BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería.

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado.

ANÁLISIS DE LA ENERGÍA DEL ARCO ELÉCTRICO INTERRUPTORES DE POTENCIA EN CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO NORMAL Y CON FALLA Y SU RELACIÓN CON EL GRADO DE DETERIORO DE LOS CONTACTOS

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Presenta:

ADRIÁN GAONA MARTÍNEZ

Asesor de tesis:

Dr. Carlos Ramírez Pacheco

Puebla, Pue. Noviembre, 2016

BUAP

OFICIO SIEP No. 4227/ 2015

Ing. Adrián Gaona Martínez
Maestría en Ingeniería, Opción terminal Sistemas Eléctricos de Potencia
P r e s e n t e .

El suscrito M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **"Análisis de la energía del arco eléctrico en interruptores de potencia en condiciones de funcionamiento normal y con falla y su relación con el grado de deterioro de los contactos"**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas eléctricos de potencia. Asignándose como Asesor de Tesis al Dr. Carlos Ramírez Pacheco.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
"Pensar bien, para vivir mejor"
Puebla, Puebla a 08 de diciembre de 2015

M.I. EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO
Director de la Facultad de Ingeniería

C.c.p. Dr. Carlos Ramírez Pacheco. Asesor tema de tesis.
C.c.p. Archivo.

GJS/GCC/dsm.

Facultad de Ingeniería
Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio s/n, edif. 108 C, Col. San Manuel, Ciudad Universitaria, Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

H. Puebla de Z., 26 de noviembre de 2016

Asunto: **AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS**

M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERÍA, B.U.A.P.
P r e s e n t e.

El suscrito: **DR. CARLOS RAMÍREZ PACHECHO, Asesor del Tema de Tesis denominado**:

"ANÁLISIS DE LA ENERGÍA DEL ARCO ELÉCTRICO EN INTERRUPTORES DE POTENCIA EN CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO NORMAL Y CON FALLA Y SU RELACIÓN CON EL GRADO DE DETERIORO DE LOS CONTACTOS"

Presentado por la **ING. ADRIÁN GAONA MARTÍNEZ, Pasante de la Maestría en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia,** me permito informar a usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía de la Tesis, **no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.**

Lo que hago de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

Atentamente:

DR. CARLOS RAMÍREZ PACHECO
ASESOR

c.c.p. Secretaría de Posgrado. Facultad de Ingeniería BUAP
Interesado.
Archivo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 1

I. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN 3

I.1 Planteamiento del problema 3

I.2 Justificación 5

I.3 Objetivo General 9

I.4 Objetivos particulares 9

I.5 Hipótesis 10

I.6 Variables 10

II. MARCO DE REFERENCIA 11

II.1 Marco histórico 11

II.2 Marco Teórico. El Arco Eléctrico 13

II.2.1 La columna positiva 16

II.2.2 La región catódica 19

II.2.3 La Región anódica 20

II.2.4 El proceso de Interrupción de corriente alterna 21

II.2.5 Erosión de materiales por arco eléctrico. 23

II.2.6 Teorías del Arco Eléctrico 29

III. MARCO METODOLÓGICO 34

IV. ESETADO DEL ARTE DE INTERRUPTORES DE POTENCIA 35

IV.1 Clasificación de los interruptores de potencia 35

IV.2 principios de extinción en Interruptores de Potencia 35

IV.2.1 Interruptores en aire 35

IV.2.2 Interruptores en soplo de aire. 37

IV.2.3 Interruptores en gran volumen de aceite. 39

IV.2.4 Interruptores en pequeño volumen de aceite 41

IV.2.5 Interruptores en vacío. 42

IV.2.6 Interruptores en gas SF6 44

V. TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS POR CONMUTACIÓN DE ELEMENTOS DE RED 47
V.1 Transitorios debidos a la conexión de circuitos. 48
V.2 Transitorios por conmutación de componentes Capacitivos 50
V.2.1 Corriente capacitiva de inrush 50
V.2.2 Interrupción de Corrientes Capacitivas. 53
V.2.3 Conmutación de Líneas de Transmisión en vacío 57
V.3 Transitorios por Conmutación de Componentes Inductivos. 58
V.3.1 Interrupción de pequeñas corrientes inductivas. 58
V.3.2 Corrientes de Inrush de Transformadores. 60
V.4 Transitorios por liberación de corto circuito 61
V.5 Relación entre la corriente de corto circuito y la tensión transitoria de restablecimiento 64
V.5.1 Características nominales de corriente en interruptores 64
V.5.2 Características de la TTR 67
V.5.3 TTR relacionada a la Corriente Nominal de Interrupción de Corto Circuito 75

VI. CASO DE ESTUDIO: ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DEL INTERRUPTOR TCL A3U30 80
VI.1 Características Principales del Interruptor de Potencia Siemens 3AT3 80
VI.1.1 Datos nominales de operación. 80
VI.1.2 Descripción general 82
VI.2 Datos de las líneas de transmisión Cerro de ORO TECALI 86
VI.3 Estadística de eventos en las líneas de transmisión bajo estudio 88
VI.4 Simulación de Eventos por falla y apertura de carga normal 90
VI.5 Análisis de la energía del arco 95
VI.6 Efecto de la erosión sobre el valor de la resistencia de contactos 101
VI.6.1 Resultados de Pruebas de Resistencia de Contactos 103

CONCLUSIONES **106**
DESARROLLOS POSTERIORES. **113**
REFERENCIAS **114**
ANEXOS **116**

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Circuito equivalente de un sistema de potencia y la relación del interruptor 6
Figura 2 Contacto móvil y fijo de Interruptor en pequeño volumen de aceite. 7
Figura 3 Esquemático simplificado de las tensiones asociadas al arco eléctrico entre dos electrodos 12
Figura 4 Distribuciones en el arco (a) Potencial; (b) Corriente; (c) Carga espacial 15
Figura 5 Distribución radial de la temperatura en un arco en nitrógeno 19
Figura 6 Distribución de potencial en la región catódica 20
Figura 7 Variaciones típicas de corriente y voltaje en el proceso de extinción de arco. .22
Figura 8 Erosión de elementos por arco 23
Figura 9 Representación gráfica de la Teoría de Prince 30
Figura 10 Estructura de la cámara de extinción de un interruptor en aire 37
Figura 11 Estructura de la cámara de arqueo de interruptores en soplo de aire 38
Figura 12 Cámara de arqueo interruptor gran volumen de aceite. 39
Figura 13 Sección transversal de una cámara de interrupción con soplo lateral y cámara de compensación 40
Figura 14 Sección transversal de cámaras de interrupción en pequeño volumen de aceite 41
Figura 15 Sección transversal de una cámara de interrupción en vacío 42
Figura 16 Diseño de contactos de interruptores en vacío 43
Figura 17 Diagrama esquemático de operación de un interruptor de doble presión de SF6 45
Figura 18 Diagrama esquemático de interruptor de segunda generación de SF6 45
Figura 19 Diagrama esquemático de los interruptores de tercera generación de SF6 ...46
Figura 20 Circuito RL con fuente de voltaje sinodal 48
Figura 21 Corriente alterna asimétrica de la ecuación 5.3 49
Figura 22 Diagrama unifilar de una subestación con un capacitor para regulación de voltaje 51
Figura 23 Corriente de inrush. Banco de capacitores C1. 51
Figura 24 Circuito de prueba de conexión Banco-Banco de capacitores 52
Figura 25 Transitorio de corriente por la conexión Banco-Banco de capacitores 53
Figura 26 Representación unifilar de un circuito capacitivo 53

Figura 27 Corriente y voltajes durante la interrupción de corriente capacitiva 54
Figura 28 Reignición en el interruptor por la interrupción de corrientes capacitivas.....56
Figura 29 Voltajes en el extremo remoto de una línea de transmisión de 400 kV, 60 Hz, 200 km 57
Figura 30 Curvas de corriente y voltaje por la desconexión de una línea de transmisión 58
Figura 31 Diagrama unifilar de un circuito inductivo.....58
Figura 32 Corrientes de inrush de un transformador Y-Y-D, 125 MVA, 400/115/34.5 kV 60
Figura 33 Circuito simplificado para estudio del transitorio de corto circuito 61
Figura 34 Tensión Transitoria de Restablecimiento a través de los contactos del interruptor, después de la extinción de la corriente de falla 63
Figura 35 Efecto del voltaje de arco en la tensión transitoria de restablecimiento 63
Figura 36 Determinación de la corriente de fabricación de corto circuito y el porcentaje de la componente de C.D.....66
Figura 37 TTR y voltaje de recuperación en circuito RLC 68
Figura 38 Representación de circuito. Interrupción de falla trifásica a tierra 68
Figura 39 Circuito equivalente para determinar la TTR en una falla trifásica a tierra 70
Figura 40 Característica Exponencial de la TTR 71
Figura 41 Característica de la TTR oscilatoria 72
Figura 42 Ondas viajeras a través de una discontinuidad.....74
Figura 43 TTR típica para una falla en línea 74
Figura 44 Representación de cuatro parámetros de la TTR de un circuito 75
Figura 45 Representación de dos parámetros de la TTR de un circuito 77
Figura 46 Relación de la TTRI y la TTR en un circuito.....79
Figura 47 Estructura del polo del Interruptor Siemens 3AT3.....82
Figura 48 Esquema de operación de apertura 84
Figura 49 Número admisible de desconexiones en dependencia de la corriente de ruptura.....85
Figura 50 Diagrama unifilar de la red para estudio.....87
Figura 51 Variación de la Corriente de Falla vs Distancia. LT TCL A3U30 EDO 90
Figura 52 Circuito de prueba en ATP 91

Figura 53 Corriente de falla de la LT TCL A3U30 EDO a 45 km del nodo TCL.....92
Figura 54 Voltaje y Corriente de arco para una apertura de línea con carga 93
Figura 55 Corriente y voltaje de arco para una falla a 19.3 km (10%).....93
Figura 56 Corriente y voltaje de arco para una falla a 57.9 km (30%).....94
Figura 57 Corriente y voltaje de arco para una falla a 96.5 km (50%).....94
Figura 58 Corriente y voltaje de arco para una falla a 154.4 km (80%).....94
Figura 59 Comportamiento de la Energía del Arco eléctrico para diferentes distancias de línea 97
Figura 60 Comparación de las tasas de erosión 97
Figura 61 Variación de la erosión específica respecto de χ 98
Figura 62 Variación de la erosión específica.....101
Figura 63 Cámara de interrupción del interruptor TCL A3U30 102
Figura 64 Variación de la resistencia de contactos del Interruptor A3U30 104

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades físicas de los materiales de contactos 25
Tabla 2 Clasificación de los interruptores de potencia [25] [26] 35
Tabla 3 Capacidad de aislamiento del interruptor Siemens según IEC. 80
Tabla 4 Datos eléctricos del interruptor Siemens 81
Tabla 5 Tiempos de maniobra del interruptor Siemens 81
Tabla 6 Servicios de inspección y mantenimiento [34] 84
Tabla 7 Resumen de estadística de fallas de LT. EDO – TCL 88
Tabla 8 (Continuación) Resumen de estadística de fallas de LT. EDO – TCL 89
Tabla 9 Características de arco debido a diferentes fallas en la línea 95
Tabla 10 Cálculos de energía y erosión de contactos 96
Tabla 11 Resultados de prueba de Resistencia de Contactos de Interruptor TCL A3U30 104

INTRODUCCIÓN

Un interruptor de potencia, se define como un equipo electro-mecánico cuyo fin es asegurar el flujo continuo de corriente en una red eléctrica bajo condiciones normales de operación e interrumpirlo cuando se presentan condiciones anormales o de fallas.

Los interruptores deben tener la capacidad de convertirse de un conductor ideal a un aislador ideal, en el menor tiempo posible, y además deben realizar este proceso a la inversa. Su tarea principal, es la de interrumpir corrientes de falla y proteger el equipamiento eléctrico y electrónico de las redes eléctricas. Además, debe cumplir con los siguientes requerimientos:

1. En posición cerrado, debe ser capaz de conducir la corriente para la cual fue diseñado sin tener índices de temperatura elevados en sus componentes.

2. Sin importar si el interruptor está en posición abierto o cerrado, debe ser capaz de soportar cualquier sobre voltaje dentro de sus límites de diseño.

3. Dentro de su voltaje de diseño, el interruptor debe soportar cualquier corriente, para la cual fue construido, sin sufrir daños que lo imposibiliten para realizar operaciones subsecuentes.

La tecnología empleada en los interruptores de potencia ha cambiado en forma drástica; las nuevas mejoras tecnológicas aplicadas al diseño de los interruptores de SF6 y el aprovechamiento de la energía térmica del arco eléctrico, han logrado que los requerimientos de energía de los mecanismos de accionamiento sean menores, disminuyendo los costos de producción y aumentando la confiabilidad de operación. Esto ha logrado que los interruptores en gas SF6 se hayan convertido en el actual *estado del arte* en la tecnología de los interruptores.

El empleo del gas SF6 tiene una desventaja principal: es considerado un gas de efecto invernadero 23 veces mayor que el dióxido de carbono (CO2), por lo que se han

establecido diversas regulaciones, a nivel internacional, para lograr un mejor control en su manejo y disminuir los posibles efectos al ambiente por su uso. Por esta razón, durante los procesos de mantenimiento y con el propósito de disminuir los efectos negativos al ambiente, se emplean equipos que permiten su recuperación y tratamiento del gas SF6. Esto requiere que el personal técnico que realiza dicho mantenimiento deba tener una completa comprensión del funcionamiento de los sistemas y conocer cuándo y cómo deben aplicarse las tareas de mantenimiento.

Esta es una de las razones por la cual los métodos tradicionales de mantenimiento deben ser reemplazados por nuevas técnicas como el *Mantenimiento Basado en la Condición* o el *Mantenimiento Basado en la Confiabilidad*, las cuales permiten predecir la condición operativa de los equipos sin la necesidad de intervenirlos en forma directa.

Es así como la evaluación del comportamiento de los contactos de los interruptores de potencia, a través de la simulación de las condiciones normales de operación y de falla, y el cálculo de la energía del arco eléctrico producido durante la separación física de los contactos y su relación con el desgaste de éstos, adquiere gran importancia para las empresas encargadas del transporte de energía, ya que permitirá determinar el estado real de los contactos y realizar una asignación de recursos en forma más eficaz, porque se ejecutarán tareas de reparación sólo a aquellos equipos que lo requieran, reduciendo los costos de operación, transporte y mantenimiento de las redes eléctricas.

I. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, los sistemas eléctricos de potencia son cada vez más dinámicos. Los requerimientos de energía por parte de los consumidores, las estrategias de generación y transmisión de energía eléctrica y el aseguramiento de que los costos de operación de las redes resulten, técnica y económicamente viables, exigen que dichos sistemas se conviertan en elementos adaptables.

El empleo de interruptores de potencia hace posible la adaptabilidad de los sistemas de transmisión, ya sea por la conexión o desconexión de componentes, los cuales re-configuran los parámetros eléctricos de la red y la adecuan a las necesidades de tensión, corriente y potencia necesarios. Sin embargo, en la apertura y cierre de los contactos de los interruptores de potencia se producen fenómenos transitorios y arcos eléctricos de alta energía, originados por los cambios repentinos en los parámetros eléctricos de dicho sistema, provocando efectos no deseados que deben ser soportados por los equipos eléctricos.

El arco eléctrico, al tratarse de una transferencia de electrones desde el cátodo hacia el ánodo, impulsados por la diferencia de potencial que se presenta entre los contactos durante el proceso de apertura, provoca deterioro progresivo del material con que están fabricados los contactos de los interruptores [1].

De esta forma, una de las preocupaciones principales de los ingenieros de mantenimiento de los sistemas eléctricos de potencia, es la de determinar la condición operativa de los contactos de los interruptores de potencia, los cuáles a través de las operaciones normales de re-configuración de las redes, así como por la operación ante condiciones de falla, sufren deterioro en sus componentes.

Por lo anterior, es necesario contar con una herramienta que permita estimar los esfuerzos que se desarrollan en las cámaras de interrupción de los interruptores de

potencia y, más específicamente, en los contactos. De esta forma, a través de la simulación de las condiciones eléctricas y el cálculo energético del arco eléctrico, así como su historial operativo, se podrá determinar el grado de deterioro de los contactos y de esta forma establecer si el equipo requiere ser intervenido para reemplazo de componentes internos.

En la actualidad, la forma de determinar el grado de deterioro de los contactos de los interruptores es mediante pruebas que miden la resistencia de contacto, la cual se presupone que incrementa a medida que el desgaste es mayor. Para la ejecución de esta prueba es necesario desconectar el equipo del sistema, lo que significa tiempo de indisponibilidad. En contra parte, de acuerdo a los nuevos estándares operativos de las redes, en los cuáles el parámetro económico toma mayor importancia, el desconectar equipos de la red eléctrica, para realizar pruebas que verifiquen su comportamiento, será poco redituable y los costos económicos serán aún mayores.

Por otro lado, los mantenimientos mayores de los interruptores se programan con base en el tiempo en operación, dejando de lado las condiciones reales de operación o la cantidad de corriente de corto circuito acumulada, lo que puede provocar que se realicen inversiones de dinero en equipos que no lo requieren o, en el peor de los casos, que no se realicen mantenimientos oportunos a equipos críticos de la red.

En relación a lo anterior, se pretende plantear una metodología alterna para determinar la condición operativa de los interruptores de potencia, basada en la simulación de las condiciones eléctricas de la red a la que están conectados, así como en la simulación y el cálculo de la energía desarrollada en la dinámica del arco eléctrico y, en el historial de pruebas y condiciones operativas históricas, con lo cual se podrá determinar si los contactos han sufrido deterioro importante y si es técnica y económicamente viable realizar una intervención directa para reemplazo de componentes, lo que redituará en programas de mantenimiento más eficaces y efectivos

I.2 JUSTIFICACIÓN.

Los sistemas de potencia deben reconfigurarse para adaptarse a las condiciones de carga. Esta reconfiguración se logra mediante la inclusión o desincorporación de elementos de generación, transmisión, transformación o compensación, a través la acción de interruptores de potencia.

En este sentido, los interruptores de potencia realizan las tareas más críticas en un sistema de potencia: conectar o desconectar elementos de la red y, además deben tener la capacidad de realizar estas acciones bajo condiciones de falla.

Durante los procesos de apertura o cierre de contactos, las condiciones eléctricas del sistema cambian, sin embargo, estos cambios no son instantáneos y se presentan, en un intervalo de tiempo de algunos milisegundos, fenómenos transitorios que se caracterizan por una elevada transferencia de energía.

Durante el periodo transitorio dicha transferencia de energía se realiza en los contactos de los interruptores, dentro de las cámaras de interrupción, y por ello, los materiales con que son fabricados deben soportar grandes esfuerzos electro-térmicos sin que se deterioren o se dañen considerablemente.

En la figura 1 se muestra la interrelación de un interruptor de potencia y el sistema eléctrico. Los dos sistemas, representados por las barras infinitas B-A y B-B, se conectan a través del interruptor de potencia y de la impedancia de la línea Z_{lt}. En el momento de la apertura de los contactos del interruptor, los sistemas comienzan a desconectarse, sin embargo, debido a las inductancias de los propios sistemas, se mantiene un flujo de electrones a través de los contactos del interruptor aun cuando éstos ya no están unidos físicamente. Es así como la transferencia de energía entre los dos sistemas continúa durante el periodo transitorio; a través del arco eléctrico que se forma entre los contactos del interruptor

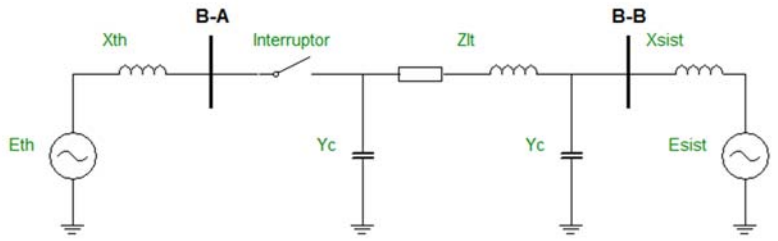


Figura 1 Circuito equivalente de un sistema de potencia y la relación del interruptor

El arco eléctrico desarrollado en los contactos del interruptor alcanza temperaturas que pueden provocar que los materiales lleguen al punto de fusión provocando erosión del material y daño permanente. Por esta razón, los fabricantes han desarrollado diseños especiales tanto en las cámaras de arqueo como en los componentes de los contactos móviles y fijos, para mitigar los efectos de desgaste y prolongar la vida útil de los equipos.

Una vez que los interruptores están instalados en los diferentes puntos de la red eléctrica, los ingenieros de mantenimiento, para determinar la condición operativa de los interruptores de potencia, realizan pruebas de resistencia de contactos y tiempos de operación, en las que, mediante análisis estadístico de los resultados obtenidos, se puede determinar el estado de los contactos. Sin embargo, para realizar estas pruebas es necesario desconectar los equipos asociados del resto del sistema, lo que provoca su indisponibilidad y costos por re-despacho de la energía eléctrica a través de otros segmentos de la red de transmisión.

Por otro lado, los resultados obtenidos con estas pruebas, no siempre son confiables. Esto es porque la validez de la prueba se fundamenta en que el equipo de medición empleado esté dentro de los parámetros de calibración necesarios y, además, en que se hayan seguido los procedimientos de ejecución de la prueba adecuados.

Un ejemplo claro de lo comentado anteriormente, se ilustra en la figura siguiente, donde se muestran los dedos de contacto fijo y la barra de contacto móvil de un interruptor de potencia en pequeño volumen de aceite de la marca ASEA tipo HLR1. En este caso la

prueba de resistencia de contactos arrojó un resultado de 67 microhmios[1] y, cuando se realizó inspección física de los elementos, se encontraron daños de mayor consideración.

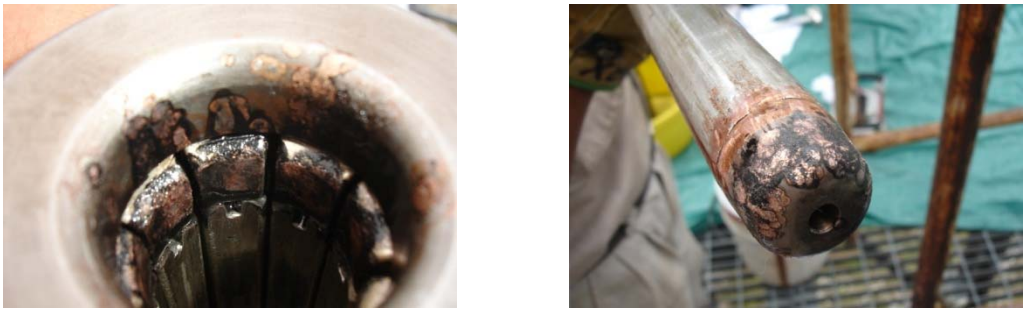


Figura 2 Contacto móvil y fijo de Interruptor en pequeño volumen de aceite.
Derecha. Dedos de contacto fijo y anillo de arqueo. Izquierda. Barra de contacto móvil y punta de arqueo dañada por erosión por arco. En la prueba de estos elementos se obtuvo un valor de resistencia de contactos de 67 μΩ. [2]

Por lo anterior, en esta tesis se planteará una metodología en la cual, mediante la simulación del arco eléctrico y el cálculo teórico de su energía, debidos a las condiciones eléctricas a los que están sometidos los interruptores de potencia, se podrá establecer una base para determinar los esfuerzos electro-térmicos de los contactos y su afectación, para con ello establecer programas de mantenimiento eficientes.

La metodología de análisis que se planteará en esta tesis, brindará a los ingenieros responsables del diseño de los interruptores, así como a los ingenieros responsables su mantenimiento, una herramienta eficaz para analizar, previo a la fabricación o posterior a la instalación de los equipos, el comportamiento ante diversos escenarios eléctricos y, con ello, determinar si la aplicación del interruptor es adecuada, o en el caso que ya se encuentren en operación, una herramienta indispensable para realizar el mantenimiento programado y con ello asegurar la confiabilidad operativa de éstos equipos. Esto traerá como consecuencia la disminución de riesgos de falla con lo que se disminuirán las afectaciones a los sistemas eléctricos de potencia y, principalmente, riesgos de lesiones del personal que opera los interruptores de potencia.

[1]Interruptor marca ASEA, tipo HLR 1. Valor especificado por el fabricante de resistencia de contactos entre 40 y 60 micro ohm

La justificación teórica de este estudio, se basa en la implementación de los modelos del comportamiento del arco eléctrico y cálculo de la energía de dicho arco eléctrico, así como el análisis histórico de pruebas y fallas. A este respecto se sabe que el deterioro de los contactos de los interruptores se debe a la erosión provocada por los arcos eléctricos durante los procesos de cierre y apertura.

La metodología que se empleará en el desarrollo de este estudio, se basará en el empleo de programas de simulación de transitorios electromagnéticos y programas de cálculo matemático, considerando casos tipo, los cuales podrán ser modificados para cada caso particular que se pretenda estudiar. Con el empleo programas de simulación y la comparación con mediciones reales de los equipos se podrán comprobar los resultados de los estudios, y éstos podrán ser empleados para el análisis de los interruptores de potencia.

Por otro lado, la CFE, encargada de la operación y mantenimiento de la Red Nacional de Transmisión, establece programas de mantenimiento para asegurar la confiabilidad operativa de todos los equipos de dicha red, con el objetivo de mantener la continuidad del servicio de energía eléctrica por arriba de los estándares internacionales. Estos programas de mantenimiento incluyen revisión de los interruptores de potencia y reemplazo de componentes internos, los cuales están basados en estrategias de “tiempo en operación”, y no en el grado de deterioro de los equipos.

