para la fase "C" se tienen un valor pico máximo del TRV de 873.65 kV, comparado con el caso de I_{ch} de 16 A el cual tiene el valor de 1.061 MV.	Permite estimar, en que rango de tiempo debe estar la apertura del interruptor y así evitar altos valores del TRV.	Adecuado solo para interruptores mecánicos con tiempos de arco mínimos; requiere una operación independiente en el polo, lo que aumenta el costo del interruptor.

91

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El estándar [19], recomienda la Ecuación 4.1, para el cálculo de la corriente de corte I_{ch} , aplicado a la configuración analizada en el caso de estudio, permite estimar una corriente de 10 A; sin embargo, considerando las peores condiciones posibles durante la operación de apertura del interruptor, se estima aún más este nivel de corriente hasta 16 A apoyado en los resultados obtenidos en [24]. Para conseguir esta variación de la corriente en la simulación, se hace uso del modelo combinado de Cassie y Mayr, ya que la combinación de ambos modelos, permiten manejar rangos más amplios de corrientes.
- Del análisis realizado a la operación de desenergización del reactor de barra que funciona a un nivel de 500 kV, se llega a tener un TRV de 1.06 MV, con una tasa de crecimiento 6.91 kV/µs, esto se debe al alto valor de inductancia que presenta el reactor de 30 MVA, lo que provoca que el TRV exceda los límites de soportabilidad de los interruptores y por consiguiente se tenga la presencia de reigniciones.
- Los 3 tipos de pararrayos empleados como método de control, con voltajes nominales de 444 kV, 420 kV y 396 kV, que pertenecen a la clase 4, con un voltaje máximo de red 550 kV, han permitido obtener diferentes resultados. Como ejemplo la fase "C", con una corriente estimada I_{ch} de 16 A y sin ningún método de control, tiene un TRV de 1.061 MV. Empleando los 3 tipos de pararrayos se tiene los siguientes valores de TRV para la misma fase: 901.81 kV, 929.12 kV y 963 kV de los pararrayos 396, 420 y 444 respectivamente. Es decir el pararrayos de 396 kV, corta 159 kV, ocasionando que el pico del TRV disminuya estando por debajo de los límites de capacidad del interruptor.
- Teniendo en cuenta el límite de soportabilidad de los interruptores tipo T10 y T30, los resultados muestran que para una corriente estimada I_{ch} de 16 A, el límite de soportabilidad del interruptor T10, el cual es de 1.03 MV, no es lo suficientemente capaz de soportar el TRV, dado que el valor más alto que se tiene es de 1.061 MV, excediendo con 29 kV el límite del interruptor. Sin embargo para los demás casos, los cuales tienen una corriente de I_{ch} entre 10 A y 14 A, controlar el TRV es posible, aumentando la capacidad del interruptor al máximo, el cual es un interruptor T10.
- Del análisis de los 2 estados de demanda, se obtienen diferentes valores de TRV, como ejemplo la fase "C"; el valor del TRV es de 1.061 MV y 1.038 MV, en demanda máxima y mínima respectivamente, de la fase "A" se obtiene -1.06 MV en demanda

92

- máxima y -1.072 MV en demanda mínima, se puede apreciar que su variación no es muy significativa, debido a lo siguiente: la carga en el caso de estudio no varía, en ambos análisis se hace uso del reactor de barra de 30 MVA y la configuración del circuito se mantiene, por lo tanto los métodos de control aplicados a los dos estados son exactamente iguales.
- Se muestra que con un capacitor grading de 1500 pF instalado a la salida del interruptor (en el terminal del lado del reactor) entre fase – tierra, existe un aumento del RRRV de 6.91 kV/µs a 8.02 kV/µs; Por lo tanto el presente método en la fase "C", no reduce el RRRV del TRV, siendo así un método no aplicable al caso de estudio.
 - Con un capacitor grading de 1500 pF, instalado paralelo al interruptor, es decir conectado entre los terminales, minimiza el riesgo de reignición, ya que reduce el RRRV del TRV de la fase "C" de 6.91 kV/µs a 1 kV/µs.
 - El uso de pararrayos permite el control de los altos valores del TRV, más no reduce su tasa de crecimiento, por lo tanto la frecuencia del TRV se mantiene.
 - De los resultados obtenidos del análisis del mando sincronizado en los dos casos de demanda, se puede decir que la operación de apertura para el presente caso de estudio debe darse cuando la corriente de corte está comprendida en un rango de 10 a 14 A y así poder evitar la reignición.
 - De los métodos analizados en el presente estudio, es recomendable el uso de una combinación de éstos métodos, es decir para reducir los valores picos máximos y mínimos se hace uso del método del pararrayos, para reducir el RRRV del TRV es recomendable el uso de un capacitor grading conectado entre los terminales del interruptor y si se requiere reducir el valor alto del TRV lo más recomendable es el aumento de la soportabilidad del interruptor.