Bajo este esquema, la CFE incurre en un alto riesgo de realizar mantenimientos mayores a equipos que no requieren un gasto de tales dimensiones. Así mismo, existen interruptores que, por su condición operativa dentro del sistema eléctrico, requieren intervención en intervalos de tiempo menores a los recomendados por el fabricante o en los procedimientos internos.

Por lo anterior, el método de estudio de interruptores que planteará esta tesis, coadyuvará a la implementación de programas de mantenimiento más eficaces y oportunos, disminuyendo costos directos e indirectos por reemplazo de generación y despacho de energía, redituando en mejores finanzas para la CFE.

La motivación personal por desarrollar este estudio y plantear una metodología de análisis de los interruptores de potencia, se debe a la experiencia propia obtenida durante 15 años en la CFE. Durante este tiempo he realizado diversas pruebas eléctricas a dichos equipos, así como mantenimientos mayores, y he encontrado casos en los que, por el estado de los contactos, no requerían realizarse gastos en trabajos de mantenimiento, y otros casos en los que se tuvo la necesidad de reducir considerablemente los tiempos de mantenimiento mayor, incluso menores a los recomendados por el fabricante de dichos equipos.

I.3 OBJETIVO GENERAL

Plantear un método, mediante la evaluación de la energía de los arcos eléctricos, a través de simulación de las condiciones eléctricas, análisis histórico de pruebas y condiciones operativas a los que están sometidos los interruptores de potencia, para determinar el grado de deterioro de sus contactos.

I.4 OBJETIVOS PARTICULARES

- Realizar simulación de fenómenos transitorios eléctricos en los contactos de los interruptores, debidos a la conexión o desconexión de elementos del sistema, empleando programas de simulación de fenómenos transitorios.

- Calcular la energía producida por los transitorios eléctricos, a través del empleo programas de cálculo matemático.

- Realizar un análisis histórico y condiciones operativas del interruptor de potencia a analizar.

- Establecer una relación entre la energía contenida en el arco eléctrico y el grado de desgaste de los contactos de los interruptores.

I.5 HIPÓTESIS

A través de la evaluación de la energía del arco eléctrico en Interruptores de potencia, por medio de simulación, así como el análisis histórico de pruebas y condiciones operativas, se puede establecer un parámetro para determinar el grado de deterioro de contactos de los interruptores de potencia.

I.6 VARIABLES

En el desarrollo del presente estudio se tienen las siguientes variables dependientes:

- Aplicación de los interruptores de potencia y número de interrupciones en condiciones normales y con condiciones de falla.
- Tensión te operación del equipo.
- Mediciones del valor de resistencia de contactos.
- Simulación de fenómenos transitorios en interruptores.
- Cálculo de la energía de los fenómenos transitorios.

Por otra parte, se presenta la siguiente variable independiente:

- Relación entre la energía contenida en el arco eléctrico y el deterioro de los contactos del interruptor de puenteo.

II. MARCO DE REFERENCIA

II.1 MARCO HISTÓRICO

Durante los últimos 100 años, la electricidad se ha convertido en la forma de energía más flexible y fiable del mundo. La demanda global es cada vez mayor y la infraestructura que permite la distribución segura de la energía eléctrica es extremadamente confiable, pero el desarrollo de redes cada vez mayores y la introducción de nuevos tipos de generadores eléctricos suponen nuevos retos operacionales.

Los interruptores, con independencia de su posición en un sistema eléctrico, tienen dos tareas: son responsables de la conmutación de componentes de la red durante el funcionamiento normal y; de la desconexión de dichos componentes en caso de sobrecarga o cortocircuito. La condición más crítica se presenta en el proceso de interrupción, ya que la conducción de corriente eléctrica puede mantenerse a través de un arco eléctrico que se forma en los gases ionizados presentes entre los contactos eléctricos. Este arco contiene una elevada energía y su temperatura puede superar los 50,000 °C y presiones de hasta 100 MPa. [3]

A la par del desarrollo de los interruptores, también se inició el estudio del arco eléctrico y su dinámica. Investigaciones sobre las propiedades del arco siguieron rápidamente después de su descubrimiento, y los primeros experimentos culminaron en las notables mediciones de Ayrton [4] en las características de tensión/corriente del arco en carbón.

Durante el siglo XX, se desarrollaron conocimientos experimentales y teóricos de la estructura atómica y sus procesos. Estos conocimientos, junto con un sin número de experimentos han permitido realizar una descripción completa de la estructura y las propiedades del arco eléctrico.

El arco eléctrico se representa entonces, como una resistencia variable conectada entre los electrodos en que se forma. En la siguiente se muestra la caída de tensión U_b formada

por tres componentes: la caída de tensión anódica U_a, la caída de tensión catódica U_c y, la caída de tensión en la columna del plasma U_s.

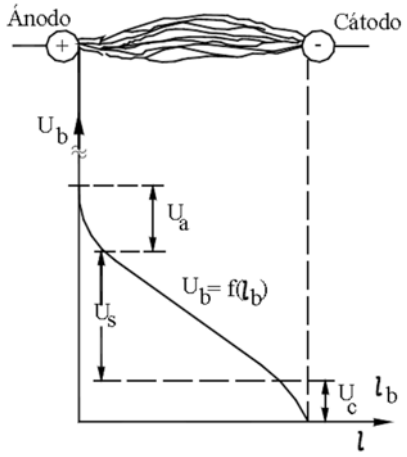


Figura 3 Esquemático simplificado de las tensiones asociadas al arco eléctrico entre dos electrodos [3]

Tomando en cuenta lo anterior, el punto medular en el diseño de los interruptores es controlar el arco de tal manera que se obtenga una corriente de interrupción satisfactoria [5].

En corriente directa se emplea el método de interrupción forzada. Este método consiste en incrementar la resistencia de arco lo suficientemente rápido para lograr que la corriente descienda a cero en un tiempo relativamente corto sin ocasionar sobretensiones.

Para el caso de interrupción en corriente alterna, se debe mantener una conductancia de arco durante el periodo en el cual fluye la corriente, para minimizar la energía disipada en el interruptor del circuito y provocar que la conductancia de arco disminuya extremadamente rápido. Este proceso de disipación de energía debe ser lo suficientemente intenso, para que cuando la corriente cruce por cero, se pueda prevenir la re-ignición del arco.

Dos de los grandes pioneros en el diseño de interruptores y en la investigación del arco eléctrico fueron Joseph Slepian [6], con su teoría de las emisiones de cátodo frío y posteriormente con la teoría de que el incremento en el esfuerzo dieléctrico provocado

por la deionización entre los contactos eléctricos podía ser mejorada por medio de la división del arco eléctrico [7] y, David C. Prince quien desarrolló la teoría de la extinción del arco por medio del desplazamiento de un medio ionizado alrededor de la columna de arco con el mismo medio sin ionizar, principio aplicado a los interruptores en aceite [8].

Investigaciones posteriores, han desarrollado diferentes modelos matemáticos, como el modelo de Mayr o los modelos modificados de Mayr-Cassie, para predecir el comportamiento de los interruptores y del fenómeno del arco eléctrico ante diversos escenarios.

Los trabajos de simulación más recientes, emplean el modelo universal del interruptor, el cual se implementó mediante lógica de TACS pudiendo emplear cualquier ecuación básica que represente la dinámica de arco, además de incluir parámetros de potencia, tensión y ángulos de fase como parámetros variables en el tiempo [9]. El modelo evalúa en una primera etapa (pre-cero hasta el cruce por cero) la conductancia del arco, teniendo como variable la corriente de arco. En una segunda etapa (post-cero) se evalúa la resistencia del arco teniendo como variable de entrada la tensión del arco.

II.2 MARCO TEÓRICO. EL ARCO ELÉCTRICO

El arco eléctrico es una descarga eléctrica auto-sostenida que presenta una caída de voltaje pequeña, es capaz de mantener grandes cantidades de corriente y se comporta como una resistencia no-lineal. En un interruptor representa un papel clave en el proceso de interrupción. Se concibe como un canal de plasma entre los contactos del interruptor formado después de una descarga de gas en el medio de extinción.

El arco eléctrico inicia con la separación de los contactos. Cuando la corriente fluye a través del interruptor y sus contactos inician la separación, la energía magnética almacenada en las inductancias del sistema de potencia fuerza el flujo de la corriente. Un instante de tiempo antes de la separación física de los contactos, se tiene unión en una pequeña superficie de área, esto provoca una alta densidad de corriente que hace

que el metal en contacto se funda. El material fundido del contacto virtualmente explota y esto conduce a una descarga de gas en las proximidades del medio de extinción. El medio en el cuál se encuentran los contactos se ioniza provocando el desprendimiento de electrones libres de los átomos, haciendo que el entrehierro se vuelva conductivo.

La emisión de electrones libres y la iniciación del arco eléctrico se produce por el aumento de la temperatura en el entre hierro por la emisión termoiónica y por el aumento del gradiente de tensión en el cátodo, que provoca emisión de campo.

En el proceso de separación de los contactos se produce un incremento de la resistencia de contacto y por lo tanto aumento de la temperatura, la cual puede ser suficiente para provocar ionización térmica. Como la distancia de separación entre los contactos es pequeña, y el gradiente de tensión es elevado, se produce emisión de electrones de cátodo provocando ionización por impacto.

Una vez iniciado el arco eléctrico, se liberan suficientes electrones del cátodo con dirección hacia el ánodo provocando que el medio se ionice, por lo tanto, el arco se mantiene aún después de haber cesado la emisión de campo. El proceso de difusión y recombinación continúa reponiendo los electrones perdidos del ánodo y, finalmente si el flujo de corriente es alto, se establece un arco con temperatura suficiente como para convertirse en la fuente principal de conductividad eléctrica.

Físicamente, el arco es una columna de gas incandescente, con una trayectoria recta aproximada entre los electrodos (ánodo y cátodo) y temperaturas entre los 6,000 a 20,000 °K. Esta columna actúa como un conductor eléctrico normal con la presencia de un campo magnético.

El arco eléctrico tiene dos características importantes: a corrientes bajas, el voltaje cae con el incremento de corriente (característica negativa) y, a corrientes elevadas el voltaje tiene a incrementar lentamente (característica positiva). Estas dos características indican que se tiene un voltaje presente a través de la longitud de arco [10].

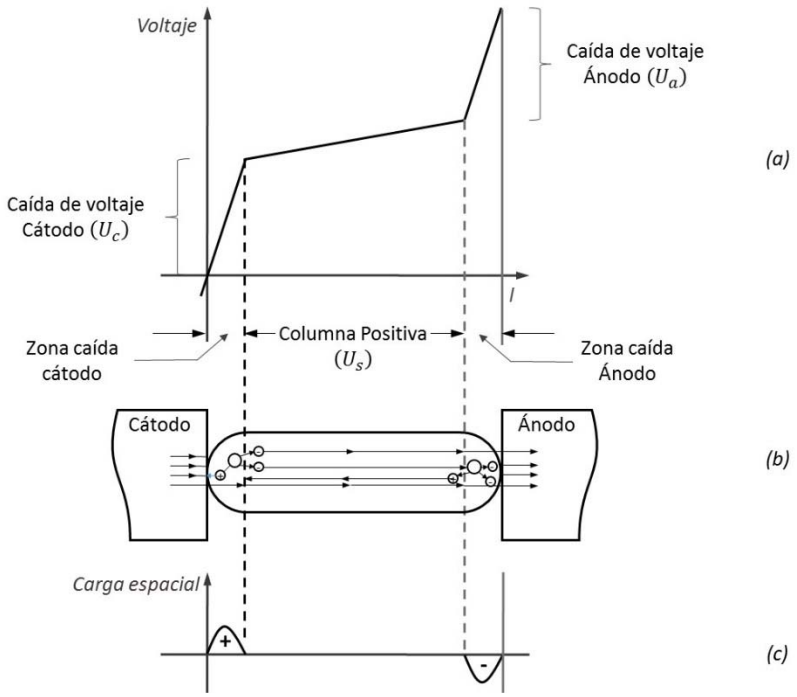


Figura 4 Distribuciones en el arco (a) Potencial; (b) Corriente; (c) Carga espacial [10]

Para el estudio del arco eléctrico, se considera que la columna de arco es cilíndrica y simétrica. De este modo se puede establecer una distribución de potencial como se muestra en la figura 4.

Se pueden establecer tres regiones de arco: la columna positiva que se extiende sobre la mayor parte de la trayectoria del arco, el cual tiene un campo uniforme y provoca la caída de tensión U_s; la región de caída de tensión catódica U_c y, la región de caída de tensión anódica U_a.

Agrupando las caídas de tensión en la proximidad de los electrodos, la tensión del arco se pude expresar con la siguiente ecuación.

$$U_b = \alpha + \beta l_b \tag{2.1}$$

Donde *α* es la caída de tensión en los electrodos, *β* es la caída por unidad de longitud y, l_b es la longitud total del arco.

Los primeros estudios de la relación de la caída de tensión a través del arco eléctrico, fueron realizados por Herta Ayrton [11] quien desarrolló una fórmula que determinaba el voltaje del arco basado en resultados de experimentos empíricos.

$$e_0 = A + Bd + \frac{C + Dd}{i} \tag{2.2}$$

Donde:

$e_0 =$ voltaje de arco
$d =$ longitud de arco
$i =$ corriente de arco
$A = 19$, $B = 11.4$, $C = 21$ y $D = 3$.

Los valores de las constantes A, B C y D son valores empíricos obtenidos en estudios con electrodos de cobre en aire.

II.2.1 LA COLUMNA POSITIVA

La columna positiva se considera como un plasma y la corriente que fluye a través de éste tiene dos componentes [10], una corriente de electrones y una corriente de iones positivos. De esta forma, la densidad de corriente es:

$$J = J_- + J_+ = e(n_- v_- + n_+ v_+) = ne(v_- + v_+) \tag{2.3}$$

En la ecuación anterior n_- y n_+ se refieren a la concentración de cargas negativas y positivas en la columna de arco las cuales, de acuerdo con la Ley de Poisson, deben producir una carga espacial cero, v_- y v_+ son las velocidades de desplazamiento producidas por el campo. Esta velocidad de desplazamiento es limitada por colisiones con cargas neutras y otros portadores de carga, lo que representa un fenómeno resistivo. Como $v_- > v_+$ la corriente es predominante por electrones, por lo tanto

$$J \cong J_{-} = n_{-}ev_{-} = n_{-}e\mu E = \sigma E \tag{2.4}$$

Donde μ es la movilidad del electrón y σ es la conductividad eléctrica. Ésta última es una función compleja de la composición del gas y su temperatura, y se relaciona con J_{-} a través de las condiciones de energía en el plasma.

II.2.1.1 Coeficiente de conductividad térmica

La columna de arco puede alcanzar temperaturas de hasta 20,000 °K. La pérdida de energía térmica de conducción en un gas representado por el vector de flujo térmico, de acuerdo con la siguiente ecuación, debe ser considerada en la suma de las pérdidas de calor representadas por las pérdidas por difusión o disociación y por la energía de ionización [10].

$$\frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial t} + \nabla \cdot (q + hv_0) - \sum \rho_s F_s v_s = 0 \tag{2.5}$$

En la ecuación anterior $\bar{\epsilon}$ es la energía total cinética e interna de la mezcla del gas del medio de interrupción por unidad de volumen, q el vector del flujo térmico es $q = -\sum K_s \nabla T$, h es la entalpía por unidad de volumen determinada por $h = p + \bar{\epsilon}$ con K_s como la conductividad térmica y T la temperatura del espécimen, $\rho = \sum n_s m_s = \sum \rho_s$ es la densidad total de la masa, F_s es la fuerza externa por unidad de masa ejercida sobre los especímenes.

II.2.1.2 Coeficiente de conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica está determinada por la siguiente ecuación [12]

$$\sigma = n_{-} e \mu_{-} \cong \frac{0.815 n_{-} e^2}{\sqrt{3kTm}} \frac{1}{\sum n_s Q_e^s} \tag{2.6}$$

Donde Q_e^s es la sección transversal de las colisiones entre electrones y partículas de los especímenes s. Esta ecuación depende de la concentración de electrones en el canal de arco, el cual puede ser determinado por la ecuación de Saha [9] [10]

$$\frac{n_{+} n_{-}}{n_a} = \frac{n_{-}^2}{n_a} = \frac{U_{+}}{U_a} \, 2 \frac{(2\pi mkT)^{3/2}}{h^3} \exp\left(\frac{-eV_i}{KT}\right) \tag{2.7}$$

Donde U_{+} y U_a son las funciones parciales de los iones y átomos neutros respectivamente.

En mezclas de gas el potencial de ionización efectivo, V_i, es función de la variación de la composición de la mezcla por la temperatura. Todos los parámetros de la ecuación II.5 pueden ser expresados como funciones de la temperatura y de la conductividad térmica.

En el caso de una columna de arco cilíndrica simétrica, y considerando un análisis de estado estable, la distribución de temperatura en el arco está determinado por la ecuación de Helenbass-Heller

$$\sigma E^2 = -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(Kr \frac{dT}{dr} \right) + S(T) \tag{2.8}$$

En la ecuación anterior, la radiación $S(T) \propto (1/T) \exp(-eV_i/kT)$ y la constante $K = K_0 T^{\alpha}$. La ecuación puede solucionarse en las regiones próximas a T_R en un radio R y $dT/dr = 0$ en $r = 0$ y el valor de E es constante [13] [14] [15] [16] [17].

En la figura 5 se muestra una distribución radial de temperatura en un arco en nitrógeno. Estas curvas fueron determinadas en forma analítica empleando la ecuación 2.7.

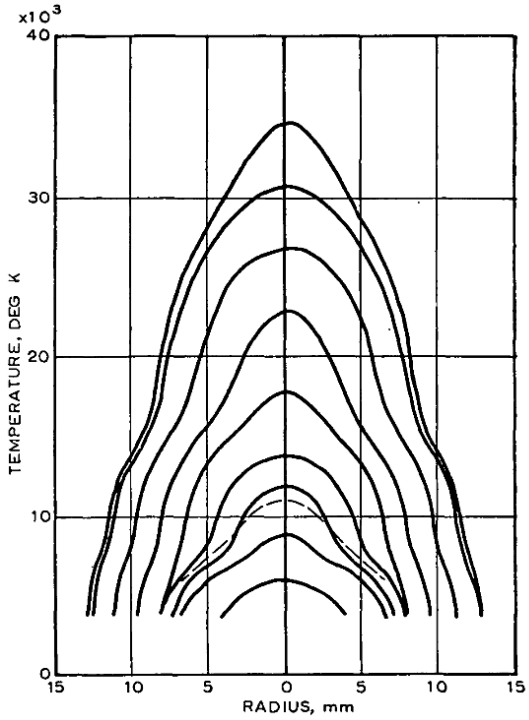


Figura 5 Distribución radial de la temperatura en un arco en nitrógeno [10]

II.2.2 LA REGIÓN CATÓDICA

Para mantener la continuidad de corriente a través de la columna positiva, en las terminales se debe tener una transición de metal a gas. Para el caso del cátodo, el proceso que mantiene esta continuidad de energía es la emisión termoiónica de electrones. Este mecanismo se establece en función de la existencia de un campo de valor alto próximo al cátodo, el cual es producido por la presencia de cargas espaciales positivas. Los electrones emitidos son acelerados en este campo y producen multiplicación de electrones libres por las colisiones con otras partículas. Los iones positivos producidos por estas colisiones son acelerados al cátodo y, en función de su energía cinética, mantienen al cátodo a una temperatura suficiente elevada para mantener la emisión requerida.

II.2.2.1 Voltaje de la Región Catódica

La distribución de voltaje a través de la región catódica se representa en la siguiente figura.

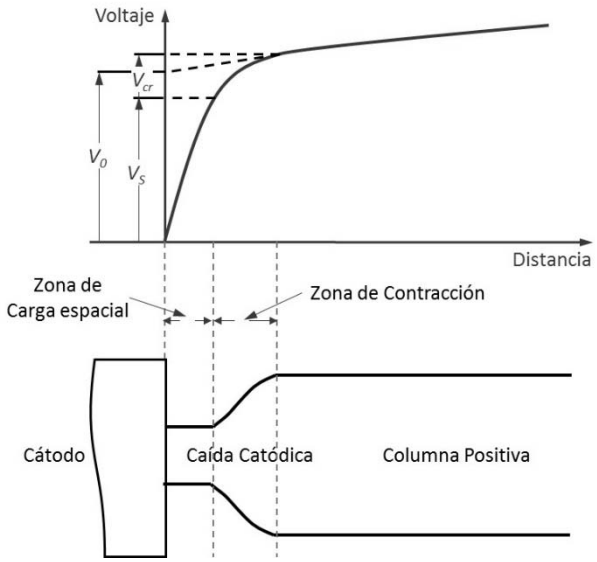


Figura 6 Distribución de potencial en la región catódica [10]

Como se observa en la figura anterior, la zona de carga espacial provoca la mayor caída de tensión V_S. La zona de contracción produce la caída de tensión V_{cr}, esta parte se establece como la zona de transición en la cual la columna se contrae del área de la columna positiva al punto del cátodo donde se produce la emisión termoiónica. La zona de contracción actúa como un campo acelerador de electrones el cual produce iones por colisión en la cerca del límite de la zona de la columna positiva. Los electrones son acelerados hacia el cátodo, provocando las condiciones de continuidad de corriente.

II.2.3 LA REGIÓN ANÓDICA

La región anódica es similar a la región catódica. En esta región también se tiene una región de contracción, aunque menos aguda que en el cátodo. La región de la carga espacial produce los iones positivos requeridos por la columna positiva.

El ánodo no emite iones positivos, de modo tal que la cantidad total requerida para la conducción de iones en la columna debe ser suministrada por la región del ánodo. Sin embargo, debido a la relación $J_+ \ll J_-$, las condiciones de la región anódica no son tan extremas como en el cátodo, por lo que el cálculo de la distribución de potencial se vuelve más simple, ya que muchas de las variables han sido definidas en el estudio de la región catódica.

II.2.4 EL PROCESO DE INTERRUPCIÓN DE CORRIENTE ALTERNA

El proceso de interrupción es sinónimo del proceso de extinción de la corriente de arco, la cual, está determinada por las características eléctricas del sistema y por la capacidad de almacenamiento de energía térmica del arco, por lo tanto, puede esperarse que el proceso de interrupción, desde la iniciación del arco hasta su extinción, dependerá en primer lugar de como los cambios de corriente en el circuito son forzados por la descarga de arco, y como esos cambios son controlados por la fuente de potencia.

La interrupción de corriente implica procesos distintos, en circuitos de CD o CA debidos a la naturaleza del arco. En el caso de CD no existen valores de corriente cero, ni tiempos donde la corriente sea cero, por lo tanto, la corriente debe ser forzada hasta alcanzar un valor cero.

En general, se conocen tres métodos de extinción del arco eléctrico:

a. Interrupción por alta resistencia
b. Interrupción por baja resistencia
c. Interrupción en vacío.

En circuitos de CD, la interrupción de corriente se logra por el proceso de alta resistencia. Esto es, se aumenta la resistencia del arco hasta que su caída de tensión sea igual a la

tensión del circuito. Este incremento de tensión se logra en tres etapas: (1) elongación del arco, (2) enfriamiento del arco y, (3) división del arco.

En corriente alterna, el proceso de extinción se realiza en el cruce por cero. En ese momento, los interruptores deben ser capaces de evitar la re-ignición de la corriente de arco, el cual se logra mediante la deionización del medio entre los contactos.

La interrupción exitosa de la corriente depende de que la capacidad de recuperación del dieléctrico sea mayor que el incremento de voltaje que se presenta a través de los contactos en un intento por mantener el flujo de corriente.

Cuando la corriente alterna pasa por cero, el voltaje de arco toma un repentino brinco igual al valor de la suma del valor pico instantáneo del voltaje de extinción del previo pico de corriente, más el valor pico del voltaje de re-ignición del siguiente pico de corriente, el cual es asociado con la corriente reversible.

El caso que el arco se restablezca, inmediatamente después de la re-ignición, el voltaje de arco toma un valor relativamente constante y de una menor magnitud, como se muestra en la figura 7. En el caso que se produzca una re-ignición, el voltaje aplicado debe exceder el valor del voltaje de re-ignición e_t.

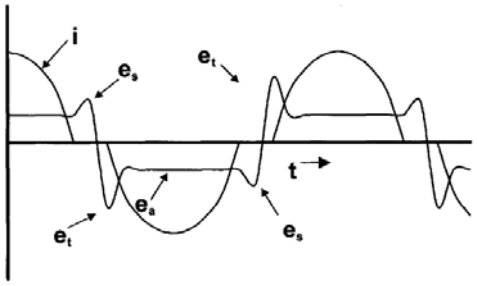


Figura 7 Variaciones típicas de corriente y voltaje en el proceso de extinción de arco. e_s pico de extinción; e_t voltaje pico de re-ignición; e_a voltaje de arco [18]

Si la re-ignición no ocurre, el flujo de corriente cesará y el proceso de interrupción será completado.

II.2.5 EROSIÓN DE MATERIALES POR ARCO ELÉCTRICO.

La elevada temperatura del arco eléctrico puede provocar la vaporización de cualquier medio de interrupción líquido (este fenómeno es aprovechado en interruptores con medio de interrupción en aceite) y, en interruptores con medio de interrupción gaseoso, provoca la fusión de los materiales sólidos.

Por lo anterior, diferentes tipos de materiales han sido diseñados con el propósito de soportar los esfuerzos electro-térmicos que produce el arco. Materiales como el grafito, tungsteno y molibdeno son los que presentan mejor comportamiento y los preferidos por los fabricantes para el diseño de los contactos. En la figura 8 se muestra la erosión de diversos elementos empleados en los contactos de los materiales.

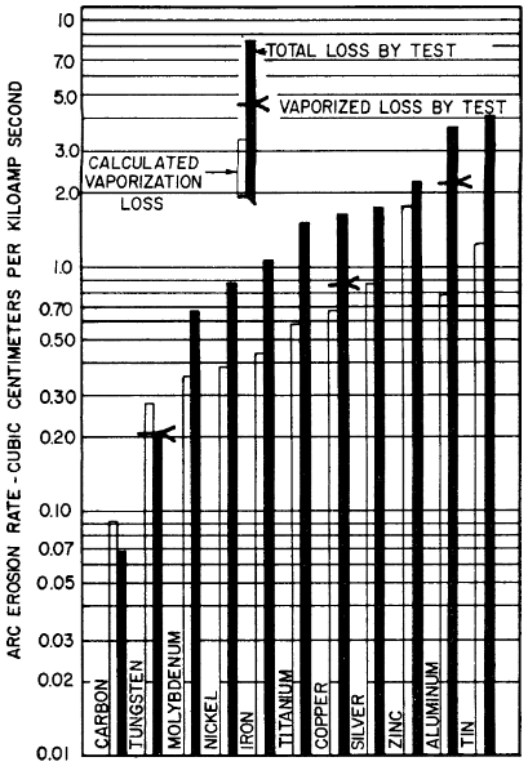


Figura 8 Erosión de elementos por arco.
Comparación entre mediciones y rangos de vaporización calculados. Datos basados en arcos de medio ciclo de aproximadamente 12,000 A rms, a 60 Hz. [1]

La erosión de los contactos es un fenómeno de distribución espacial no lineal que implica procesos de explosiones de burbujas en la superficie de los contactos en medio de flujos

de gas turbulentos. Además, también se involucran fenómenos de transferencia de calor y viscosidad a temperaturas elevadas que no pueden ser estudiadas independientemente del arco.

En el orden de 1 μs mientras que la corriente de arco comienza a fluir, porciones de la superficie de los contactos alcanza temperaturas a las cuales el metal se vaporiza.

Sin embargo, puede realizarse una primera aproximación del balance de energía para determinar la cantidad de vapor de metal desprendido y la erosión de los contactos. Esto es que, la continua energía de vaporización de la región del ánodo y del cátodo, pueden ser reemplazadas por la energía eléctrica en aproximadamente el mismo valor [1].

La energía eléctrica de entrada, cerca de la superficie de los contactos es

$$W = (E_c + E_a)It \tag{2.9}$$

Donde:

$W =$ energía total de entrada en los electrodos, W/s
$E_c =$ caída de tensión en el cátodo, V
$E_a =$ caída de tensión en el ánodo, V
$I =$ corriente de arco: promedio de la magnitud absoluta, A
$t =$ duración del arco, s

El metal vaporizado es

$$V = \frac{W}{\rho J H} \tag{2.10}$$

Para la ecuación anterior

$V =$ volumen del metal vaporizado, cc

$H =$ calor de vaporización, cal/gr

$J =$ calor equivalente, 4.18 J/cal

$\rho =$ densidad del material del contacto, gr/cc

Combinando las ecuaciones 2.9 y 2.10, se obtiene la velocidad de vaporización en centímetros cúbicos del material del contacto por kA-s de la corriente de arco.

$$R = \frac{1000\,V}{It} = \frac{1000\,(E_c + E_a)}{\rho J H} \tag{2.11}$$

Las propiedades de los materiales mayormente empleados en la construcción de los contactos se muestran en la siguiente tabla. Estos valores adquieren importancia, ya que se pueden establecer relaciones para determinar la velocidad de vaporización de los materiales y eventualmente el desgaste de los contactos.

Tabla 1 Propiedades físicas de los materiales de contactos

Material	Calor volumétrico de vaporización, cal-gr/CC	Calor específico de vaporización, cal-gr/gr	Densidad Másica, gr/cc	Temperatura de fusión, °C	Temperatura de vaporización, °C
Grafito	32,200.00	14,300.00	2.25	3,500.00	4,200.00
Tungsteno	20,900.00	1,100.00	19.00	3,370.00	5,927.00
Molibdeno	16,600.00	1,630.00	10.20	2,620.00	4,803.00
Nikel	15,400.00	1,730.00	8.90	1,452.00	2,900.00
Acero	13,600.00	1,730.00	7.86	1,535.00	2,998.00
Titanio	10,700.00	2,380.00	4.50	1,800.00	5,100.00
Cobre	11,500.00	1,290.00	8.92	1,083.00	2,595.00
Plata	6,830.00	650.00	10.50	961.00	2,001.00
Zinc	3,410.00	477.00	7.14	419.00	907.00
Aluminio	7,500.00	2,780.00	2.70	657.00	2,056.00
Estaño	4,310.00	590.00	7.30	232.00	2,270.00
Carburo de tungsteno			16.00		

Como puede observarse en la tabla anterior, los materiales que tienen mayor resistencia a la erosión por arco eléctrico son el grafito, tungsteno y el molibdeno. Estos son los materiales más empleados en los contactos de arqueo.

Estudios recientes como los presentados en [19] han demostrado que la erosión de los contactos de los interruptores, empleando aleaciones de Cobre-Tungsteno, está determinado por la relación entre la pérdida de masa m y la carga total transportada a través del arco Q, como se muestra en la siguiente ecuación

$$\frac{m}{Q} = \frac{\sum_i m_i}{\sum_i Q_i} \tag{2.12}$$

Donde el valor de la carga total transportada es

$$Q = \int_{t_{arc}} |i(t)|dt \approx I_{RMS} \cdot t_{arc} \tag{2.13}$$

Para la ecuación 2.13 I_{RMS} es la corriente eficaz del arco y t_{arc} es el tiempo de arqueo. En este caso, para determinar la cantidad de material erosionado de los contactos, es necesario determinar diversos flujos de energía en la zona de erosión. Estos flujos son:

a. Pérdidas de potencia debido a la evaporación de los materiales de contacto.

$$P_{Vap} = \frac{dm}{dt} \cdot h_{Vap} \tag{2.14}$$

Donde h_{Vap} es la entalpía de vaporización del material del contacto.

b. Caída de tensión en los electrodos.

$$P_{\Delta U} = \Delta U_{\mathrm{Eff}} \cdot |i_{arc}(t)| \tag{2.15}$$

Donde ΔU_{Eff} es la caída de tensión entre el cátodo y el ánodo.

c. Conductividad térmica del contacto.

$$P_{cond} = \lambda \cdot A \cdot \left|\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0} = \frac{C \cdot A}{\sqrt{t}} \tag{2.16}$$

Donde $= \lambda T_0/\sqrt{\pi\chi}$.

$\lambda =$ conductividad térmica

$A =$ superficie del área de contacto donde se presenta la conducción de calor

$\chi =$ coeficiente de difusión térmica

d. Otros mecanismos de transferencia de calor.

$$\phi_{rad} \approx \frac{j^2 \cdot R \cdot (1 - \vartheta)}{2\sigma} \tag{2.17}$$

Donde

$j =$ densidad de corriente en el arco

$\vartheta =$ fracción del arco en el cual se tiene pérdidas por radiación

$\sigma =$ conductividad térmica del arco

Considerando todos los factores de pérdidas anteriores, se tiene la ecuación de la erosión de contactos siguiente

$$P_{Vap} = P_{\Delta U} - P_{Cond} \tag{2.18}$$

Sustituyendo

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\Delta U_{eff} \cdot |i_{arc}(t)|}{h_{Vap}} - \frac{C \cdot A_{contact}}{h_{Vap}\sqrt{t}} \tag{2.19}$$

Integrando la ecuación anterior considerando el tiempo de arqueo, se tiene

$$\frac{m}{Q} = \frac{\Delta\, U_{eff}}{h_{Vap}} - \frac{2C}{h_{Vap}} \cdot \frac{A_{contact}\sqrt{t_{arc}}}{Q} \tag{2.20}$$

Lo que demuestra que la erosión depende de dos términos: el primero es la relación entre la caída de tensión entre los electrodos y la entalpía de vaporización del material del contacto y; el segundo, la erosión específica de la disipación de potencia debido a la transmisión de calor en el contacto.

La ecuación anterior supone que la superficie de la base del arco es constante, sin embargo, para corriente de hasta 30 kA el área de arqueo es menor que el área de contacto. De esta forma, la base del arco se puede mover en forma aleatoria en la superficie disponible del contacto y provocar calentamiento de esta área en forma homogénea.

Para considerar el área efectiva de calentamiento de los contactos, se presupone que el área de la base del arco es menor que el área de contacto, de ésta forma, la zona de calentamiento incrementa con la amplitud del arco eléctrico, en la siguiente proporción

$$A_{\text{Effective}} = \alpha \cdot I_{RMS}^{\beta} \tag{2.21}$$

Por lo tanto, la ecuación de la erosión específica es

$$\frac{m}{Q} = \frac{\Delta\, U_{eff}}{h_{Vap}} - \frac{2C}{h_{Vap}} \cdot \frac{\alpha \cdot I_{RMS}^{\beta} \cdot \sqrt{t_{arc}}}{Q} \tag{2.22}$$

II.2.6 TEORÍAS DEL ARCO ELÉCTRICO

La complejidad física del comportamiento del arco durante el proceso de interrupción ha dado lugar a numerosas investigaciones y desarrollo de modelos que intentan describir dicho proceso. Los primeros modelos desarrollados se enfocaron en el estudio de la corriente y su cruce por cero, ya que en la corriente alterna, es la región donde se produce la re-ignición o la extinción de la misma.

Los modelos más recientes se basan en el cálculo del diámetro del arco, ya que esta característica influye directamente en una de las dimensiones críticas para optimizar la geometría de las toberas de expansión empleadas en los interruptores de soplo (aire o gas SF6)

II.2.6.1 Teoría de Slepian

Joseph Slepian presentó su teoría de la interrupción del arco en 1928 [20]. Esta teoría conocida también como la “teoría de la carrera”, señala que la interrupción exitosa se logra siempre que la rigidez dieléctrica del entre-hierro aumente más rápido que la velocidad de incremento del voltaje del sistema

Slepian visualizó que el proceso de interrupción inicia inmediatamente después del cruce de la corriente por cero, cuando los electrones son forzados fuera del cátodo y cuando una delgada capa de iones positivos, es creada en el entre-hierro inmediatamente cerca de la región del cátodo.

Él pensaba que la rigidez dieléctrica de dicha capa de iones debía ser mayor que el valor crítico de rompimiento del medio dieléctrico, de esta forma se prevenía la re-ignición del arco y se producía una extinción exitosa.

II.2.6.2 Teoría de Prince

Esta teoría establece que el circuito es interrumpido si la trayectoria de la descarga de gas introducida en el arco incrementa durante el periodo de interrupción hasta el punto que el voltaje de recuperación no sea lo suficientemente elevado para producir un rompimiento [21].

En esta teoría se establece que tan pronto la corriente cruza por cero, se establece un periodo de tiempo en el que el arco es seccionado en dos partes por un chorro de gases fríos. Las mitades conductoras del canal de arco son conectadas en serie con la columna de gas, la cual es prácticamente no conductiva.

Si se supone que la conductividad de las secciones de arco es alta en comparación con la del chorro de gas, se puede considera que las secciones de arco son una extensión de los electrodos. En este caso, la rigidez dieléctrica de la trayectoria entre los electrodos es aproximadamente igual al voltaje en un pequeño punto en el cual el rompimiento es precedido por una descarga luminiscente. Al final de este periodo, las dos mitades de arco están separados por una distancia $D = 2vt$, donde v esla velocidad del medio de enfriamiento y t es el tiempo del periodo de corriente. En la siguiente figura se muestra la representación gráfica de la teoría de Prince.

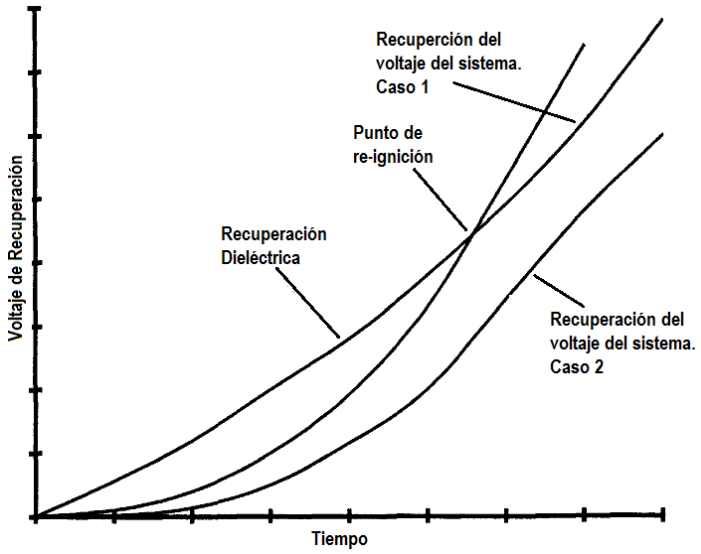


Figura 9 Representación gráfica de la Teoría de Prince [21]

II.2.6.3 Teoría de Cassie

Cassie desarrollo su ecuación para la conductividad del arco basada en la suposición que una corriente elevada de arco está determinada principalmente por las pérdidas de convección durante el intervalo de alta corriente. Bajo esta suposición, la temperatura a través de la sección del arco se mantiene constante; sin embargo, si la corriente cambia, también cambia la sección de arco, pero no la temperatura en la columna.

Bajo estas suposiciones, el estado estable del modelo de la conductancia es proporcional a la corriente, así que el gradiente de voltaje E_0 es fijo.

La siguiente expresión es una forma simplificada de la ecuación de Cassie, la cual está dada en términos de la corriente instantánea.

$$\frac{d}{dt}G^2 = \frac{2}{\theta}\left(\frac{I}{E_0}\right)^2 \tag{2.23}$$

Donde G es la conductancia de arco. También puede expresarse en términos del voltaje de arco e y de la tensión inicial del arco E_0, como se muestra a continuación

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G}{\theta}\left(\frac{e^2}{E_0^2} - 1\right) \tag{2.24}$$

La constante de tiempo del circuito está determinada por

$$\theta = \frac{Q}{N} \tag{2.25}$$

Donde Q es la capacidad de almacenamiento de energía y N es la tasa de pérdida de energía.

Los parámetros de la ecuación de Cassie dependen de la corriente de arco y de su sección transversal, razón por la cual este modelo es adecuado para corrientes elevadas y secciones de arco amplias, tales como las que ocurren por falla en líneas cortas. Los parámetros de las ecuaciones anteriores dependen del medio de extinción, y en general pueden ser obtenidos de pruebas en el sistema o de pruebas sintetizadas [22].

II.2.6.4 Teoría de Mayr

Mayr consideró que la columna de arco tiene un diámetro constante y que la temperatura varía en función del tiempo en una dimensión radial. Consideró que el decremento de la temperatura del arco es función de la conducción térmica y que la conductividad eléctrica del arco era dependiente de la temperatura.

La teoría de Mayr considera que la pérdida de energía N_0 es constante, la cual es independiente de la temperatura o de la corriente [23]. La ecuación diferencial de Mayr es la siguiente

$$\frac{1}{G}\frac{dG}{dt} = \frac{1}{\theta}\left(\frac{EI}{N_0} - 1\right) \tag{2.26}$$

Donde $\theta = Q_0/N_0$.

Esta ecuación expresa que la variación de la conductancia de arco respecto del tiempo depende del grado de ionización térmica de la columna de arco, por lo tanto, este modelo es óptimo para pequeñas corrientes inductivas o capacitivas.

II.2.6.5 Teoría Combinada de Browne

Estudios posteriores han observado que la temperatura del arco está muy por encima de los 6,000 °K supuestos por Mayr, y que es más probable que lleguen hasta los 20,000

°K. Estas temperaturas son tan elevadas que conducen a un aumento lineal en la conductividad del gas, en lugar de la relación exponencial que se había supuesto.

T. E. Browne detectó esta condición y desarrolló su teoría en 1948 [24]. Esta teoría está basada en los modelos de Cassie y Mayr y cubre el análisis de las re-igniciones térmicas que ocurren durante los primeros microsegundos posteriores a la corriente post cero.

Iniciando con las ecuaciones de Cassie y Mayr, y suponiendo que antes del cruce por cero, la corriente está definida por las características eléctricas del sistema, y después del cruce por cero, el voltaje a través del entrehierro está determinado estrictamente por el circuito de arco. Browne supuso que la ecuación de Cassie era aplicable a la región de alta corriente previa al cruce por cero y poco después del cruce por la re-ignición térmica. La ecuación de Mayr fue empleada como puente entre las regiones donde se aplica el concepto de Cassie. La teoría de Browne se resume en las siguientes expresiones

a) De la ecuación de Cassie previo al cruce de la corriente por cero

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{R^2}\right)+\frac{2}{\theta}\left(\frac{1}{R^2}\right)=\frac{2}{\theta}\left(\frac{1}{E_0}\right)^2 \tag{2.27}$$

b) De la ecuación de Mayr en el periodo alrededor de la corriente cero

$$\frac{dR}{dt}-\frac{R}{\theta}=-\frac{e^2}{\theta N_0} \tag{2.28}$$

III. MARCO METODOLÓGICO

El presente trabajo, se basará en el estudio de los parámetros reales de la Red Nacional de 400 kV de la CFE. Con estos parámetros se puede analizar el comportamiento de dichos interruptores en situaciones tipo, además, con la síntesis de los eventos de falla obtenidos de los datos históricos, podrán realizarse simulaciones de las condiciones reales de operación de los interruptores. Los cálculos obtenidos brindarán una primera aproximación para determinar el deterioro de contactos en condiciones reales.

El proceso de investigación inicia con la adquisición de los parámetros de la red eléctrica en la que están operando los interruptores. Una vez adquiridos estos parámetros, se reducirá a un circuito equivalente de Thévenin. Con estos datos se podrán hacer simulaciones de conexión y desconexión de líneas de transmisión para analizar los transitorios generados en los contactos.

Una vez adquiridos los datos de simulación del comportamiento de los fenómenos transitorios en el interruptor de potencia, se hará una integración de estos resultados con los modelos de arco eléctrico en EMTP. De esta forma podrán determinarse las características de los arcos eléctricos en los diferentes escenarios.

Con los resultados de las simulaciones se determinará la energía contenida en el arco eléctrico. Este resultado será la base para determinar la condición operativa de los contactos y el grado de desgaste ocurrido en cada operación.

Finalmente, con base en la energía del arco eléctrico y por el análisis histórico de funcionamiento y valores de pruebas, se establecerán recomendaciones para establecer los programas de mantenimiento.

Esta metodología podrá aplicarse para el estudio de cualquier interruptor de potencia, independientemente de su relación con el sistema o de su función específica.

IV. ESETADO DEL ARTE DE INTERRUPTORES DE POTENCIA

IV.1 CLASIFICACIÓN DE LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA

La clasificación de los interruptores de potencia se realiza en base a diferentes características, las cuales se mencionan en la siguiente tabla.

Tabla 2 Clasificación de los interruptores de potencia [25] [26]

Características	**Clasificación**
Tensión de operación	• *Bajo voltaje: menor a 1 kV* • *Medio voltaje: 1 kV a 52 kV* • *Alto y Extra alto voltaje: 66 kV a 756 kV* • *Ultra alto voltaje: superior a 765 kV*
Diseño externo	• *Tanque muerto* • *Tanque vivo*
Medio de interrupción	• *Interrupción en aire* • *Interrupción por soplo de aire* • *Gran volumen de aceite* • *Pequeño volumen de aceite* • *Aislados en Gas SF6* • *Interrupción en vacío*

IV.2 PRINCIPIOS DE EXTINCIÓN EN INTERRUPTORES DE POTENCIA

La clasificación por el medio de interrupción es la más importante, ya que determina la clave para la extinción de la corriente. En este apartado se abordarán en forma general los principios de extinción de los interruptores de potencia

IV.2.1 INTERRUPTORES EN AIRE.

En los interruptores en aire, los contactos abren y cierran en aire a presión atmosférica. Este tipo de interruptores se emplean principalmente en sistemas de distribución de media tensión, en lugares donde se restringe el empleo de aceite o con alto grado de riesgo de explosión.

El principio de extinción de arco de un interruptor en aire es diferente de aquellos que emplean cualquier otro medio de interrupción. Mientras que el objetivo es el mismo: prevenir la reignición del arco después del cruce por cero, creando un ambiente donde el entrehierro de los contactos soporte el voltaje de recuperación del sistema; el interruptor en aire realiza esta acción mediante la formación de un voltaje de arco de mayor valor al voltaje de la fuente de alimentación.

La extinción del arco en los interruptores en aire se logra en tres etapas:

a. Enfriamiento del plasma de arco, produciendo un gradiente de voltaje muy alto.
b. Alargamiento de la trayectoria del arco para aumentar la tensión de arco.
c. Separación del arco en un número determinado de arcos en serie.

La primera etapa se logra forzando el arco dentro de un contacto con un entrehierro de material aislante tan grande como sea posible. Esto se logra con una cámara de arqueo que rodea los contactos y la zona de arco. Ésta cámara tiene cierto diseño que obliga al arco a ajustarse a ella, haciendo que se tenga un mejor enfriamiento del canal de arco.

La segunda etapa se logra en forma simultánea con la primera. Las paredes de la cámara de arqueo se conforman de tal manera que el arco se fuerza a circular en estrecha proximidad con ellas y, además, se impulsa a través de un canal serpenteante. De esta forma, el alargamiento del arco y el simultáneo incremento en la caída de tensión por unidad de longitud, provocan un voltaje de arco elevado y una alta resistencia de arco. Esto cambia el factor de potencia del sistema de forma tal que el voltaje instantáneo de la fuente de alimentación, en cuanto la corriente se aproxima a cero, es mucho menor que su valor pico. Finalmente, la resistencia de arco amortigua la oscilación de la tensión transitoria de restablecimiento impidiendo la reignición del arco.

El manejo de corrientes de arco muy elevadas se hace colocando la cámara de extinción en la parte superior de los contactos. Esto permite que los contactos y las conexiones que conducen a ellos formen un circuito estrecho, de forma tal que se produce un campo magnético entre los contactos que fuerza al arco hacia la cámara.

La tercera etapa se logra mediante el empleo de placas divisoras de arco en el canal de arco, esto no sólo aumenta el gradiente de voltaje, sino que también ayuda a generar un gran número de caídas de voltaje entre el ánodo y el cátodo. En la figura 10 se muestra la estructura general de la cámara de arqueo y los contactos de un interruptor en aire.

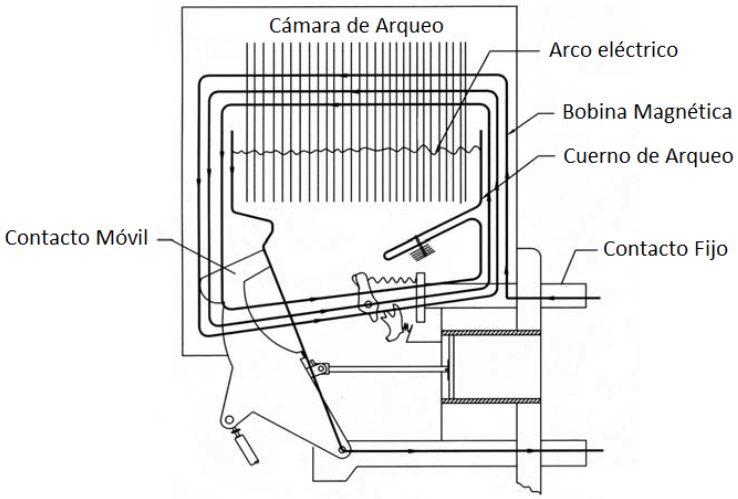


Figura 10 Estructura de la cámara de extinción de un interruptor en aire [26]

La técnica interrupción de los interruptores de aire, es la única que no depende del cruce de la corriente por cero. Esto es, si la tensión de arco se puede incrementar por sobre la tensión de la fuente de alimentación, el arco se extinguirá, independientemente de si la corriente es alterna o directa.

IV.2.2 INTERRUPTORES EN SOPLO DE AIRE.

En este tipo de interruptores el arco se desarrolla en una cámara de arqueo con medio de interrupción por aire. La extinción del arco se logra por la acción que ejerce un chorro de aire a alta presión, el cual se impulsa en el entrehierro mientras se realiza la separación física de los contactos.

La figura 11 muestra la construcción típica de un interruptor de soplo de aire.