5.2. RECOMENDACIONES

- Para realizar un análisis de TRV, se recomienda tomar en cuenta a todos los elementos constitutivos del sistema, como son las capacitancias e inductancias de los equipos (TC y TP); además, de la capacitancias parasitas de los interruptores así como del reactor de barra, ya que al considerar todos los elementos eléctricos se puede obtener una respuesta aproximada a un caso real.
- En futuras aplicaciones, si se requiere disminuir la tasa de crecimiento del TRV (RRRV), se recomienda, instalar un capacitor paralelo al interruptor, ya que este método permite reducir el RRRV, a valores muy bajos, como se muestra en el

93

presente caso de estudio, con un capacitor de 1500 pF, de un valor de 6.91 kV/μs a un valor de 1 kV/μs en la fase "C".

3. Si se requiere controlar los picos altos del TRV, se recomienda instalar un pararrayos del lado del reactor, será necesario realizar un análisis previo y determinar qué clase de pararrayo será necesario, considerando la capacidad de energía que puede absorber el pararrayos. Para un nivel de 500 kV, se recomiendan implementar el pararrayos clase 4, voltaje de red de 550 kV y con un voltaje máximo de 396 kV.
4. Para un nivel de voltaje de 500 kV, en caso de existir una subestación operativa y que tenga problemas durante la operación de desenergización del reactor de barra, con presencia de altos valores de TRV, la instalación de un capacitor paralelo al interruptor será la opción más recomendable, sin embargo se debe considerar el espacio físico que esto demanda.
5. Si el uso ya sea del pararrayos o el capacitor grading para el control del TRV no resultan efectivos, se recomienda revisar las pruebas realizadas por el fabricante al interruptor, ya que es muy posible que el valor de la corriente de corte sea demasiado alta, debida a un defecto del equipo, por lo tanto deberá ser reemplazado por un equipo que garantice niveles bajos de I_{br} .

94

a la obtención del título de Ingeniera Eléctrica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2011.

- [16] J. Martinez, *Power System Transients Parameter Determination*, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business., vol. 1. New York, United States of America: Taylor and Francis Group, LLC, 2010.
- [17] S. O. Frontin, *Equipamentos de alta tensão—prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas*, 1ª edição. Brasília: Goya Editora LTDA., 2013.
- [18] "IEEE Guide for the Application of Shunt Reactor Switching", *IEEE Std C37.015-2009 (Revision of IEEE Std C37.015-1993)*, pp. 1–70, feb. 2010.
- [19] "IEEE Guide for the Application of Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers", *IEEE Std C37.011-2011 (Revision of IEEE Std C37.011-2005)*, pp. 1–97, nov. 2011.
- [20] "IEEE Standard for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis - Preferred Ratings and Related Required Capabilities for Voltages Above 1000 V", *IEEE Std C37.06-2009*, pp. 1–46, nov. 2009.
- [21] "IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems", *IEEE Std C62.22™-2009 (Revision of IEEE Std C62.22-1997)*, pp. 1–143, jul. 2009.
- [22] E. Ruoss, *La coupure de faibles courants inductifs*. Sweden: S. Bemeryd, 1995.
- [23] Working Group 02 of Study Committee No. 13, "Interruption of small inductive currents", presentado en Papers presented in the name of the Study Committees, 1985, p. 39.
- [24] C. M. Portela, S. A. Morais, y J. S. Teixeira, "Circuit-breaker behaviour in reactor switching: applicability and limitations of the concept of chopping number", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, núm. 3, pp. 1009–1021, jul. 1988.
- [25] G. Bizjak, P. Zunko, y D. Povh, "Circuit breaker model for digital simulation based on Mayr's and Cassie's differential arc equations - IEEE Journals & Magazine", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, núm. 3, pp. 1310–1315, jul-1995.
- [26] "IEEE Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers", *IEEE Std C37.04-1999*, pp. 1–36, dic. 1999.
- [27] "IEEE C37.06-2009 - IEEE Standard for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis--Preferred Ratings and Related Required Capabilities for Voltages Above 1000 V". [En línea]. Disponible en: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/C37.06-2009.html>. [Consultado: 27-ago-2018].
- [28] M. Mariño y N. Elizabeth, "Coordinación de aislamiento en subestaciones a nivel de 500 Kv. (Artículo)", 2009.
- [29] S. A. Morais, "Considerations on the specification of circuit-breakers intended to interrupt small inductive currents.", presentado en ELECTRA-CIGRE-, 1993, pp. 45–56.
- [30] "Electrocables :: Caminos de Energía". [En línea]. Disponible en: <http://electrocable.com/productos/aluminios/ACAR.html>. [Consultado: 23-sep-2018].