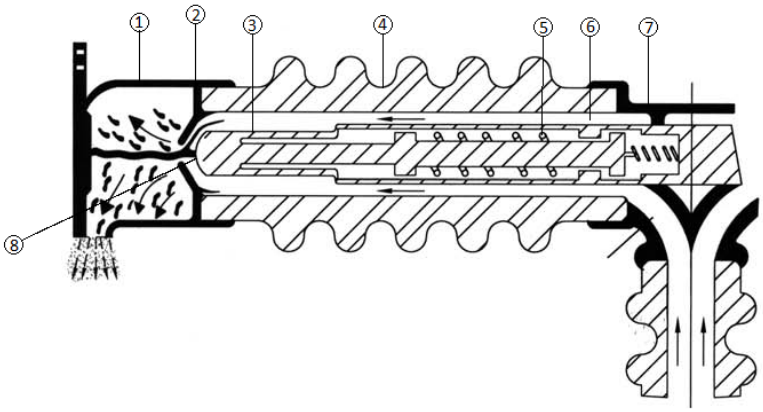


Figura 11 Estructura de la cámara de arqueo de interruptores en soplo de aire [26]

Cada interruptor consiste en un aislador de porcelana, instalado sobre un colector para admisión de aire, con una cámara de expansión instalada en contraposición al final de la porcelana. La cámara de expansión consiste en una carcasa metálica con ranuras en la parte inferior para dirigir los gases, productos de la extinción, hacia la atmósfera.

El conjunto de contacto móvil se compone de un contacto acoplado a dos pistones, por medio de una barra aislada que se mueve en el interior del tubo de contacto. La corriente de carga en el contacto móvil se transfiere al tubo de contacto a través de los dedos de contacto de transferencia. En el final del contacto móvil se instala una punta de arqueo.

La capacidad de interrupción de los interruptores de soplo de aire se incrementa en relación con el rango de presión. Normalmente la presión de operación es entre 30 y 35 bares. Para que estos equipos cumplan con los requerimientos de corriente de corto circuito, se requiere que el aire empleado para la extinción del arco esté extremadamente seco.

IV.2.3 INTERRUPTORES EN GRAN VOLUMEN DE ACEITE.

En este tipo de interruptores los contactos están sumergidos en una cámara de aceite, el cual también provee aislamiento a tierra entre los contactos y el tanque.

En los primeros diseños, durante la operación de apertura, el movimiento del aceite, el efecto refrigerante del hidrógeno producido por la vaporización del aceite por el arco eléctrico y la separación de los contactos, eran los factores necesarios para enfriar el canal del arco y producir la rigidez dieléctrica necesaria para interrumpir corrientes de falla relativamente pequeñas, como se muestra en la figura 12.

A medida que la corriente de falla aumenta, la presión en el interior del tanque aumenta debido a la vaporización del aceite, esto incrementa las propiedades de de-ionización de la burbuja de hidrógeno que rodea la trayectoria de arco, aumentando su rigidez dieléctrica, asegurando la capacidad de interrupción del dispositivo.

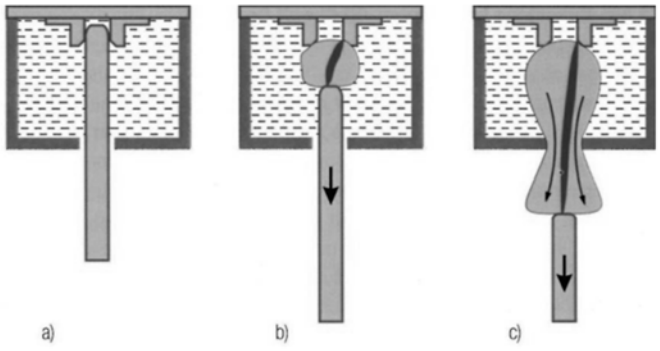


Figura 12 Cámara de arqueo interruptor gran volumen de aceite [3].
(a) contactos cerrados, (b) inicia separación de contactos, arco eléctrico y producción de burbuja de hidrógeno alrededor del arco, (c) expulsión de los gases de arqueo.

Desarrollos posteriores condujeron al diseño de cámaras de control de arco de “soplo lateral” como se muestra en la figura 13

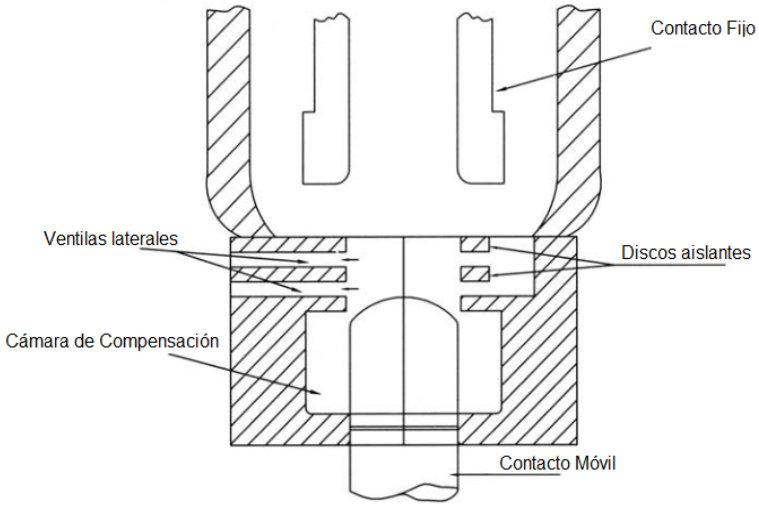


Figura 13 Sección transversal de una cámara de interrupción con soplo lateral y cámara de compensación [26]

El principio de operación de este dispositivo se basa en que la presión producida por la vaporización y disociación del aceite se retiene en la cámara de arqueo, mientras que el contacto móvil se desplaza a través de una serie de placas aislantes. La separación entre las placas aislantes y el contacto es muy pequeña, por lo tanto, prácticamente no existe pérdida de presión dentro de la cámara hasta que el contacto móvil descubre una de las ventilas laterales creadas por el corte de una ranura en una de las placas.

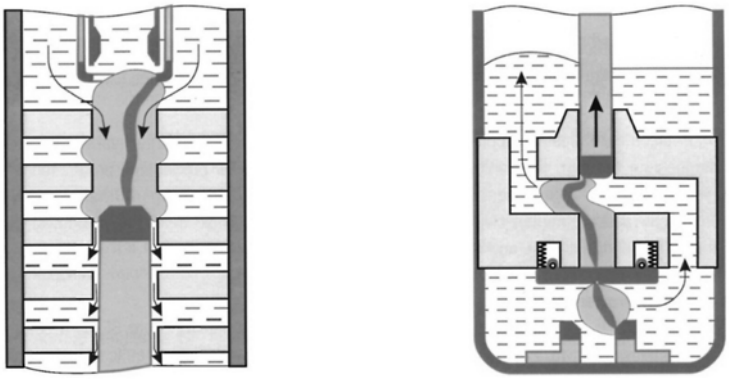
El hidrógeno comprimido puede escapar a través de la trayectoria de arco, ejerciendo una acción de refrigerante en la columna ionizada. Cuando la corriente cruza por cero, la resistencia post-arco aumenta rápidamente debido a la acción de enfriamiento y se logra la interrupción. Para la interrupción de corrientes muy pequeñas, se emplea una cámara de aceite suplementaria bajo las ranuras de venteo conocida como cámara de compensación. El propósito es aportar una cantidad adicional de aceite frío para ser vaporizado, con el fin de alimentar de una mayor cantidad de gas limpio a través del canal de arco.

IV.2.4 INTERRUPTORES EN PEQUEÑO VOLUMEN DE ACEITE.

Este tipo de interruptores emplean aceite como medio de extinción, sin embargo, a diferencia de los interruptores de gran volumen de aceite, estos diseños tienen los elementos de interrupción dentro de una cámara aislada conectada a nivel potencial de línea, lo que hace que se reduzca la cantidad de aceite empleado, ya que sólo se requiere para el proceso de extinción de arco y no para aislamiento a tierra

En el proceso de extinción de un interruptor en pequeño volumen de aceite, el arco se contiene dentro de la cámara de arqueo y por lo tanto, la burbuja de hidrógeno formada por la vaporización del aceite, también se contiene dentro de dicha cámara. Conforme los contactos continúan su movimiento la barra del contacto móvil se separa del orificio de la parte inferior de la cámara, dejando una salida, similar a una tobera, por donde se expulsa el hidrógeno atrapado dentro de la cámara de interrupción.

La figura 14 muestra los arreglos esquemáticos de las diferentes cámaras de interrupción de interruptores en pequeño volumen de aceite.



(a) Cámara de interrupción soplado longitudinal

(b) Cámara de interrupción soplado transversal

Figura 14 Sección transversal de cámaras de interrupción en pequeño volumen de aceite [26]

Los interruptores en pequeño volumen de aceite son sensibles a las altas tensiones transitorias de restablecimiento y, por lo tanto, son propensos a reencendidos durante la conmutación de equipos como los bancos de capacitores. Este problema se elimina presurizando la cámara de interrupción con nitrógeno.

IV.2.5 INTERRUPTORES EN VACÍO.

En un interruptor en vacío, el proceso de interrupción se desarrolla en vacío. Este tipo de tecnología se emplea en equipos en media tensión, ya que interruptores para tensiones de 72.5 a 145 kV no son comercialmente viables.

En principio, el interruptor en vacío tiene una cámara de interrupción de acero colocada en forma simétrica entre dos aisladores de porcelana. La figura 15 muestra los componentes principales de este tipo de interruptores.

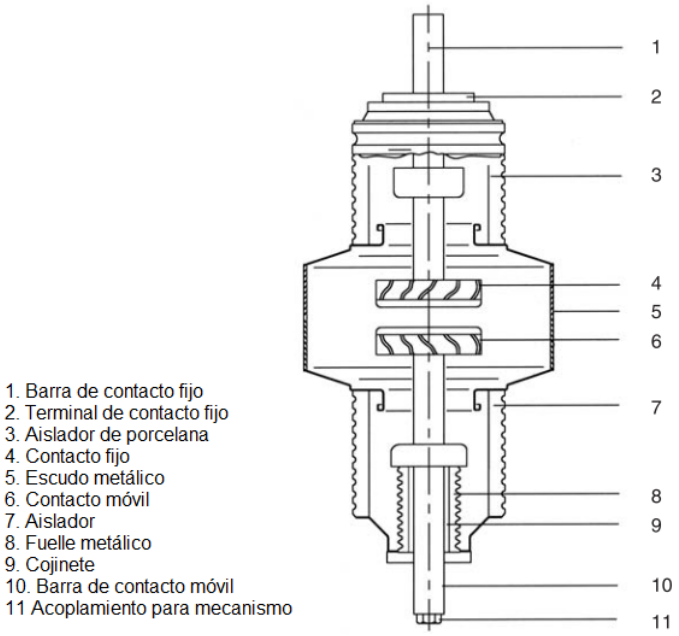


Figura 15 Sección transversal de una cámara de interrupción en vacío [26]

Los diseños actuales tienen un escudo metálico alrededor de los contactos de arqueo. El diámetro de los contactos y sus barras están diseñados para ajustarse con la cámara de

arqueo y sus aisladores. Los contactos móviles logran su desplazamiento gracias al empleo de fuelles metálicos. La cámara de arqueo está unida a las bridas de la carcasa, las cuales a su vez, están soldadas a la parte metálica de los aisladores de porcelana, obteniendo un interruptor sellado herméticamente. La presión de vacío es de 10^{-6} bares por lo general.

El material de los contactos representa un papel importante en el desempeño del interruptor en vacío, y, de hecho, el desempeño completo de le tecnología de vacío se centra alrededor del empleo del material apropiado así como la geometría del contacto.

Los materiales más comunes son Cobre-Bismuto (Cu-Bi), Cobre-Cromo (Cu-Cr) y Cobre-Plata (Cu-Ag), para todos los rangos de tensión de los interruptores, desde 8 kA hasta 63 kA.

En cuanto a la geometría, el desarrollo de los contactos se muestra en la figura 16. Los contactos planos son los más simples, pero sólo tienen capacidades de corte menores a 4.5 kA.

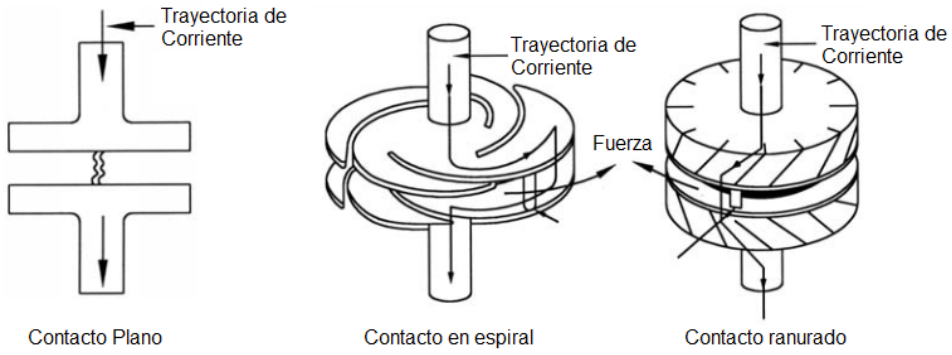


Figura 16 Diseño de contactos de interruptores en vacío [26]

Desarrollos posteriores llegaron al empleo de contactos tipo espiral o con ranuras inclinadas en las caras del contacto. Estos diseños emplean el campo magnético transversal producido por la corriente del circuito fluyendo a través de las ramas espirales o de las ranuras, para manejar las corrientes de corto circuito, y el vacío rodea inmediatamente la columna de arco sobre las superficies de contacto. Esto resulta en dos

efectos: (a) la superficie de los contactos tiene una erosión uniforme y se mantiene una superficie relativamente lisa después de una corriente de corto circuito elevada, y (b) la columna no puede mantenerse a sí misma cuando la corriente cruza por cero.

IV.2.6 INTERRUPTORES EN GAS SF6

Estos interruptores emplean como medio de extinción gas Hexafloruro de Azufre. El gas SF6 es un gas electronegativo con un excelente comportamiento dieléctrico y grandes propiedades de extinción de arco eléctrico, lo que hace posible que se diseñen interruptores de potencia con menores dimensiones, entre-hierros más pequeños y con menores costos de mantenimiento.

Una innovación en el diseño del tipo de soplado de los interruptores en SF6 se conoce como principio de “asistencia térmica”, donde la energía del arco se emplea para desarrollar presiones dentro de la cámara de arqueo para la extinción del arco. Por lo tanto, los requerimientos de energía de los mecanismos de operación pueden reducirse.

El comportamiento de la corriente arco durante el cruce por cero e inmediatamente después, tiene una gran importancia en el proceso de interrupción corriente. En el gas SF6, el diámetro del arco es relativamente pequeño y, como consecuencia, la constante térmica de tiempo del arco (la cual es una función del cuadrado del radio del arco), al aproximarse al cruce por cero, es alrededor de 100 veces más pequeña que en el aire. La rigidez dieléctrica del interruptor incrementa rápidamente después del cruce de la corriente por cero, por lo tanto, el equipo es capaz de manejar picos extremos de la tensión transitoria de restablecimiento entre los contactos. [26]

La primer generación de interruptores en gas SF6 emplea el principio de presión dual usado en los interruptores de soplo de aire. El gas se presuriza y almacena en un receptáculo de alta presión. Para interrumpir la corriente, el gas se impulsa dentro de la cámara de interrupción. Posteriormente se recolecta en un receptáculo de baja presión.

Una vez aquí, se bombea nuevamente al receptáculo de alta presión, como se muestra en la figura 17.

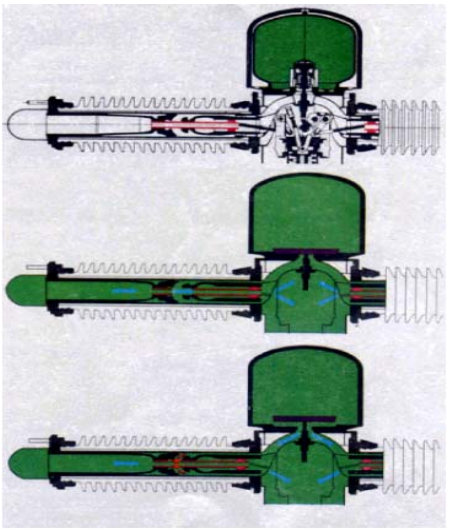
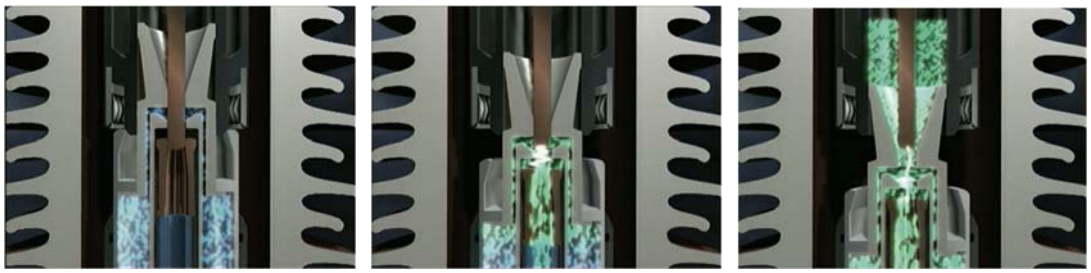


Figura 17 Diagrama esquemático de operación de un interruptor de doble presión de SF6

La principal desventaja de este diseño es el riesgo de licuefacción del gas en la cámara de alta presión debido a bajas temperaturas. Para evitarlo, el receptáculo de alta presión está provisto con calefactores.

La segunda generación de interruptores de gas SF6 trabaja bajo el principio de una sola presión. En este tipo, el interruptor se llena a presión nominal y la diferencia de presión necesaria para la extinción del arco se produce durante el movimiento del sistema de contactos. En la siguiente figura se muestra el proceso de interrupción.



a) Posición cerrado *b) Proceso de apertura* *c) Posición abierto*

Figura 18 Diagrama esquemático de interruptor de segunda generación de SF6

Durante la operación de interrupción, el cilindro de compresión se desplaza a lo largo del sistema de los contactos contra una posición fija. Conforme los contactos se separan, se establece un arco entre ellos, el cual se extingue al cruce de la corriente por cero. En el mismo instante, el gas para la extinción fluye a través de la boquilla de la tobera a alta velocidad, de-ioniza el entrehierro de los contactos y previene la reignición del arco eléctrico. En posición abierto, el entrehierro es cubierto con gas SF6, formando el aislamiento necesario para soportar el voltaje de recuperación del sistema.

Para este diseño, el mecanismo de operación debe proveer la energía requerida no sólo para mover los contactos, sino también para producir el diferencial de presión requerida para la extinción del arco eléctrico, razón por la cual este tipo de interruptores necesitan mecanismos de accionamientos complejos y robustos.

En la tercera generación de interruptores de potencia, la misma energía del arco se emplea para producir la presión necesaria para la extinción dentro de la cámara de presión. El mecanismo de operación es liberado de la gran cantidad de energía que se requiere para la compresión del gas, empleando por lo tanto menor energía en los mecanismos de accionamiento. El principio de extinción se muestra en la siguiente figura.

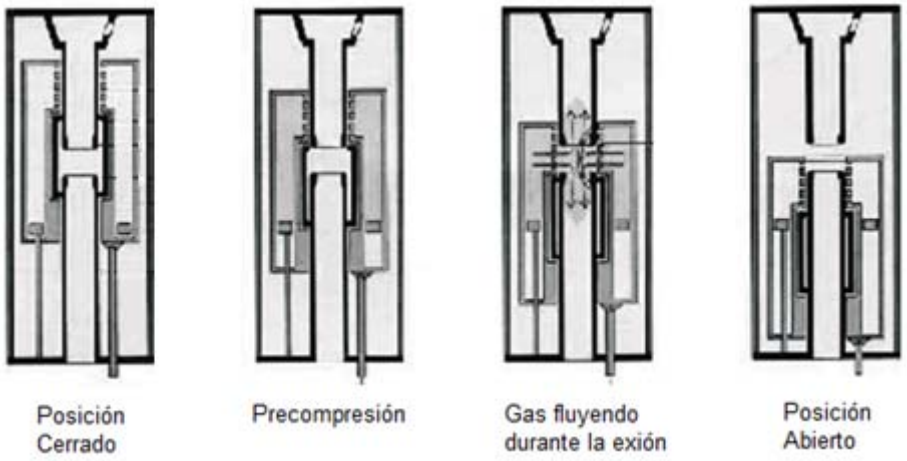


Figura 19 Diagrama esquemático de los interruptores de tercera generación de SF6 [26]

V. TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS POR CONMUTACIÓN DE ELEMENTOS DE RED

Las redes eléctricas de potencia son uno de los más complejos sistemas diseñados, construidos y operados por los ingenieros en la actualidad. Esta complejidad se debe en gran medida a que la electricidad no puede almacenarse en grandes cantidades, lo que obliga a los sistemas eléctricos a mantener un constante balance entre la generación y el consumo, debiendo mantener la frecuencia y el voltaje en forma constante en cada nivel de consumo. Durante la operación normal de las redes eléctricas, diferentes elementos son conmutados, además, la acción de elementos de control para la liberación de fallas, provocan cambios en las redes. Dichos cambios producen fenómenos transitorios de voltaje y de corriente.

Un fenómeno transitorio en un sistema eléctrico de potencia, ocurre cuando la red cambia de un estado estable a otro estado [27]. El periodo de tiempo en que ocurre un transitorio de voltaje o de corriente oscila en un rango de microsegundos a milisegundos[2]. En esta escala de tiempo, durante la falla en un sistema, la corriente de corto circuito puede ser considerada como un estado estable donde la energía se manifiesta principalmente como campo magnético y, cuando la corriente de falla se interrumpe, el sistema se transfiere a otro estado estable, donde la energía se manifiesta predominantemente en forma de campo eléctrico.

Estos fenómenos de transferencia de energía se presentan como ondas viajeras en las líneas y oscilaciones entre inductores y capacitores del sistema. En estas condiciones, los sobre-voltajes ocasionados pueden llegar a magnitudes peligrosas para los componentes de las redes, y su severidad queda limitada por las impedancias características y los tiempos de viaje de dichas oscilaciones.

[2] A los fenómenos transitorios que ocurren entre el rango de microsegundos a algunos milisegundos se denominan transitorios electromagnéticos.

V.1 TRANSITORIOS DEBIDOS A LA CONEXIÓN DE CIRCUITOS.

Una de las operaciones principales que deben realizar los interruptores, es la conexión de circuitos, y en muchas ocasiones estas operaciones se realizarán en condiciones de corto circuito.

La representación más simple de un circuito se muestra en la figura 20. La carga está representada por una combinación de una resistencia y una inductancia serie.

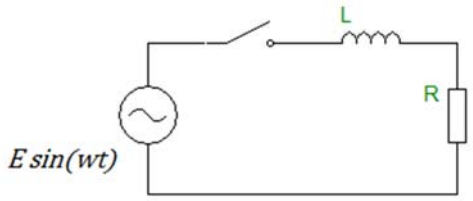


Figura 20 Circuito RL con fuente de voltaje sinodal

La carga conectada a la fuente tiene un factor de potencia determinado por

$$\cos\varphi = \frac{R}{|Z|} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \tag{5.1}$$

Con el cierre del interruptor, la corriente que circula en el circuito es

$$Ri + L\frac{di}{dt} = E_m \sin(\omega t + \theta) \tag{5.2}$$

La corriente se evalúa para $I(0) = 0$. El resultado es una corriente alterna con una componente de CD.

$$i(t) = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}\left[\sin(\omega t + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi)\epsilon^{-Rt/L}\right] \tag{5.3}$$

El primer término representa el valor final de la corriente en estado estable. La amplitud es $E_m/|Z|$ con un ángulo de fase $-\varphi$ respecto del voltaje. El segundo término es la

componente transitoria. Esta componente involucra el valor exponencial $\epsilon^{-Rt/L}$, además para $t = 0$, es igual y opuesto al término de estado estable, asegurando así el inicio de la corriente en cero.

En la conexión de un circuito $R - L$, la corriente demandada no puede alcanzar el valor $i(t) = V_m(t)/|Z|$ en forma instantánea porque la inductancia demanda que la corriente inicie de cero. Por lo tanto, la componente transitoria permite llevar a la corriente a su estado estable en forma continua. El periodo de tiempo que decrece la componente de CD en una corriente asimétrica depende de las constantes X/R. En la figura 21 se observan los valores de corriente de la ecuación 5.3

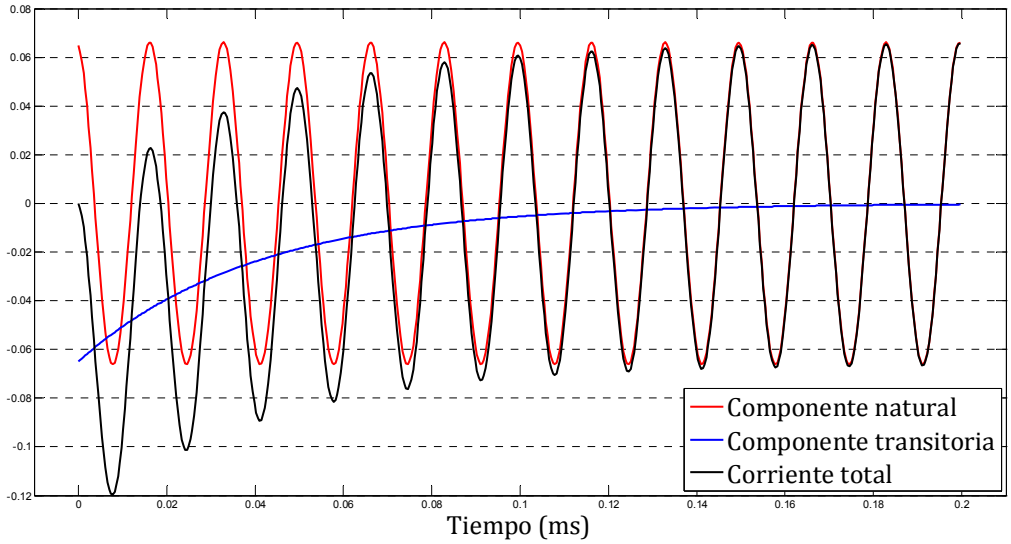


Figura 21 Corriente alterna asimétrica de la ecuación 5.3

El cierre del interruptor puede ocurrir en cualquier instante de tiempo por lo que es posible que se produzca cuando se tiene el mayor desfase de la onda de corriente respecto del cruce por cero. En esta condición provocará que el primer pico de la onda de corriente sea de dos veces el valor de la corriente de corto circuito. El interruptor debe ser diseñado eléctrica, mecánica y térmicamente para soportar los esfuerzos provocados por esta condición y estar disponible para las operaciones subsecuentes [28]. Es importante notar que un interruptor en estas condiciones, estará sometido a fuerzas electromagnéticas las cuales podrían provocar deformaciones en los componentes de un interruptor [29].

Cuando los interruptores deben interrumpir corrientes asimétricas, puede darse el caso que no sea capaz de hacer que la corriente sea cero inmediatamente después que la primera onda de corriente cruza por cero. Esto provoca un reencendido del arco y que la interrupción se efectúe en una onda de corriente menor.

V.2 TRANSITORIOS POR CONMUTACIÓN DE COMPONENTES CAPACITIVOS

V.2.1 CORRIENTE CAPACITIVA DE INRUSH

La corriente capacitiva de inrush[3] se presenta en la conexión de bancos de capacitores, ésta corriente fluye desde la subestación cuando los bancos se conectan a la red. La conmutación de estos elementos no es algo sencillo, y sus efectos se deben considerar para el diseño de los componentes de los bancos de capacitores y su equipo de conexión. Esto es porque el elemento capacitivo contiene una carga eléctrica que puede provocar la re-ignición del medio dieléctrico. Además, el proceso continuo de interrupción de corrientes capacitivas produce voltajes elevados que deben ser soportados por el entrehierro y el medio dieléctrico de las cámaras de interrupción.

Para determinar la componente transitoria de la corriente del circuito de la figura 22, se supone que la frecuencia del sistema permanece constante, debido a que la frecuencia transitoria es mucho mayor. La corriente transitoria $i(t)$ depende de las condiciones iniciales del circuito y de sus parámetros. Si el capacitor C está descargado en $t = 0$, cuando el interruptor cierra, la corriente es:

$$i(t) = \left[\frac{E(0)}{Z_s}\right] \sin(2\pi f_s t) \tag{5.4}$$

[3] La corriente de inrush es la corriente absorbe un equipo cuando se conecta a una fuente. Tiene una forma de onda distorsionada debido a las inductancias y capacitancias, la cual se sobrepone a la forma de onda de frecuencia fundamental.

Donde $Z_s = \sqrt{(L_s/C)}$ es la impedancia característica del circuito; $f_s = 1/2\pi\sqrt{(L_s/C)}$ es la frecuencia natural y, $E(0)$ es el voltaje instantáneo de la fuente de alimentación en el instante de cierre.

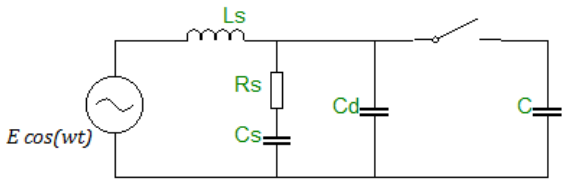


Figura 22 Diagrama unifilar de una subestación con un capacitor para regulación de voltaje

El valor de corriente obtenido con la ecuación 5.4, puede ser muy alto comparado con la corriente nominal del banco de capacitores, como se muestra en la figura 23. Esta situación puede provocar problemas en el interruptor, ya que se produce en preencendido en los contactos de arqueo que puede hacer que éstos se suelden. Además, el canal de plasma creado, puede producir una onda de choque y dañar a las cámaras de arqueo por sobrepresiones internas.

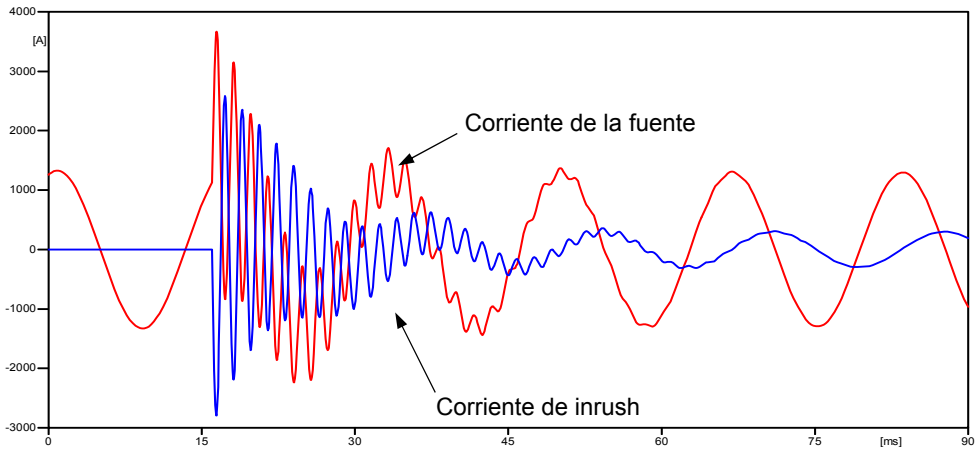


Figura 23 Corriente de inrush. Banco de capacitores C1 de figura 22.

Una condición especial en la conexión de bancos de capacitores es la denominada Banco-Banco. En esta condición, se tienen capacitancias lado carga y lado fuente del interruptor.

En el circuito de la figura 24, se ilustra esta condición. Se supone un sistema de 34.5 kV, sólidamente conectado a tierra, con una corriente de corto circuito de 25 kA rms simétricos. Tiene una carga representada por una impedancia $Z_{carga} = 14.2 + i10.6$ ohms. Se supone que $C_1 = 18\ MVA$ y $C_2 = 10\ MVA$. La frecuencia del sistema es 60 Hz. El banco de capacitores C1 ha permanecido conectado a la fuente de forma tal que se tiene un régimen permanente. El banco de capacitores C2 se ha desconectado de la fuente y se conectó nuevamente, mientras aún tenía cierto voltaje remanente.

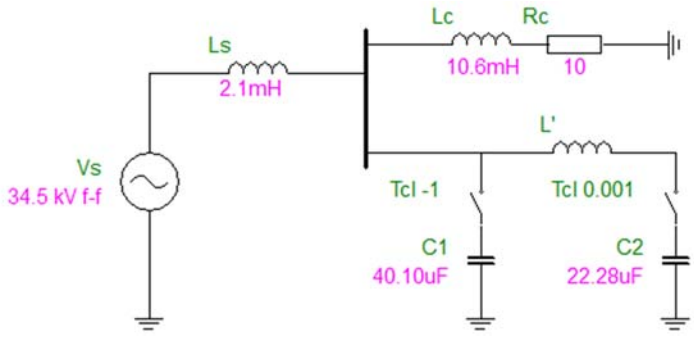


Figura 24 Circuito de prueba de conexión Banco-Banco de capacitores

El primer transitorio, provoca un rápido intercambio de carga entre los capacitores conmutados, los cuales son llevados a un voltaje común debido a las pérdidas que amortiguan el transitorio. Este voltaje es diferente al de la fuente, por lo que fluye un segundo transitorio por la reconexión del segundo banco de capacitores a la línea. En la situación más desfavorable se presenta una re-ignición cuando el capacitor lado carga tiene polaridad opuesta al capacitor lado fuente. La corriente de descarga fluye de una capacitancia a otra a través de la inductancia de pérdidas.

En este caso, la frecuencia de la oscilación de corriente y su amplitud pico, son mucho mayores que el caso de la conmutación de un solo capacitor, como se muestra en la figura 25.

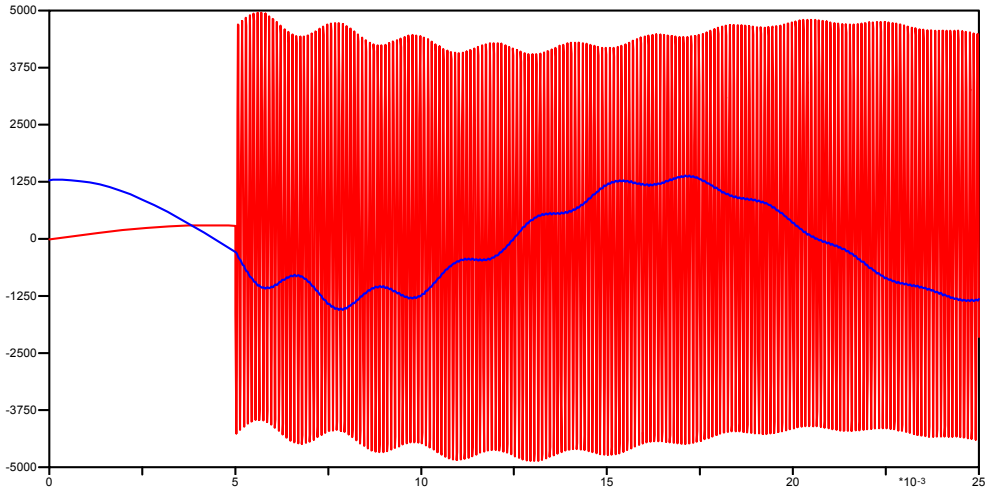


Figura 25 Transitorio de corriente por la conexión Banco-Banco de capacitores. En color azul la corriente de la fuente y en color rojo la corriente de C1

V.2.2 INTERRUPCIÓN DE CORRIENTES CAPACITIVAS.

En los circuitos predominantemente capacitivos, la corriente capacitiva es de algunos cuantos amperios y puede ser interrumpida en tiempos de arco cortos. Sin embargo, en el instante de la interrupción de la corriente, el capacitor está completamente cargado y su voltaje es aproximadamente igual al voltaje pico de la fuente. Después de medio ciclo, la fuente de alimentación tiene polaridad invertida, lo que hace que el voltaje a través de los contactos del interruptor se incremente.

El siguiente circuito, muestra un circuito simplificado capacitivo de un sistema de potencia, donde L_s es la inductancia de la fuente, R_s y C_s representan la resistencia y capacitancia de los componentes de la red los cuales producen la TTR. La carga capacitiva está representada por C conectada a través de la inductancia L' con el lado carga del interruptor.

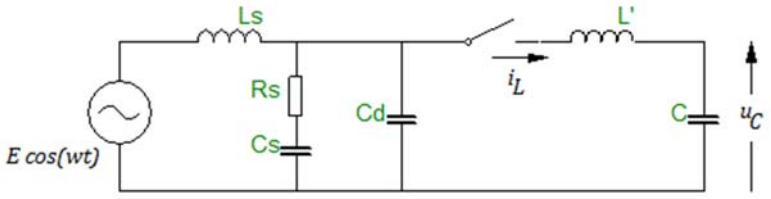


Figura 26 Representación unifilar de un circuito capacitivo

Cuando el interruptor está en la posición cerrado, el voltaje lado carga es mayor que el voltaje lado fuente. El diferencial de voltaje $\Delta U = U_c - E$ produce el fenómeno Ferranti, que es el efecto del capacitor actuando como una fuente de potencia reactiva, la cual incrementa el voltaje en las terminales del interruptor.

El efecto Ferranti produce un incremento de voltaje lado fuente del interruptor, provocando una oscilación transitoria de frecuencia:

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \tag{5.5}$$

Y cuya amplitud está determinada por:

$$\frac{du}{dt} = Z_s \frac{di_s}{dt} \tag{5.6}$$

Donde Z_s es la impedancia característica del circuito lado fuente. El transitorio de voltaje calculado en las ecuaciones anteriores, es un efecto lado fuente. En el lado carga del interruptor no existe variación ya que la carga eléctrica retenida produce un voltaje constante. Sin embargo, cuando el voltaje de la fuente cambia de polaridad, se presenta un voltaje a través de los contactos del interruptor de un valor cercano a dos veces el valor pico.

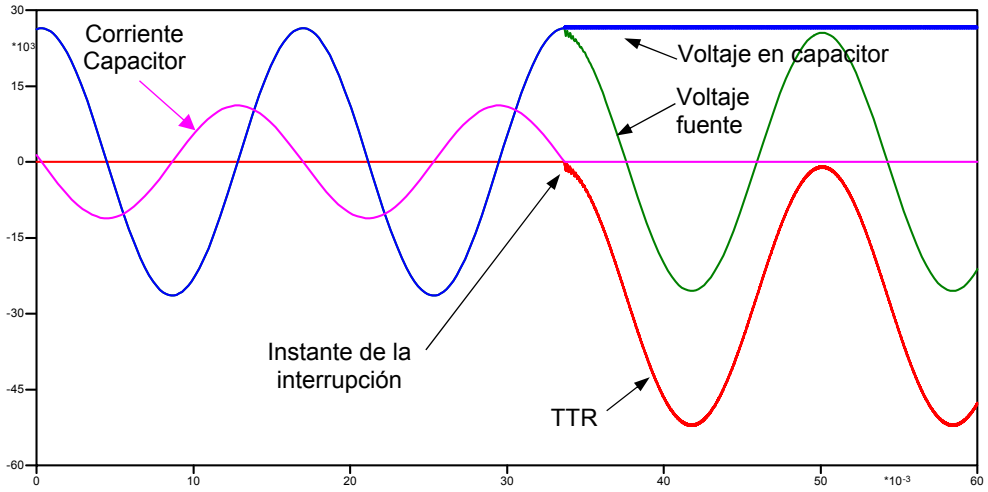


Figura 27 Corriente y voltajes durante la interrupción de corriente capacitiva

La corriente capacitiva puede ser interrumpida en tiempos de arco cortos, pero, aun cuando los contactos continúan separándose, el entre-hierro es pequeño y el dieléctrico puede romperse provocando una nueva re-ignición[4]. Esta re-ignición descarga al capacitor través del canal de arco y las inductancias L_s y L'. El resultado de este proceso es una corriente oscilatoria con valor pico y frecuencia determinados por las siguientes ecuaciones, para $L_s \gg L'$.

$$I = \frac{2E}{\sqrt{\frac{L_s}{C}}} \tag{5.7}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} \tag{5.8}$$

En el instante de la re-ignición, el voltaje del capacitor C tenía un valor de $-E$; el voltaje es ahora $+3E$ en el primer cruce de la corriente transitoria por cero.

Cuando el canal de arco se extingue, el dispositivo de conmutación interrumpe la corriente oscilatoria. El voltaje de recuperación en el entrehierro tiene ahora un valor de $+4E$ (por la contribución de la fuente de alimentación de $-E$ y el voltaje del capacitor de $+3E$). Los contactos de arqueo del interruptor continúan su desplazamiento y se han separado un poco más, pero aún puede provocarse una nueva re-ignición del canal de arco, cuyo resultado es una corriente oscilatoria con el doble de amplitud. En el momento que el interruptor interrumpe esta nueva corriente transitoria en el primer cruce por cero, el voltaje en el capacitor se incrementa a $+5E$ y el voltaje a través de las terminales, alcanza un valor de $+6E$, como se muestra en la siguiente figura 28 [27]

[4] Al rompimiento del dieléctrico en el canal de arco antes de 5 ms se denomina restablecimiento del arco. Cuando este proceso ocurre después de 5 ms se llama rencendido o re-ignición

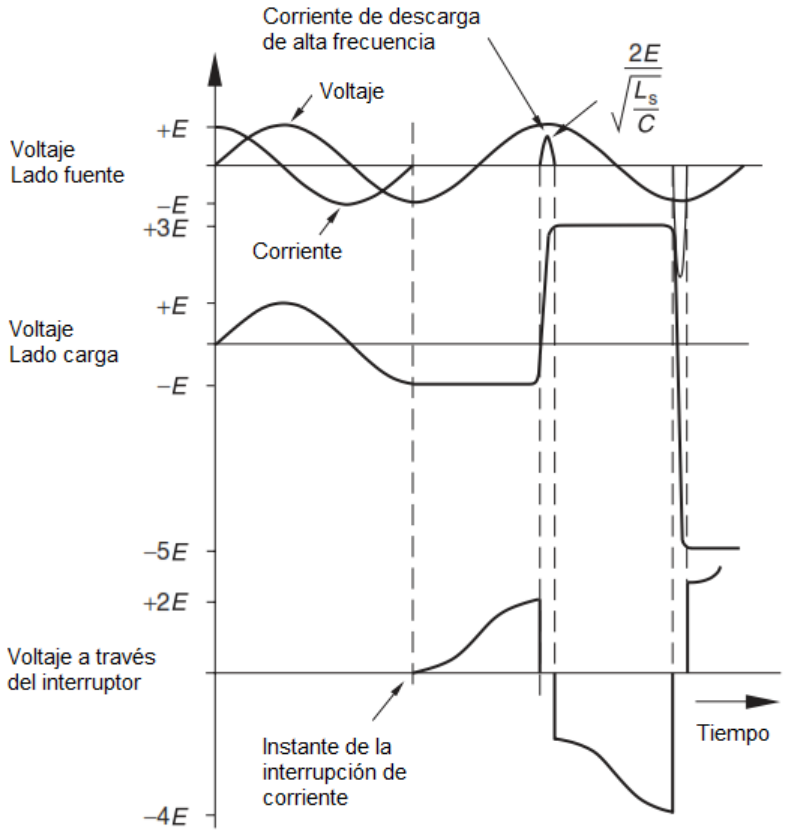


Figura 28 Reignición en el interruptor por la interrupción de corrientes capacitivas

Después de un par de re-igniciones, se presentan voltajes muy elevados en la cámara de arqueo incrementando la probabilidad de que el aislamiento externo del interruptor falle, y se presente un flashover[5].

En contraste, en los casos que los interruptores conectan cargas capacitivas, se tiene una alta probabilidad que el rompimiento del dieléctrico del medio de extinción ocurra cuando el voltaje de la fuente sea máximo, justo antes de que los contactos de arqueo se toquen y, por lo tanto, la carga capacitiva tendrá un voltaje almacenado con polaridad opuesta a la fuente de alimentación. A este rompimiento del medio de extinción se llama preencendido del arco. El plasma creado provoca una onda de choque la cual puede provocar la explosión de la cámara de arqueo del interruptor debido a las sobrepresiones que son sometidas.

[5] Se denomina flashover a la falla del aislamiento externo la cual provoca un canal de arco a través de su superficie. Esta falla es debida a voltajes elevados en las terminales del aislamiento.

V.2.3 CONMUTACIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN VACÍO

En la conexión de líneas de transmisión de alto voltaje en vacío, se presentan fenómenos similares a la conexión de bancos de capacitores, debido al efecto capacitivo de la línea. Cuando la línea de transmisión se energiza, después del cierre del primer interruptor, la onda de voltaje se refleja y provoca un aumento de voltaje en el extremo abierto de la línea.

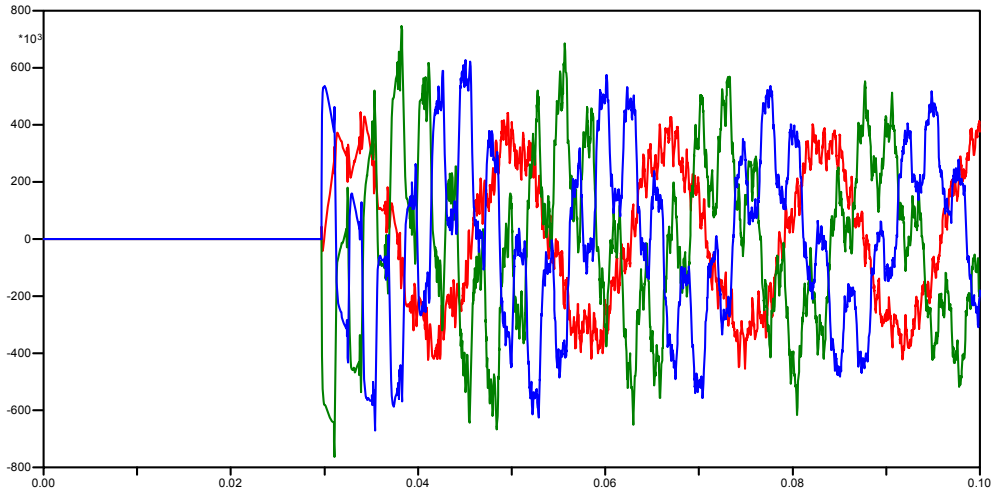


Figura 29 Voltajes en el extremo remoto de una línea de transmisión de 400 kV, 60 Hz, 200 km. [30]

Por otra parte, la desconexión de una línea sin carga es en principio, similar a la desconexión de una capacitancia y se presenta una combinación de efectos: en el lado fuente se tendrá un incremento de voltaje y una oscilación transitoria y, en el lado línea, se presentará una oscilación transitoria, además del acoplamiento capacitivo con las fases cercanas, lo que puede provocar que la tensión transitoria de restablecimiento, para la primera fase, tenga un valor de hasta 2.8 pu.

Esto hace que el dispositivo de interrupción se someta a esfuerzos eléctricos elevados por el incremento de voltaje lado fuente y por la oscilación en el lado línea, lo que puede provocar que el medio de interrupción falle y se provoque un reencendido del canal de arco.

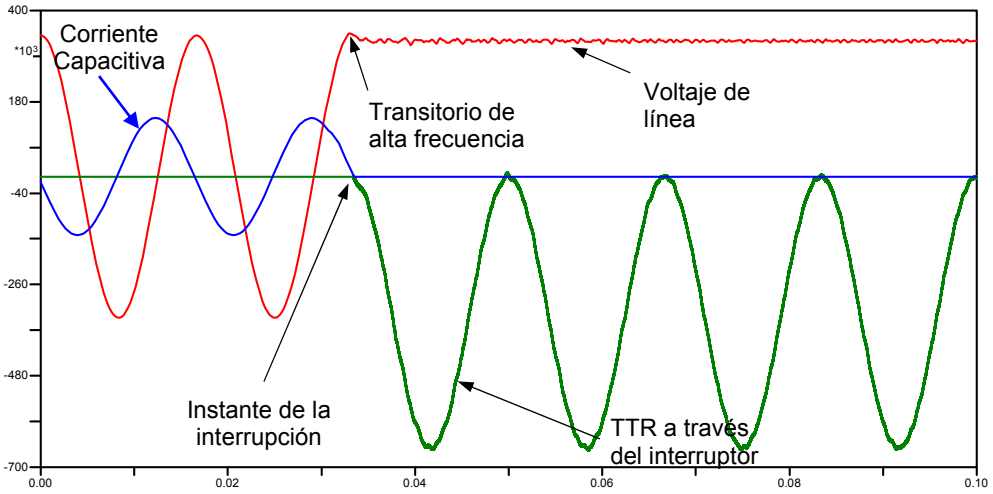


Figura 30 Curvas de corriente y voltaje por la desconexión de una línea de transmisión

V.3 TRANSITORIOS POR CONMUTACIÓN DE COMPONENTES INDUCTIVOS.

V.3.1 INTERRUPCIÓN DE PEQUEÑAS CORRIENTES INDUCTIVAS.

Este tipo de corriente es la que se presenta en la conexión de transformadores en vacío, desconexión de motores o aparatos eléctricos. La siguiente figura muestra la representación unifilar de esta condición.

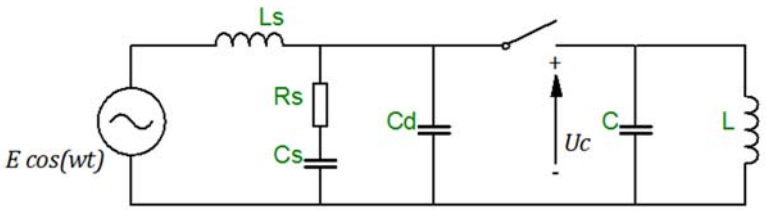


Figura 31 Diagrama unifilar de un circuito inductivo

La inductancia L es predominante, lo que hace que la corriente atrase al voltaje y la capacitancia C es usualmente muy pequeña.

Cuando se interrumpe la corriente inductiva, la capacitancia se carga a un voltaje determinado por:

$$u_c = L\frac{di}{dt} \tag{5.9}$$

El cual alcanza un valor aproximado al de la fuente debido a que $L \gg L_s$. Después de la interrupción de corriente, el capacitor se descarga a través de la inductancia, lo que implica una oscilación de corriente de frecuencia

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{5.10}$$

La frecuencia de esta oscilación puede ser muy grande y provocar rizos de voltaje en el lado carga del dispositivo de conmutación. Esto podría incrementar la TTR y llegar al punto de rompimiento del dieléctrico del medio de extinción, provocando un reencendido. Después de éste reencendido, la carga inductiva se conecta nuevamente a la fuente de alimentación y la capacitancia se carga nuevamente por una corriente de frecuencia

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_sC}} \tag{5.11}$$

Lo que hace que a través del canal de arco circule una corriente de alta frecuencia. Cuando el interruptor extingue esta corriente, la capacitancia se carga a un valor más elevado, debido a que el valor di/dt de la corriente de reencendido es considerablemente mayor que la corriente de la fuente. La capacitancia se descargará nuevamente a través de la inductancia, mientras que los contactos de arqueo se han separado aún más, y se ha incrementado la capacidad de soportar el rompimiento del dieléctrico, sin embargo, el voltaje en el lado de la carga a aumentado de tal forma que es posible un nuevo reencendido.