96

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Rosero y L. Ruales, "Análisis del arco secundario en recierres monopolares en el sistema de transmisión de 500 kV", Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2014.
- [2] J. Hernandez, "Implementación de Modelos de Arco Eléctrico para Simulación de Interruptores de Potencia en el EMTP", Para obtener el Grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México, D. F., 2006.
- [3] J. Castaño y H. Rodríguez, "Impacto de Modelos del Arco Eléctrico de un Interruptor de Potencia en un Sistema Eléctrico", Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2015.
- [4] D. P. Landazuri Moreno y M. Rumipamba Yungan, "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, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2011.
- [5] M. Saldaña y M. Antonio, "Metodología para determinar las especificaciones técnicas de interruptores de potencia", *Universidad Nacional de Ingeniería*, 2010.
- [6] R. Barajas, "Modernización de Interruptores de Potencia de 400 kV en la Subestación Eléctrica Texcoco", Tesis para obtener el título de Ingeniero Electricista, Instituto Politécnico Nacional, Mexico, D. F., 2010.
- [7] J. Cuacuas, "Simulación de Interruptores de Potencia con gas SF6 en ATPDraw", Tesis para obtener el título de Ingeniero Electricista, Instituto Politécnico Nacional, México, D. F., 2010.
- [8] SIEMENS, "Interruptores de Potencia de alta tensión". [En línea]. Disponible en: <https://www.energy.siemens.com/us/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/circuit-breaker/PortfolioES.pdf>.
- [9] C. Ramírez, *Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión*, Segunda Edición. Colombia: Impresiones Gráficas Ltda., 1991.
- [10] E. MORENO y V. HINOJOSA, "ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA PARA EL SISTEMA ELÉCTRICO ECUATORIANO UTILIZANDO REDES NEURONALES ARTIFICIALES", Escuela Politécnica Nacional, Cenace, Quito, Ecuador, Técnico, 2012.
- [11] A. Pazmiño y F. Xavier, "Análisis de Compensación Reactiva Serie en la red de 230 kV del Sistema Nacional Interconectado Ecuatoriano", dic. 2012.
- [12] I. Pérez, "INTERRUPTORES DE POTENCIA Y EXTINCIÓN DEL ARCO ELÉCTRICO", Para acreditar la experiencia receptional de la carrera, Universidad de Veracruz, C.D. MENDOZA., VER., 2012.
- [13] R. Saavedra y G. Adolfo, "Modelado del Interruptor de Potencia", Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Electricista, Universidad de los Andes, Mérida, 2008.
- [14] C. Wagner y H. Smith, "Analysis Of Transient Recovery Voltage (TRV) Rating Concepts", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, núm. 11, pp. 3353–3363, nov. 1984.
- [15] D. Landazuri y M. Rumipamba, "Estudio y Propuesta de un Tipo de Interruptor a ser Implementado en la Línea de 500 kV Mediante la Modelación en ATP", Proyecto previo

95

7. ANEXOS

ANEXO I. Implementación de los cables de conexión entre reactor y elementos asociados usando modelos dependientes de frecuencia.

ANEXO II. Programación del modelo combinado de Cassie-Mayr para el arco eléctrico.

ANEXO III. Caso de estudio implementado en ATP y diagrama unifilar

ANEXO IV. Resultados gráficos obtenidos del análisis de demanda mínima.

97