Por lo anterior, se establece que, sin importar su se interrumpen corrientes capacitivas o inductivas de bajo valor, el resultado es el mismo: voltajes elevados que pueden provocar un flashover de la cámara de arqueo de los interruptores. Además, independientemente del atraso o adelanto de la corriente, la principal diferencia entre los dos casos de conmutación depende de la capacitancia C en el lado de la carga, la cual en el caso de corrientes inductivas no permanece cargada, sino que se descarga a través de la inductancia de carga L.

V.3.2 CORRIENTES DE INRUSH DE TRANSFORMADORES.

Cuando se realiza la conmutación de un transformador bajo carga, ésta determina el factor de potencia y el dispositivo de conexión interrumpe la corriente de carga, la cual no representa mayores problemas para el interruptor y no se producen sobrevoltajes en el sistema. Sin embargo, cuando una parte de la red se energiza por la conexión al resto del sistema, a través del cierre de los contactos de un interruptor, el transformador puede provocar corrientes elevadas de inrush por el comportamiento no lineal del núcleo.

La corriente de inrush del transformador es por lo tanto asimétrica y contiene una componente de CD, como se muestra a continuación.

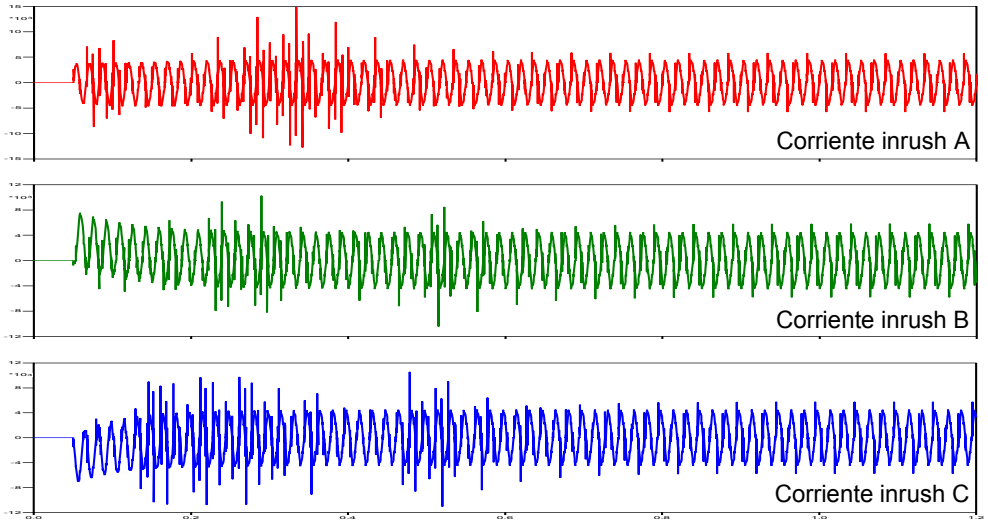


Figura 32 Corrientes de inrush de un transformador Y-Y-D, 125 MVA, 400/115/34.5 kV

La componente de CD no permanece mucho tiempo, y se elimina en aproximadamente un segundo, debido al comportamiento del circuito R-L descrito en la sección V.1.

V.4 TRANSITORIOS POR LIBERACIÓN DE CORTO CIRCUITO

Cuando ocurre un corto circuito en un sistema eléctrico, grandes cantidades de corriente fluyen desde la fuente hacia el punto de falla. La sola separación de los contactos del interruptor no interrumpe la corriente, por lo que se establece un canal de arco y la corriente continuará fluyendo. La interrupción exitosa depende del control y la extinción de dicho canal de arco.

En corriente alterna, la corriente del corto circuito cruza por cero por lo menos dos veces por ciclo, por lo que en los interruptores la extinción del arco sucede en alguno de estos instantes.

En un circuito inductivo, en el instante del cruce de la corriente por cero, el voltaje del circuito tendrá un valor máximo, pero el voltaje a través de los contactos del interruptor y por lo tanto a través de la capacitancia, será el voltaje de arco.

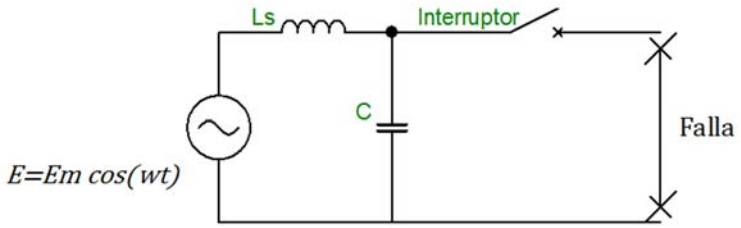


Figura 33 Circuito simplificado para estudio del transitorio de corto circuito

La ecuación que representa al circuito anterior es

$$L\frac{di}{dt} + V_C = E_m \cos \omega t \qquad (5.12)$$

Considerando la relación $i = C(dV_c/dt)$

$$\frac{d^2V_C}{dt^2} + \frac{V_C}{LC} = \frac{E_m}{LC}\cos\omega t \tag{5.13}$$

La solución de la ecuación anterior, por la transformada de Laplace es

$$V_C(s) = \omega_0^2 E_m \frac{s}{(s^2+\omega^2)(s^2+\omega_0^2)} + E_C(0)\frac{s}{s^2+\omega_0^2} + \frac{V'_C(0)}{s^2+\omega_0^2} \tag{5.14}$$

En el momento de librar la falla, el voltaje en los contactos del interruptor tendrá un valor similar al voltaje de arco. Este voltaje no puede cambiar instantáneamente debido a que el capacitor debe ser cargado. Por lo tanto, en el siguiente cruce por cero se presentará un transitorio por el cuál C será cargado desde la fuente de alimentación a través de la inductancia.

El voltaje que aparece en los contactos del interruptor, considerando que $\omega_0^2 = 1/LC$ y que el voltaje de arco es cero, después que la corriente cruza por cero está determinado por la siguiente ecuación

$$V_C(t) = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} E_m(\cos\omega t - \cos\omega_0 t) \tag{5.15}$$

En la ecuación anterior, $\omega_0 \gg \omega$, por lo tanto $\omega_0^2/\omega_0^2 - \omega^2 \approx 1$. Además, durante el tiempo en el cual persiste la oscilación de frecuencia natural, se tiene poco cambio en el término de frecuencia de la fuente, por lo que el voltaje a través de los contactos del interruptor, puede ser calculado como sigue

$$V_C(t) = E_m(1 - \cos\omega_0 t) \tag{5.16}$$

En la siguiente figura se muestra la forma de onda que toma la tensión transitoria de restablecimiento después de la extinción de la corriente de corto circuito.

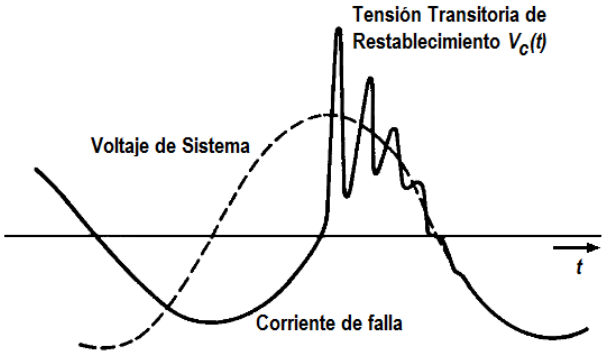


Figura 34 Tensión Transitoria de Restablecimiento a través de los contactos del interruptor, después de la extinción de la corriente de falla [29]

Cuando se considera que el voltaje de arco está presente durante la interrupción de la corriente de corto circuito, la transformada inversa de Laplace del término de voltaje de arco de la ecuación 5.13, tendrá el siguiente valor

$$\mathcal{L}^{-1}E_C(0)\frac{s}{s^2+\omega_0^2} = V_C(0)\cos\omega_0 t \tag{5.17}$$

Esto agrega un valor adicional en el voltaje de restablecimiento, el cual incrementa éste transitorio, como se muestra

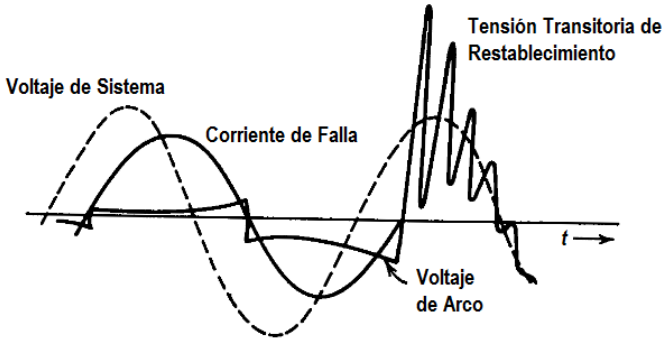


Figura 35 Efecto del voltaje de arco en la tensión transitoria de restablecimiento [29]

V.5 RELACIÓN ENTRE LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO Y LA TENSIÓN TRANSITORIA DE RESTABLECIMIENTO

El arco eléctrico que se genera en las operaciones de interrupción o cierre, es el causante del desgate de los contactos de los interruptores. Esto es debido a los fenómenos de transferencia de energía ente el cátodo y el ánodo, así como el papel que juega la elevada temperatura que se presenta en el canal del plasma.

El arco eléctrico es un fenómeno necesario para la correcta operación de las cámaras de interrupción y la extinción de la corriente eléctrica. Esto debido a que los diseños de los interruptores aprovechan la energía contenida en el arco para su propia extinción, logrando con esto que los requerimientos de los mecanismos de accionamientos sean menos exigentes disminuyendo los costos de fabricación.

En el instante de la interrupción de la corriente de arco al cruce por cero, se presenta una tensión transitoria de restablecimiento, la cual debe ser considerada en el diseño de las cámaras de interrupción, para asegurar que el medio dieléctrico, tanto exterior como interior, soporten dicha sobretensión.

Por lo anterior, el diseño de los interruptores debe tomar en cuenta la amplitud de la corriente de corto circuito y el valor de la TTR, debido a que forma un campo eléctrico de tal magnitud que puede provocar que el reencendido del arco.

V.5.1 CARACTERÍSTICAS NOMINALES DE CORRIENTE EN INTERRUPTORES

El nivel de corriente de corto circuito y las características eléctricas de la red asociada a los interruptores, definen la forma de onda y amplitud de la TTR, por esta razón, para iniciar con el estudio de ésta última, es necesario establecer ciertas características de corriente en los interruptores.

V.5.1.1 Corriente nominal y elevación de temperatura.

Corriente nominal es el valor r.m.s. de la corriente para la cual el interruptor debe ser capaz de soportar en forma continua bajo las condiciones específicas de uso y comportamiento. La elevación de temperatura, en los componentes del interruptor a una temperatura ambiente de hasta 40 °C, no debe exceder los límites establecidos en la tabla 3 de la IEC 62271-1 (Anexo A).

V.5.1.2 Corriente nominal admisible de corta duración.

Valor r.m.s. de corriente la cual el interruptor puede soportar en posición cerrado durante un tiempo específico bajo determinadas condiciones de uso y comportamiento. El valor de esta corriente es igual a la corriente nominal de interrupción de corto circuito [28].

V.5.1.3 Corriente nominal pico admisible.

Valor pico de la corriente, asociado con el primer frente de onda de la corriente nominal admisible de corta duración, que el interruptor debe soportar en posición cerrado bajo condiciones establecidas de uso. Esta corriente debe ser definida de acuerdo con la constante de tiempo de C.D. del sistema[6]. La corriente nominal pico admisible es igual a la corriente nominal de diseño de corto circuito [28].

V.5.1.4 Duración nominal de corto circuito.

Intervalo de tiempo para el cual el interruptor puede soportar, en posición cerrado, una corriente igual a la corriente nominal admisible de corta duración. Se considera como valor estándar para este tiempo 1 segundo [28].

[6] Un tiempo de 45 ms provoca una corriente nominal pico de 2.6 veces la corriente admisible de corta duración.

V.5.1.5 Corriente nominal de interrupción de corto circuito.

Es el valor máximo de la corriente de corto circuito que el interruptor debe ser capaz de interrumpir bajo condiciones de operación y uso prestablecidas.

La corriente nominal de corto circuito está conformada por lo siguiente:

a) El valor r.m.s. de la componente de C.A
b) La constante de tiempo de C.D. de la corriente nominal de corto circuito que resulta en un porcentaje de corriente directa en la separación de los contactos.

Para determinar la corriente de C.A. y la componente de C.D. en cualquier tiempo, se emplea la siguiente figura.

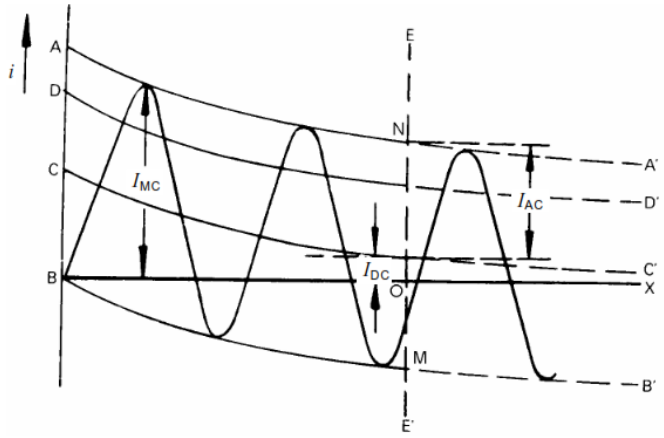


Figura 36 Determinación de la corriente de fabricación de corto circuito y el porcentaje de la componente de C.D. [28]

De acuerdo con lo establecido en la IEC 62271-100, el porcentaje del valor de la componente de C.D. es

$$\frac{I_{DC}}{I_{AC}} \times 100 = \frac{\overline{ON} - \overline{OM}}{\overline{MN}} \times 100 = \left(\frac{2 \times \overline{ON}}{\overline{MN}} - 1 \right) \times 100 \qquad (5.18)$$

Para el caso de los interruptores de 420 kV, la constante de tiempo de la componente de C.D. de la corriente de corto circuito, se toma como valor normalizado 60 ms [28]

V.5.2 CARACTERÍSTICAS DE LA TTR

La tensión transitoria de restablecimiento es la diferencia de tensión entre la respuesta del sistema de potencia en el lado fuente y el lado carga del interruptor. La naturaleza de la TTR depende del circuito que está siendo interrumpido. [31]

La TTR se presenta como una elevación transitoria de voltaje a través de los contactos del interruptor. Esta elevación de tensión puede provocar que el canal de arco se reencienda y, como los mecanismos de accionamiento están en el proceso de separación, una vez que se establece el reencendido, ya no se tiene la suficiente energía dentro de la cámara de interrupción o algún otro medio físico que logre extinguir dicho arco. El canal de arco establecido después de la separación de los contactos provoca temperaturas y presiones elevadas dentro de la cámara [32] que hacen que el interruptor pueda fallar súbitamente provocando explosión o, en el menor de los casos, daño permanente en los contactos.

Por lo anterior, una operación de interrupción exitosa se logra cuando el interruptor es capaz de soportar la TTR y la tensión de restablecimiento a frecuencia del sistema. La TTR puede tener formas de onda oscilatoria, triangular, exponencial o una combinación de estos tipos.

El comportamiento de la corriente de interrupción y la TTR, a través de los contactos del interruptor, pueden ser analizados en dos intervalos de tiempo definidos: uno en el que se tiene presente una TTR, y el segundo, durante el cual sólo existe la tensión de frecuencia de la red. En la figura 37 se muestran las diferentes respuestas de la TTR para circuitos resistivos, capacitivos o inductivos.

Los circuitos en los sistemas de potencia contienen componentes RLC, los cuales al ser desconectados provocan una TTR inicial de alta frecuencia.

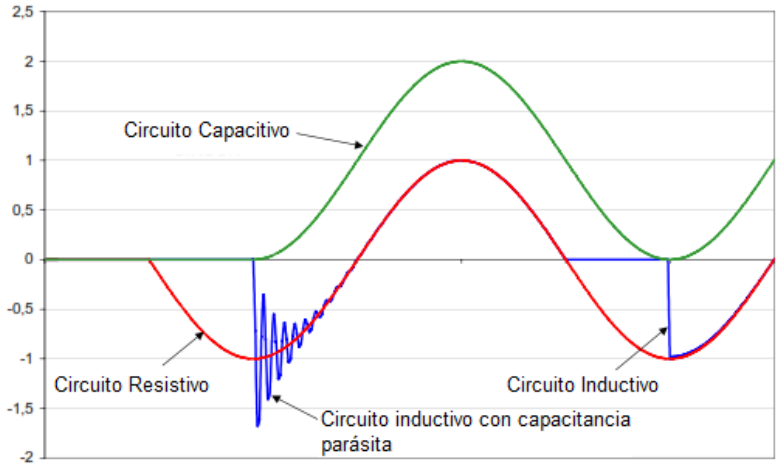


Figura 37 TTR y voltaje de recuperación en circuito RLC [33]

La TTR de forma de onda oscilatoria o exponencial más severa, se presenta a través de los contactos del primer polo abierto de un interruptor, cuando ocurre una falla trifásica simétrica en terminales, en el momento que el voltaje del sistema es máximo.

Para determinar la TTR el sistema bajo estudio debe reducirse a la mínima expresión de un circuito RLC. En el siguiente diagrama se muestran los componentes de secuencia que deberán ser reducidos

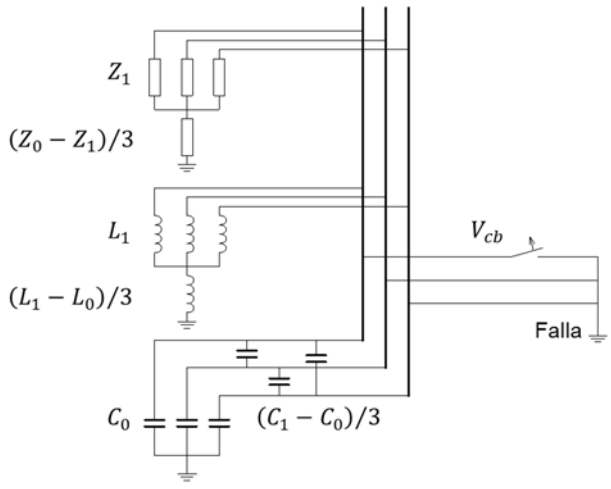


Figura 38 Representación de circuito. Interrupción de falla trifásica a tierra [31]

Tomando como base el diagrama anterior, la inductancia equivalente se calcula como sigue.

$$L_{eq} = \frac{3L_0 L_1}{L_1 + 2L_o} \tag{5.19}$$

Para sistemas trifásicos sólidamente conectados a tierra, con $L_0 = 3L_1$, la inductancia equivalente toma un valor igual a $L_{eq} = 1.3L_1$. En el caso de fallas trifásicas a tierra, en sistemas sin conexión a tierra, $L_0 = \infty$, y la inductancia equivalente es $L_{eq} = 1.5L_1$

La impedancia equivalente de la fuente es

$$Z_{eq} = \frac{3}{n} \cdot \frac{Z_0 Z_1}{Z_1 + 2Z_o} \tag{5.20}$$

Donde $Z_0 = 1.6Z_1$

La capacitancia equivalente del sistema es

$$C_{eq} = C_0 + \frac{2(C_1 - C_0)}{3} = \frac{C_0 + 2C_1}{3} \tag{5.21}$$

En el caso que $C_0 = C_1$ la capacitancia equivalente es $C_{eq} = C_0 = C_1$.

Para el caso de fallas trifásicas sin tierra, en sistemas sólidamente conectados a tierra, los valores equivalentes son:

$$\begin{aligned} L_{eq} &= 1.5L_1 \\ Z_{eq} &= \frac{1.5Z_1}{n} \\ C_{eq} &= \frac{C_1}{1.5} \end{aligned} \tag{5.22}$$

Una vez que se han realizado las reducciones necesarias, el circuito equivalente para el estudio de la TTR queda de la siguiente forma

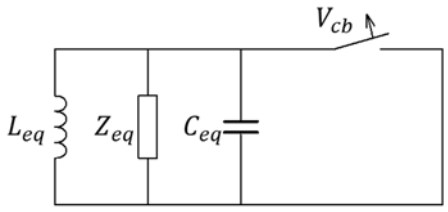


Figura 39 Circuito equivalente para determinar la TTR en una falla trifásica a tierra [31]

V.5.2.1 TTR Exponencial. (Sobre-amortiguada)

En el circuito de la figura 39 la solución para calcular el voltaje en terminales del interruptor es [31]

$$V_{cb} = E_1\left(1 - e^{-\alpha t}\left(\cosh \beta t + \frac{\alpha}{\beta}\sinh \beta t\right)\right) \tag{5.23}$$

Donde

$V_{cb} =$ voltaje a través de los contactos del interruptor

$E_1 =$ el voltaje en kV: $\sqrt{2} I \omega L_{eq}$

Los valores de α y β se calculan con las siguientes relaciones

$$\alpha = \frac{1}{2Z_{eq}C_{eq}}$$
$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{L_{eq}C_{eq}}} \tag{5.24}$$

La resistencia paralela de las líneas sobre-amortigua la TTR, eso hace que la capacitancia equivalente pueda despreciarse, por lo que el voltaje a través de los contactos del interruptor se reduce a la siguiente expresión

$$V_{cb} = E_1\left(1 - e^{-t/\tau}\right) \tag{5.25}$$

Donde el $\tau = L_{eq}/Z_{eq}$

La forma de onda de la TTR exponencial se muestra en la siguiente figura.

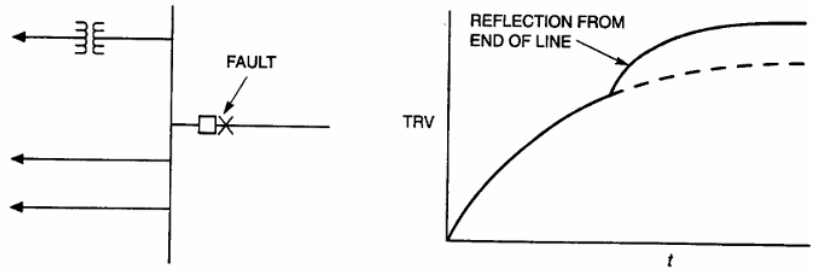


Figura 40 Característica Exponencial de la TTR [31]

Esta TTR ocurre cuando la impedancia equivalente de las "n" líneas conectadas en paralelo cumple con la siguiente relación

$$Z_{eq} = \alpha\frac{Z_1}{n} < 0.5\sqrt{\frac{L_s}{C_s}} \tag{5.26}$$

Donde α toma el valor de 1.5 para el caso de sistemas trifásicos no aterrizados y para los demás casos toma el valor de la relación Z_0/Z_1 (en sistemas sólidamente conectados a tierra el valor es 1.3); Z_1 y Z_0 son las impedancias equivalentes de secuencia de las líneas conectadas en paralelo y; L_s y C_s son la inductancia y capacitancia de la fuente.

El valor del pico inicial de la tensión de recuperación está dado por la derivada de la ecuación 5.23

$$RRRV = \frac{dV_{cb}}{dt} = \sqrt{2}I\omega Z_{eq}10^{-6} \tag{5.27}$$

El valor de la RRRV tiende a disminuir conforme la corriente de corto circuito aumenta.

V.5.2.2 TTR Oscilatoria. Sub-amortiguada

Esta forma de onda de la TTR se presenta cuando la corriente de corto circuito está limitada por una reactancia (transformador o reactor serie) y no se tiene presente ninguna línea de transmisión o impedancia de fuente para proveer amortiguamiento.

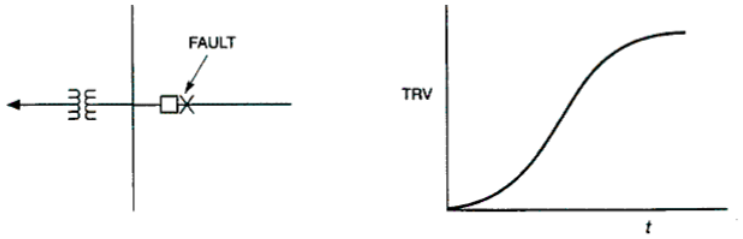


Figura 41 Característica de la TTR oscilatoria [31]

La expresión para calcular el voltaje en terminales del interruptor es

$$V_{cb} = E_1 \left[1 - \cos\left(\frac{t}{\sqrt{L_{eq} C_{eq}}} \right) \right] \tag{5.28}$$

Para que la TTR sea del tipo oscilatoria, debe cumplirse

$$Z_{eq} = \alpha \frac{Z_1}{n} = 0.5 \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} \tag{5.29}$$

V.5.2.3 TTR Triangular. Falla en líneas cortas.

Los voltajes de recuperación triangulares se asocian a la falla en líneas. El valor del primer pico de la onda de voltaje para falla en líneas incrementa conforme más cerca se

está de las terminales del interruptor. Generalmente, el voltaje de recuperación de la fuente es mucho más lento y el voltaje de recuperación triangular estará presente sólo en los primeros instantes de la TTR.

La onda inicial calculada en la ecuación 5.25 se presenta a través del polo del interruptor. Esta se presenta como ondas viajeras en cada línea de transmisión. Cuando una de estas ondas alcanza una discontinuidad (como un bus o un transformador) se producirá una onda reflejada, la cual viaja de regreso a través de la línea. El tiempo que tarda la onda en ir hacia la discontinuidad y regresar al interruptor es

$$T = 6.681\, l\sqrt{\mu k} \tag{5.30}$$

Donde l es la distancia a la primera discontinuidad en kilómetros, μ es la permeabilidad magnética y k es la constante dieléctrica.

Para líneas aéreas $\sqrt{\mu k} = 1$, es decir que la onda viaja hacia la discontinuidad y regresa al interruptor, un tiempo de 6.68 μs.

En el punto de la discontinuidad, la onda transmitida se calcula como sigue

$$e_t = e_i \frac{2Z_b}{Z_a + Z_b} \tag{5.31}$$

Y la onda reflejada

$$e_r = e_i \frac{Z_b - Z_a}{Z_a + Z_b} \tag{5.32}$$

Donde e_i es la onda incidente y, Z_a y $Z_b$son las impedancias equivalentes en ambos lados de la discontinuidad.

La onda reflejada desde el extremo abierto de una línea, contribuirá a la TTR en el lado bus en un valor expresado en la siguiente ecuación

$$E_r = E_1 \left(\frac{2Z_{eq}t}{L_{eq}} \right) e^{Z_{eq}t/L_{eq}} \tag{5.33}$$

Donde

$$Z_{eq} = Z_a = 1.44 \left(\frac{Z_1}{n} \right)$$
$$L_{eq} = \left(\frac{3L_0L_1}{L_1 + 2L_0} \right) \tag{5.34}$$

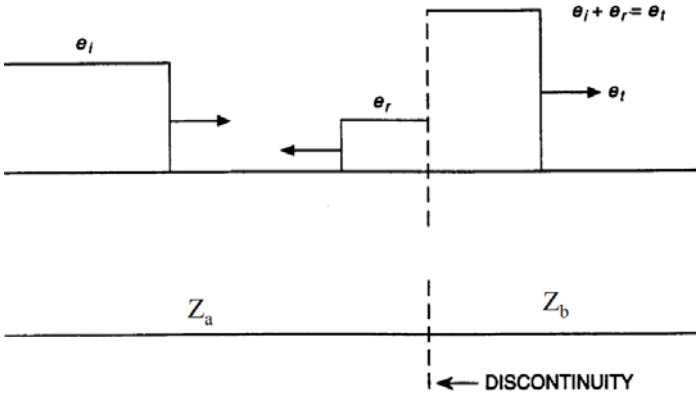


Figura 42 Ondas viajeras a través de una discontinuidad [31]

Debido a lo anterior, la TTR para falla en líneas, es la suma de múltiples ondas viajeras de voltaje provenientes de las “n” líneas de transmisión conectadas en el mismo bus. La forma de onda de una TTR triangular se muestra en la figura 43.

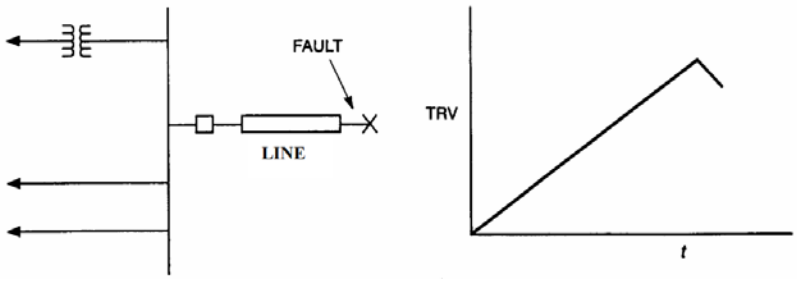


Figura 43 TTR típica para una falla en línea [31]

V.5.3 TTR RELACIONADA A LA CORRIENTE NOMINAL DE INTERRUPCIÓN DE CORTO CIRCUITO

La tensión transitoria de restablecimiento relacionada con la corriente nominal de interrupción de corto circuito, es la tensión de referencia que constituye el límite del valor posible de la TTR que el interruptor debe ser capaz de soportar bajo condiciones de falla [28].

La forma de onda de la tensión transitoria de restablecimiento varía dependiendo las condiciones eléctricas del sistema. Para evaluar la TTR se tienen los diferentes métodos.

V.5.2.1 Método de cuatro parámetros.

Se emplea en sistemas de 100 kV o mayores, donde la corriente de corto circuito es relativamente grande en relación con la máxima corriente de corto circuito en el punto bajo consideración

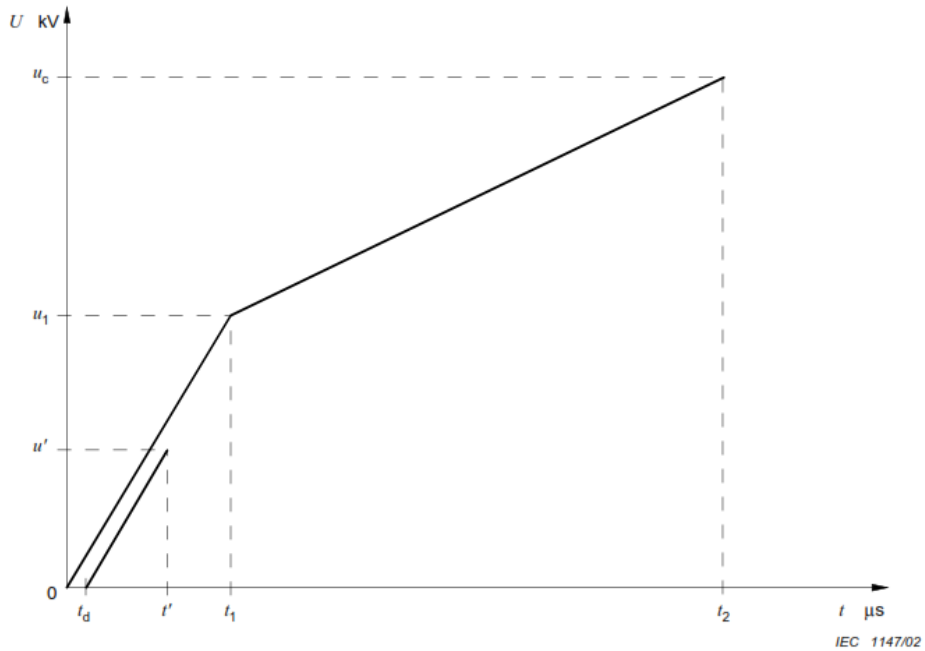


Figura 44 Representación de cuatro parámetros de la TTR de un circuito [28]

$u_1 =$ primera referencia de voltaje en kV.

$t_1 =$ tiempo en alcanzar u_1 en microsegundos.

$u_c =$ segunda referencia de voltaje (valor pico de la TTR) en kV

$t_2 =$ tiempo en alcanzar u_c en microsegundos

Los parámetros de la TTR se definen en función del voltaje nominal U_r, el valor del factor del primer polo en abrir k_{pp} y el valor del factor k_{af}

$$u_1 = 0.75 \times k_{pp} \times U_r \sqrt{\frac{2}{3}} \tag{5.35}$$

t_1 se deriva de u_1 y el valor determinado de la razón de incremento $u_1/t_1 = TTRI$

t_1 para fuera de fase $= 2 \times t_1$ para falla en terminales.

$$u_c = k_{af} \times k_{pp} \times U_r \sqrt{\frac{2}{3}} \tag{5.36}$$

Donde k_{af} es igual a 1.4 para falla en terminales y falla en línea corta y, 1.25 para fuera de fase.

$t_2 = 4t_1$ para falla en terminales y falla en línea corta

t_2 para fuera de fase = entre t_2 y $2 \times t_2$

V.5.2.2 Método de dos parámetros.

Se emplea en sistemas menores a 100 kV, o en sistemas mayores a 100 kV, donde la corriente de corto circuito es relativamente pequeña en relación con la máxima corriente de corto circuito

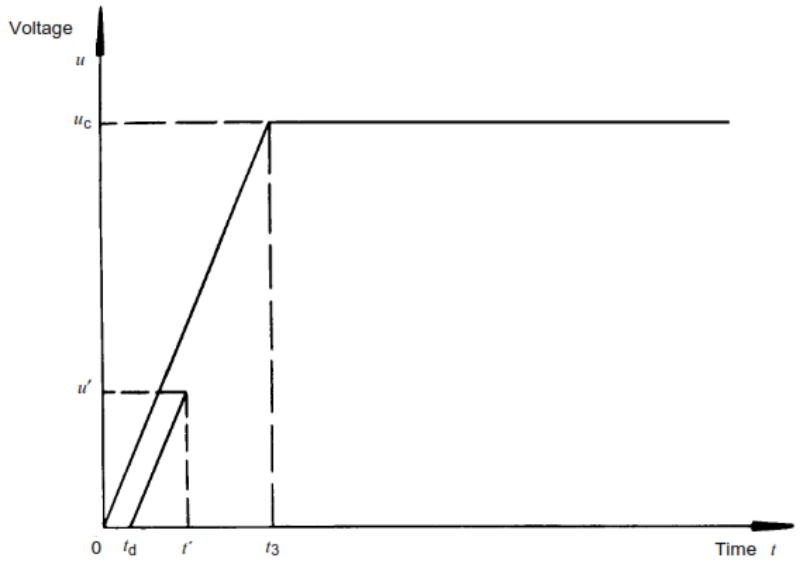


Figura 45 Representación de dos parámetros de la TTR de un circuito [28]

$u_c =$ referencia de voltaje (TTR pico) en kV

$t_3 =$ tiempo en micro segundos

$$u_c = k_{af} \times k_{pp} \times U_r \sqrt{\frac{2}{3}} \tag{5.37}$$

Donde k_{af} es 1.4 para falla en terminales en caso de cables de potencia; 1.54 para fallas en terminales o en líneas cortas y; 1.25 para fuera de fase.

t_3 para lado fuente en falla en línea corta $= t_3$ (falla en terminales)

V.5.2.3 Línea de retardo de la TTR

La línea de retardo inicia en el eje del tiempo a un determinado tiempo de retraso y corre paralela a la primera sección de la línea de referencia de la TTR, y termina en un voltaje u_c. Esta línea se observa en las figuras 44 y 45.

$t_d =$ tiempo de retraso, en microsegundos.

u' = voltaje de referencia, en kV

t' = tiempo en alcanzar u', en microsegundos

Para voltajes iguales o mayores a 100 kV se tiene lo siguiente

$t_d = 2\ \mu s$ para falla en terminales y para lado fuente de una falla en línea corta.

$t_d = 2\ \mu s$ a $0.1 \times t_1$ para fuera de fase

$u' = u_1/2;$

t' es derivada de u', u_1/t_1 (RRRV) y t_d de acuerdo con la figura 45, $t' = t_d + u'/RRRV$

V.5.2.4 Tensión Transitoria de Restablecimiento Inicial

Los efectos de las capacitancias en el lado fuente del interruptor, producen un rizo de voltaje menor durante los primeros microsegundos de la TTR, esto debe ser considerado en la evaluación de la tensión transitoria de restablecimiento, a través de la introducción de un tiempo de retraso.

Es importante notar que cada parte de la TTR tiene influencia en la capacidad interruptiva de los interruptores. La parte inicial de la TTR, denominada TTRI (o ITRV – initial transient recovery voltage) se origina por la oscilación inicial de poca amplitud debido a las reflexiones que se originan desde el punto de falla de una línea. La TTRI es un fenómeno físico el cual es muy similar al efecto de falla en línea corta.

La TTRI tiene un tiempo del primer pico de la onda de voltaje, extremadamente corto, de algunos microsegundos después del cruce por cero de la corriente

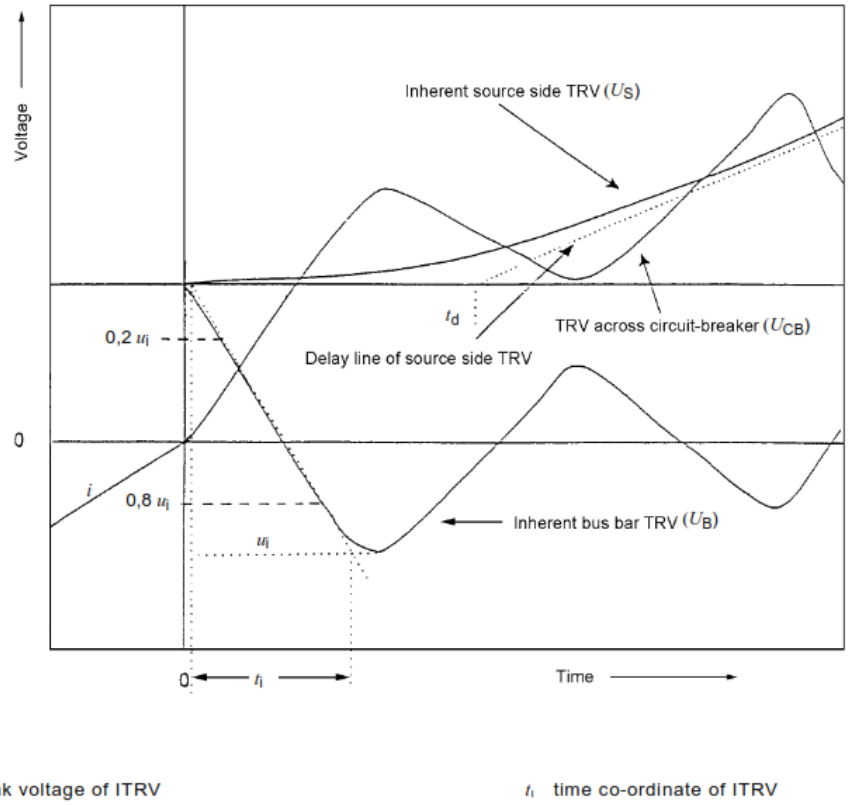


Figura 46 Relación de la TTRI y la TTR en un circuito [28]

En la figura anterior, se tiene:

u_i = voltaje de referencia (TTRI pico), en kV

t_i = tiempo en alcanzar u_i, en microsegundos

La amplitud de la TTRI depende del nivel de corriente de corto circuito que daba interrumpirse y su amplitud depende de la distancia hasta el punto de falla, tomando en cuenta desde la barra de la subestación

VI. CASO DE ESTUDIO: ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DEL INTERRUPTOR TCL A3U30

Una vez que se han establecido los parámetros de diseño más importantes para de los interruptores de potencia, se realiza el análisis del comportamiento de un interruptor de potencia, tomando el TCL A3U30[7] como caso tipo.

VI.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA SIEMENS 3AT3

VI.1.1 DATOS NOMINALES DE OPERACIÓN.

Las características nominales del interruptor TCL A3U30, son las siguientes [34]

Tabla 3 Capacidad de aislamiento del interruptor Siemens según IEC.

Marca	**Siemens**
Tipo	3AT3
Tensión nominal	550 kV
Tensión asignada a frecuencia industrial	
respecto a tierra	620 kV
A través del interruptor de potencia abierto	800 kV
Tensión nominal de choque soportable por rayos	
Respecto a tierra	1550 kV
A través del interruptor de potencia abierto	1550 kV + 315 kV
Tensión asignada al choque de maniobra	
Respecto a tierra	1175 kV
A través del interruptor de potencia abierto	900 kV + 450 kV

[7] TCL A3U30. Nomenclatura correspondiente a la línea bajo estudio asignada por el CENACE. TCL. Nomenclatura de la subestación Tecali

Tabla 1 (Continuación) Capacidad de aislamiento del interruptor Siemens según IEC.

Marca	**Siemens**
Distancia de ruptura	
Respecto a tierra	3800 mm
A través del interruptor de potencia abierto	3800 mm
Línea de fuga mínima	
Respecto a tierra	13750 mm
Línea de fuga mínima	
A través del interruptor de potencia abierto	13750 mm

Tabla 4 Datos eléctricos del interruptor Siemens

Tensión nominal	**550 kV**
Frecuencia nominal	60 Hz
Corriente nominal (de servicio)	2000 A
Corriente nominal de corte en cortocircuito	40 kA
Corriente nominal de cierre en corto circuito	104 kA
Duración nominal de corto circuito	3 s
Resistencia de cierre	400 Ω
Número de cierres sin pausa (= capacidad de absorción de energía)	
En caso de tensión de fase	4
En caso de oposición de fase (con factor 2.0)	1

Tabla 5 Tiempos de maniobra del interruptor Siemens

Duración mínima de la orden (cierre)	**40 ms**
Duración mínima de la orden (apertura)	40 ms
Tiempo de cierre	80 ms
Tiempo de operación de desconexión	17 ms
Tiempo de arco	Max. 17 ms
Tiempo de desconexión	Max 34 ms
Tiempo de conexión-desconexión	34 ms
Tiempo de pausa	280 ms
En caso de oposición de fase (con factor 2.0)	1

VI.1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL

El interruptor de potencia TCL A3U30 fue puesto en servicio en diciembre de 2003. Es de tipo tripolar, tipo tanque vivo con doble cámara de interrupción, con disposición “T”, de émbolo de barrido. Emplea gas SF6 como medio aislante y de interrupción. Cuenta con resistencias de pre-inserción en paralelo con cada uno de los contactos principales de 200 Ω y condensadores de gradiente de 1000 pF.

La presión del agente extintor necesario para la extinción del arco es generada durante el proceso de apertura por un dispositivo de émbolo de barrido situado en la unidad ruptora. En la figura 47 se muestra la estructura de un polo del interruptor y la disposición de las cámaras de interrupción.

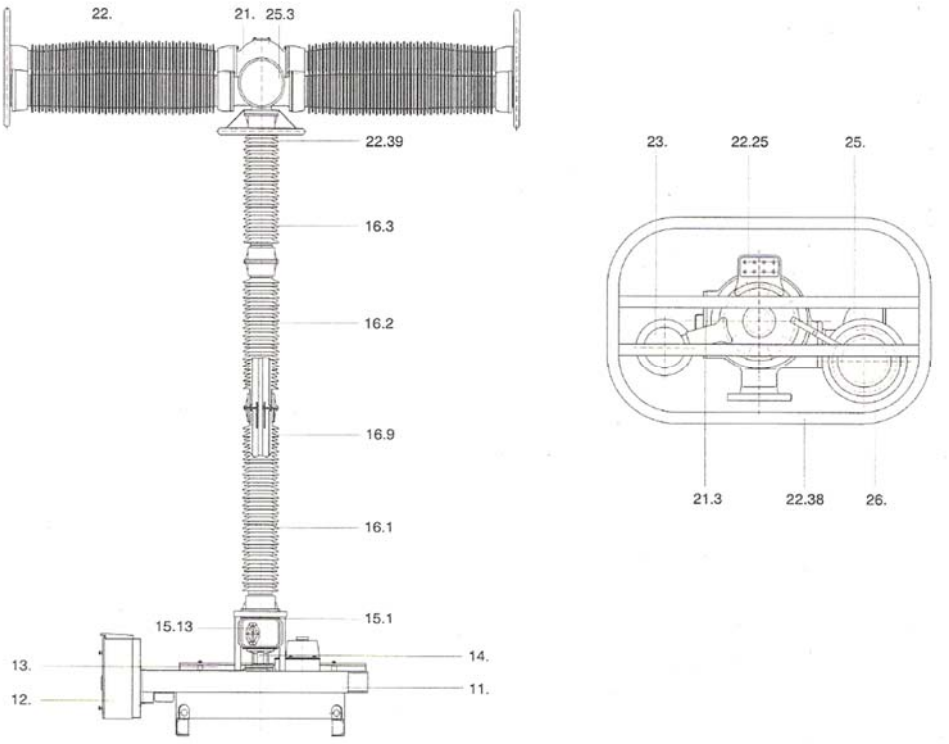


Figura 47 Estructura del polo del Interruptor Siemens 3AT3 [34]

En la figura anterior:

11. Base del interruptor
12. Unidad de mando

13. Accionamiento hidráulico
15.1 Caja del accionamiento
15.13 Caja del interruptor auxiliar con indicador Cerrado/Abierto
16.1.3 Aislador de apoyo
16.9 Barra de maniobra
21. Transmisión intermedia
21.3 Tapa
22. Unidad Ruptora
22.25 Pletina terminal
22.39 Apantallamiento
23. Condensador de gradiente de potencial
25. Transmisión
25.3 Tapa
25.38 Apantallamiento
26. Resistencia de cierre

VI.1.2.1 Extinción del arco en el interruptor TCL A3U30

Con referencia en la figura 48, en el movimiento de apertura, la guía 22.7 junto con el cilindro de barrido 22.5 se mueven en dirección a la transmisión intermedia; simultáneamente, el émbolo contrario 22.13 se desplaza en el sentido opuesto para comprimir rápidamente el gas encerrado. Después de la separación de los contactos, es decir, al quedar abierto el tramo de ruptura, el gas SF6 comprimido fluye por las toberas de extinción 22.9.1 y 22.11.1 apagando el arco. [34]

Los componentes mencionados en la figura 48 son los siguientes:

22.11.1 Tobera de extinción
22.13 Émbolo contrario
22.4 Rejilla de soplado
22.5 Cilindro de soplado
22.7 Guía
22.9.1 Tobera de extinción
A Arco

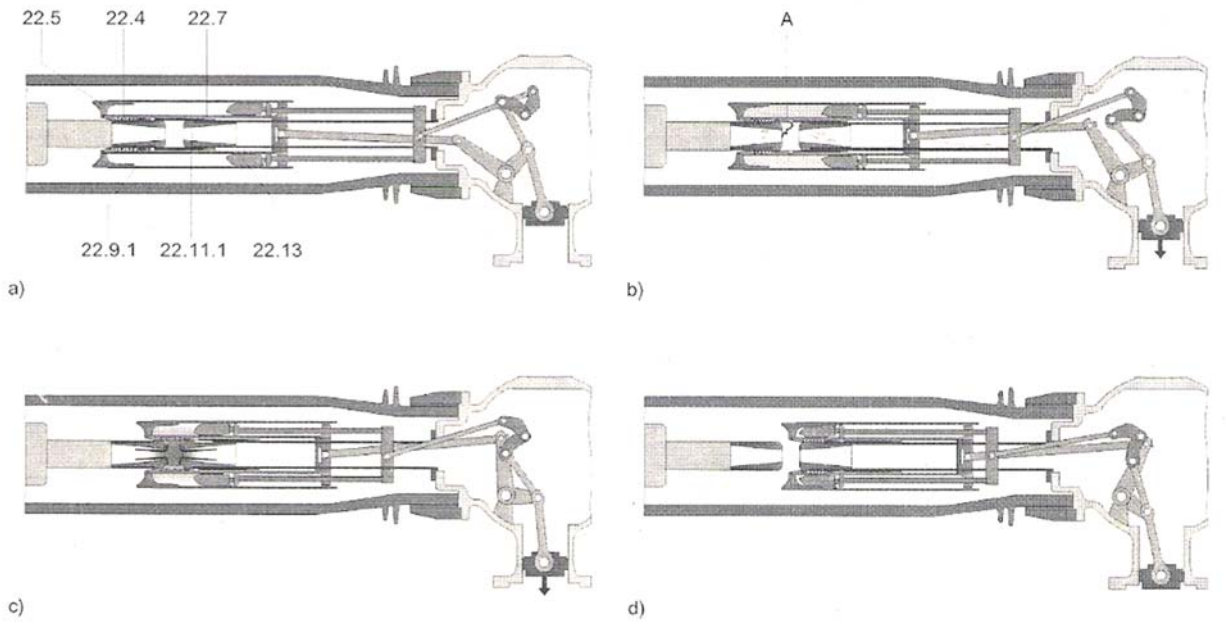


Figura 48 Esquema de operación de apertura. a) Posición cerrado; b) Apertura: pre-compresión; c) Apertura: extinción; d) Posición Abierto

VI.1.2.2 Ciclos de inspección y mantenimiento

Las medidas de mantenimiento se clasifican según la tabla siguiente y se debe distinguir entre desgaste mecánico o por fricción y, desgaste resultado de las maniobras de corrientes de servicio y de corto circuito.

Tabla 6 Servicios de inspección y mantenimiento [34]

Servicio de inspección y mantenimiento	**A realizar cada tiempo o según desgaste**
Control	Cada 12 años o después de 3000 operaciones mecánicas de maniobra con $I \leq I_r$ [8]
Mantenimiento	Cada 25 años o después de 6000 operaciones mecánicas de maniobra con $I \leq I_r$
Control del Sistema de Contactos	Número permitido de conexiones de potencia alcanzado

[8] I_r = corriente nominal (de servicio)

En el anexo B se muestra la cédula de mantenimiento de este tipo de interruptores

VI.1.2.3 Número máximo permisible de operaciones de interrupción

El interruptor Siemens 3AT3 bajo estudio, tiene la siguiente curva que refiere el número máximo de operaciones con respecto de la corriente de corto circuito.

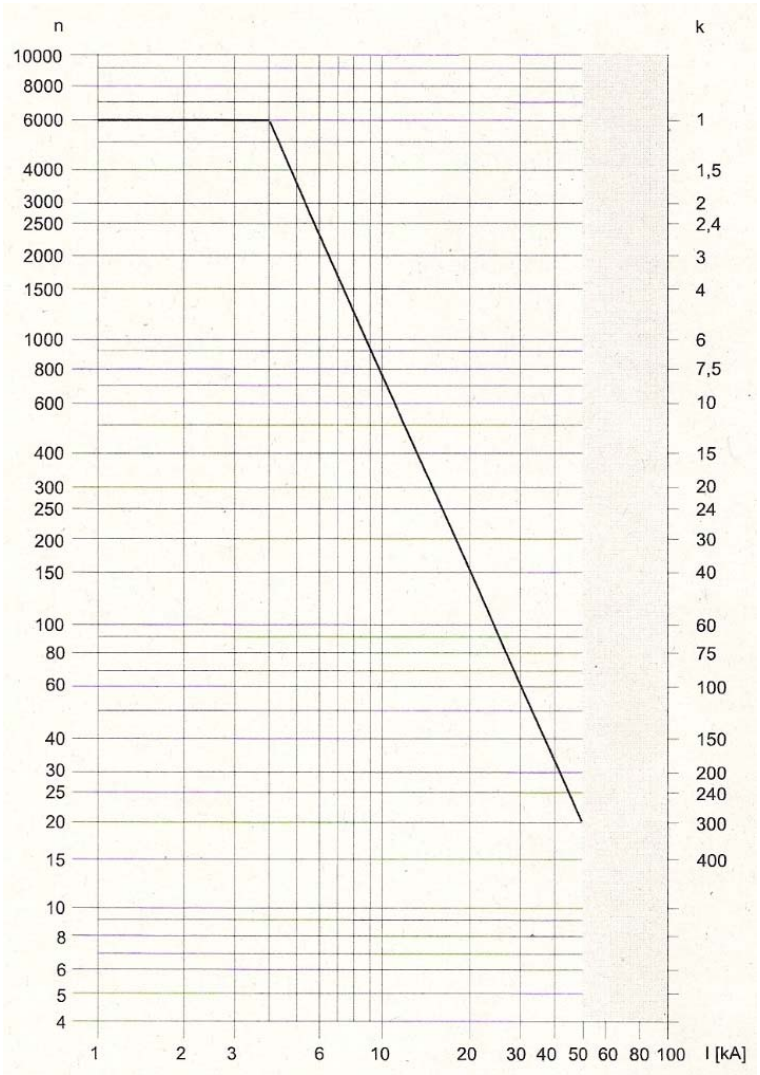


Figura 49 Número admisible de desconexiones en dependencia de la corriente de ruptura

Para el control del sistema de contactos, se establece una relación entre la corriente de interrupción y la cantidad permisible de desconexiones para dicha corriente. Esta relación se presenta en la siguiente ecuación

$$n_x = \frac{6000 - \sum(n_i \cdot k_i)}{k_x} \tag{6.1}$$

Donde

$k_i =$ Factor de ponderación para la corriente de apertura I

$k_x =$ Factor de valoración para la corriente de apertura I_x

$n_i =$ Número de maniobras de apertura ya efectuadas con la corriente de apertura I

$n_x =$ Número de maniobras de apertura aún admisibles para una corriente I_x

VI.2 DATOS DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CERRO DE ORO TECALI

El interruptor de potencia bajo estudio, conecta a una línea de transmisión que enlaza a la SE. Cerro de Oro con la SE. Tecali. La longitud de la línea es de 193 km y se tiene en la SE. Tecali un Banco de Capacitores Serie de 149.1 MVAr, para su compensación.

La línea seleccionada es de dos conductores por fase, con cable tipo ACSR calibre 1113 kCM, tipo de conductor Blue Jay, dos conductores por fase y está instalada en una estructura de doble circuito en posición vertical tipo EA4B22MB (Anexo C). Esta estructura es de tipo suspensión y se toma como base para el análisis en ATP por ser la más representativa. Para asegurar libramientos del conductor inferior al nivel de tierra de por lo menos 15 metros, se emplean aumentos de +0 a +15. La línea de transmisión está formada por 400 estructuras.

En la subestación Tecali se tiene un Banco de Capacitores Serie de 149.1 MVAr, para la compensación de cada una de las líneas de transmisión. Los bancos de capacitores tienen una reactancia de 23 Ω por fase.

En la figura 50 se muestra la red eléctrica asociada a la SE. Tecali, la cual se empleó para realizar los estudios de corto circuito en estado estable y determinar las características eléctricas de los componentes conectados a los nodos EDO[9] y TCL. Estos resultados se emplearon en la simulación en ATP. (Anexo C y D).

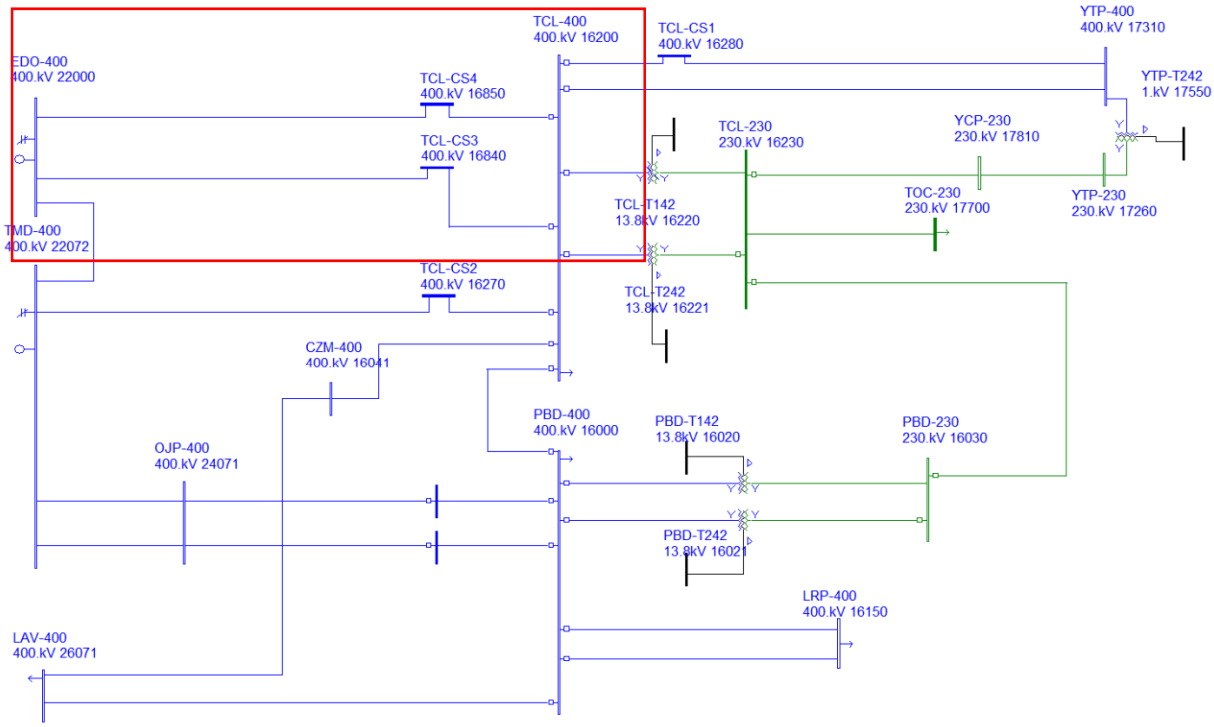


Figura 50 Diagrama unifilar de la red para estudio. Base de Datos Red Troncal de 400 kV. CFE Aspen, 2016

[9] EDO. Nomenclatura de la subestación Cerro de Oro

VI.3 ESTADÍSTICA DE EVENTOS EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN BAJO ESTUDIO

El análisis del comportamiento del interruptor debe considerar datos históricos, de esta forma podrá evaluarse el comportamiento desde su puesta en servicio y comparar estos datos con los resultados de las pruebas de Resistencia de Contactos y Tiempos de Operación.

En el anexo F se presenta la estadística de fallas de las líneas de transmisión EDO-TCL. Cabe hacer mención que los datos obtenidos son del año 2010 a octubre de 2016 y, aun cuando no se cuenta con la estadística de fallas desde la puesta en servicio, la muestra obtenida se considera como válida, ya que abarca el 50 por ciento del tiempo que han estado en servicio. La siguiente tabla relaciona los eventos de las líneas Cerro de Oro – Tecali. En estas tablas se observa que el evento representativo es el de falla monofásica a tierra. Prácticamente todos los eventos han sido de esta naturaleza.

Tabla 7 Resumen de estadística de fallas de LT. EDO – TCL

Línea	Año	Tipo de Evento[10]				Distancia[11]	Corriente Falla[12]	Total Eventos
		1F-G	2F-G	3F-G	3F			
EDO A3U20 TCL	2016	C	----	----	----	30.76	6,493	5
		C	----	----	----	30.82	6,670	
		C	----	----	----	31.99	6,655	
		B	----	----	----	162.13	1,871	
		B	----	----	----	156.27	2,254	
	2015	C	----	----	----	203.00	2,639	1
	2013	A	----	----	----	154.70	1,748	1
	2010	A	----	----	----	153.25	2,298	1

[10] F-G. Falla de fase a tierra
[11] Distancia medida por los relevadores de protecciones de la SE. Tecali
[12] Corriente de falla en estado estable. Medida por los relevadores de protecciones.

Tabla 8 (Continuación) Resumen de estadística de fallas de LT. EDO – TCL

Línea	Año	Tipo de Evento				Distancia	Corriente Falla	Total Eventos
		1F-G	2F-G	3F-G	3F			
EDO A3U30 TCL	2016	B	----	----	----	153.10	2,319	1
	2015	B	----	----	----	103.80	2,785	4
		B	----	----	----	194.43	1,436	
		C	----	----	----	208.00 [13]	1,684	
		C	----	----	----	109.34	2,639	
	2014	B	----	----	----	46.70	4,195	2
		B	----	----	----	43.92	4,974	
	2013	A	----	----	----	156.4	1,820	1
	2012	A	----	----	----	175.42	1,702	1
	2011	C	----	----	----	51.96	5,016	2
		A	----	----	----	107.13	2,652	
	2010	A	----	----	----	146.57	2,468	1

Del análisis de los eventos ocurridos en la línea de transmisión EDO A3U30 TCL, se establecen tres regiones de alta incidencia de falla. La primera región se localiza entre los 40 y 60 km de distancia (medidos desde el nodo TCL) con una corriente de corto circuito promedio de 4700 A; la segunda región se establece entre el kilómetro 100 a 110, con una corriente promedio de corto circuito de 2700 A y, por último, la tercera región se establece por la corriente de corto circuito que oscila alrededor de los 2000 A. Esta última región es la que presenta el mayor número de incidencias y ocurre entre los 140 km hacia el extremo final de la línea en el nodo EDO.

En la siguiente gráfica se muestra la variación de la corriente de falla respecto de la longitud de la línea. Puede establecerse por la curva, que la falla en terminales oscila entre los 13 a 14 mil A-rms hasta un nivel de corto circuito promedio de 2,000 A-rms, equivalente a la corriente nominal del interruptor de potencia

[13] La distancia registrada por los esquemas de protección se vio afectada por el algoritmo de localización. Para este evento se tuvo la operación de la función de aceleración de zona, para librar la falla en un tiempo de 4.5 ciclos

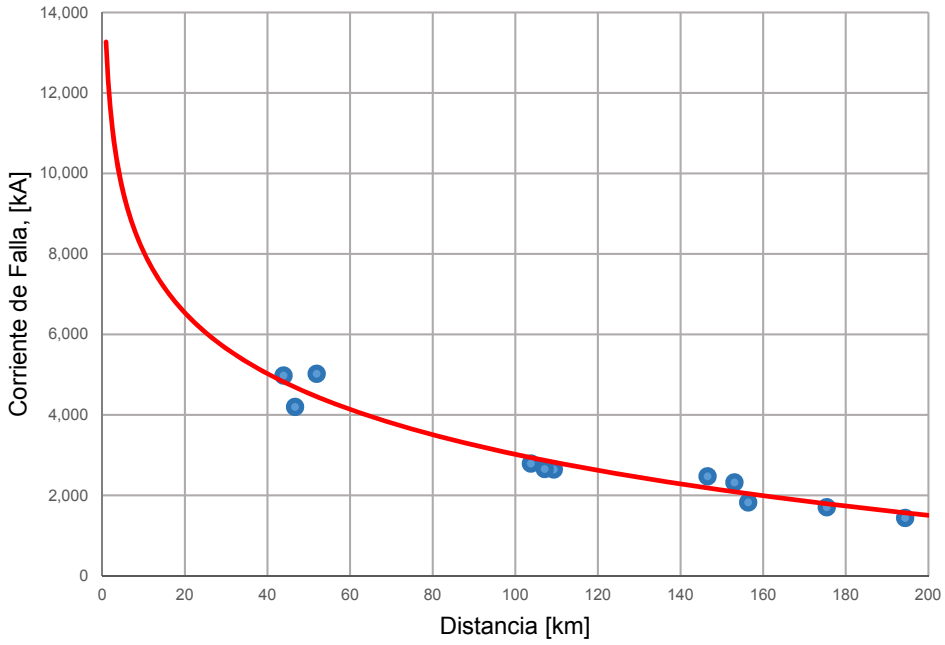


Figura 51 Variación de la Corriente de Falla vs Distancia. LT TCL A3U30 EDO

Además de las operaciones bajo falla, se debe tomar en cuenta que los interruptores realizan un promedio de 5 a 10 operaciones anuales bajo condiciones de carga normal. Estas operaciones también deben ser tomadas en cuenta, ya que también se realiza interrupción de corriente de arco.

VI.4 SIMULACIÓN DE EVENTOS POR FALLA Y APERTURA DE CARGA NORMAL

La simulación en ATP es la herramienta que se emplea para analizar el comportamiento de los interruptores de potencia, ya que permite analizar los sistemas eléctricos en estado transitorio, el cual es el periodo de tiempo donde ocurren fenómenos eléctricos de alta energía e intensidad que pueden provocar que los componentes fallen. Con esta herramienta se obtendrán los datos necesarios para analizar el comportamiento del interruptor de potencia bajo estudio. En la simulación, deben considerarse las condiciones eléctricas de la red donde están instalados los interruptores, así como los parámetros eléctricos de las líneas de transmisión.

La simulaciones que se emplearon para analizar el comportamiento operativo de los interruptores del caso de estudio, se realizaron considerando fallas de fase a tierra a diferentes distancias respecto del nodo TCL.

El circuito empleado para la simulación en ATP se muestra en la figura 52. Se tienen representados los nodos TCL y EDO con su respectiva impedancia de secuencia cero y positiva. Se realizó modelado de la línea de transmisión de acuerdo a los datos del perfil de la estructura tipo mostrada en el anexo C. El modelado de la línea está seccionado en cuatro segmentos correspondientes a los porcentajes relacionado en la tabla. Se emplearon interruptores con modelo de arco de Mayr [23] desarrollados por [35] en ambos extremos de la línea en la fase A, e interruptores controlados por tiempo en las fases restantes. Con esto se puede analizar en forma precisa el comportamiento del arco eléctrico, durante el estado transitorio, a través de los contactos del interruptor. Se realizó el modelado de las resistencias de preinserción las cuales abren 10 milisegundos antes que el contacto principal. En el modelo se considera que la línea de transmisión EDO A3U20 TCL está en servicio.

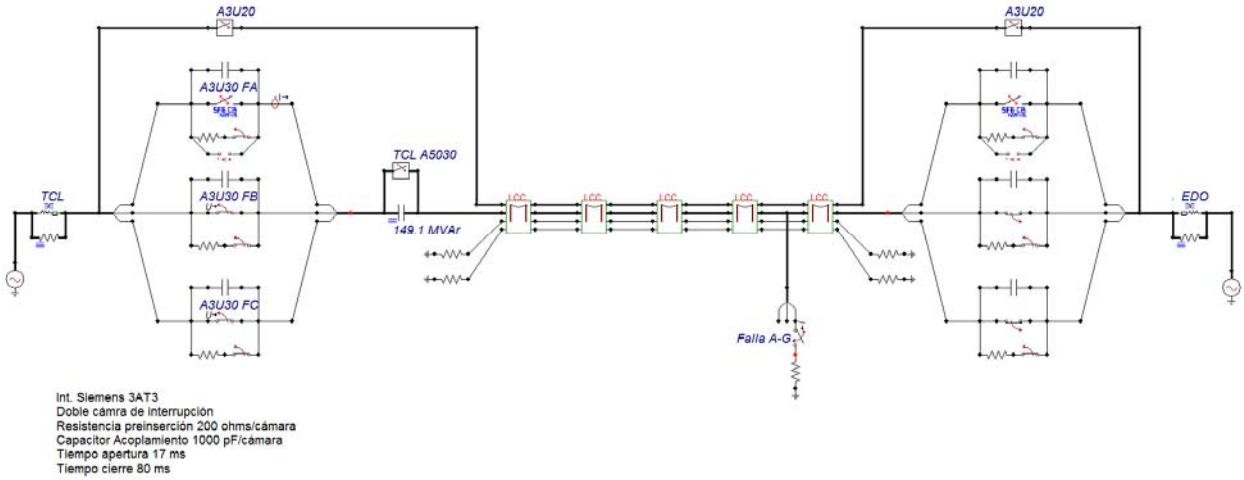


Figura 52 Circuito de prueba en ATP

Para verificar la validez del circuito empleado en ATP, se realizó la simulación de una falla a 45 km (23.31 % de la línea bajo estudio) y se comparó el resultado con la estadística mostrada en la tabla 5. La corriente de falla se muestra en la figura 53.

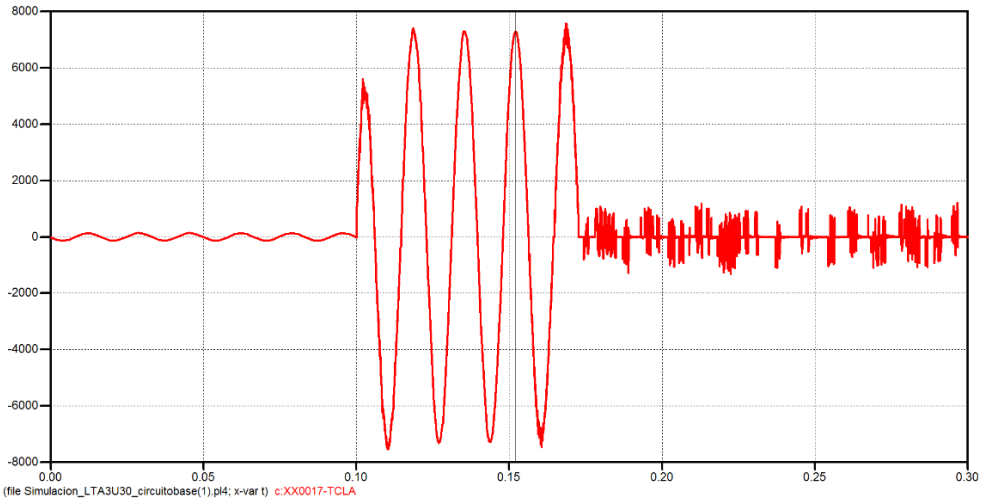


Figura 53 Corriente de falla de la LT TCL A3U30 EDO a 45 km del nodo TCL

La corriente pico obtenida en el modelo es de 7,277.3 A (5,145.8 A-rms). Este valor es cercano al obtenido en la estadística de falla y se determina que el modelo empleado en ATP es válido.

En este punto, es importante establecer que la diferencia de los resultados obtenidos en el modelo de ATP y los datos de corriente de falla registrados en la estadística, se debe a que los últimos son valores extraídos de los esquemas de protección y, éstos equipos, emplean algoritmos de filtrado de señales para realizar su procesamiento y posterior medición con parámetros prestablecidos. Estos algoritmos aseguran la estabilidad de los esquemas de protección para evitar operaciones incorrectas, y con los resultados de dichos procesamientos se establecen los registros de variables.

En la simulación de ATP, en interruptor de falla cierra en $t_0 = 0.100$ segundos. Posteriormente, en el tiempo $t_1 = 0.150$ segundos, abren los interruptores en ambos lados de la línea, el cual es el tiempo promedio de operación de los esquemas de protecciones, auxiliares de disparo y mecánica del interruptor de potencia. En $t_3 = 0.167$ segundos, se libera la falla en forma exitosa. Este tiempo de liberación de falla se basa en la suposición que el interruptor obedece a los tiempos nominales de operación.

Los tiempos anteriores también tienen fundamento es la estadística de fallas y operaciones de los interruptores bajo estudio, ya que, desde la fecha puesta en servicio hasta el tiempo de elaboración de esta tesis, no se tiene registro de operaciones no exitosas.

Las siguientes figuras muestran los resultados de las diferentes simulaciones que se realizaron para estudiar el comportamiento de la tensión y corriente de arco.

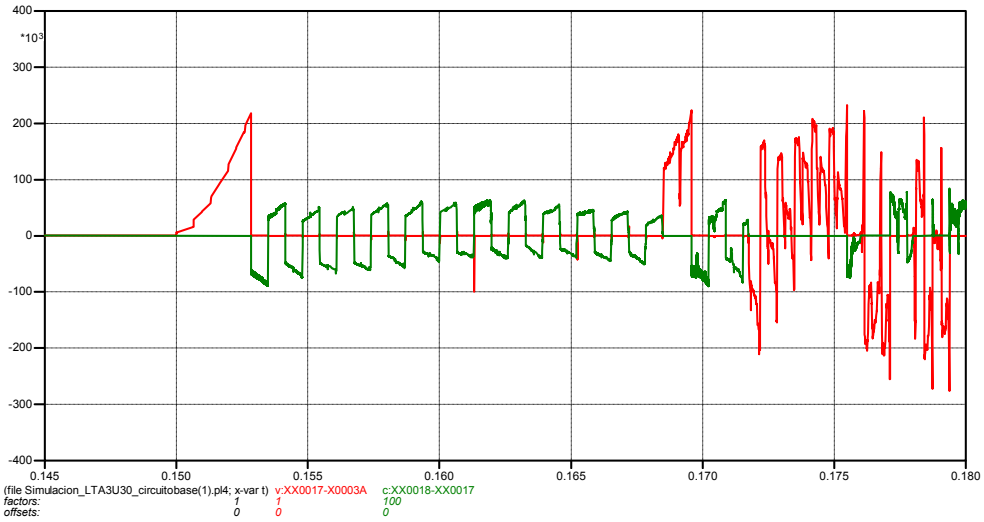


Figura 54 Voltaje y Corriente de arco para una apertura de línea con carga

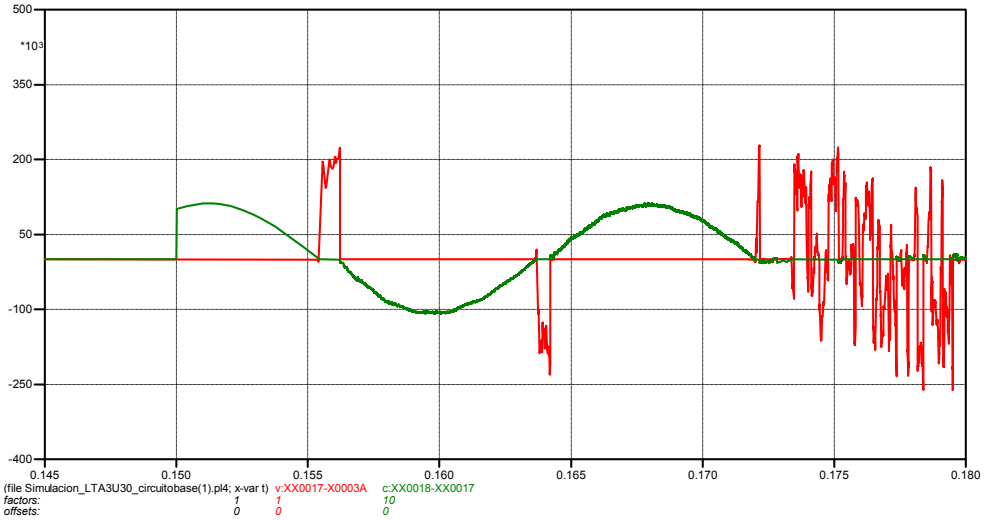


Figura 55 Corriente y voltaje de arco para una falla a 19.3 km (10%)

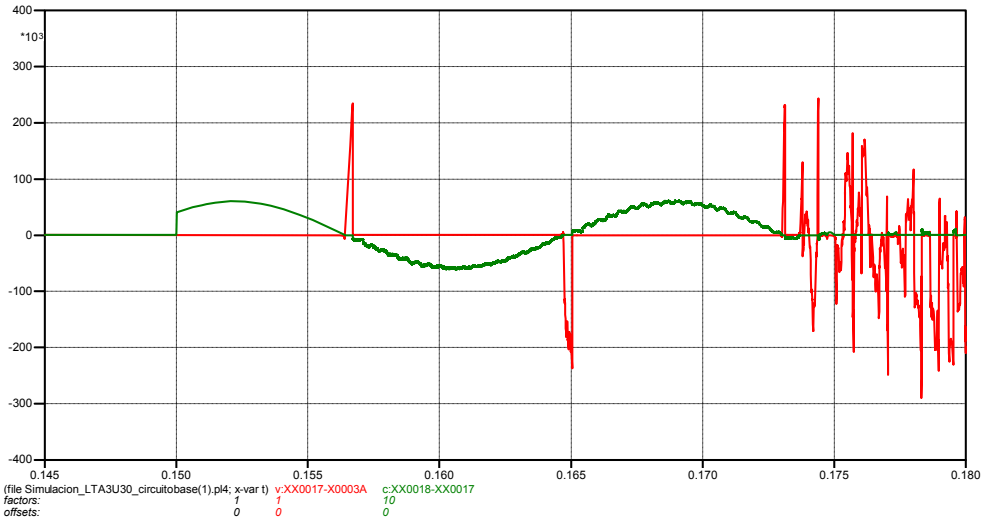


Figura 56 Corriente y voltaje de arco para una falla a 57.9 km (30%)

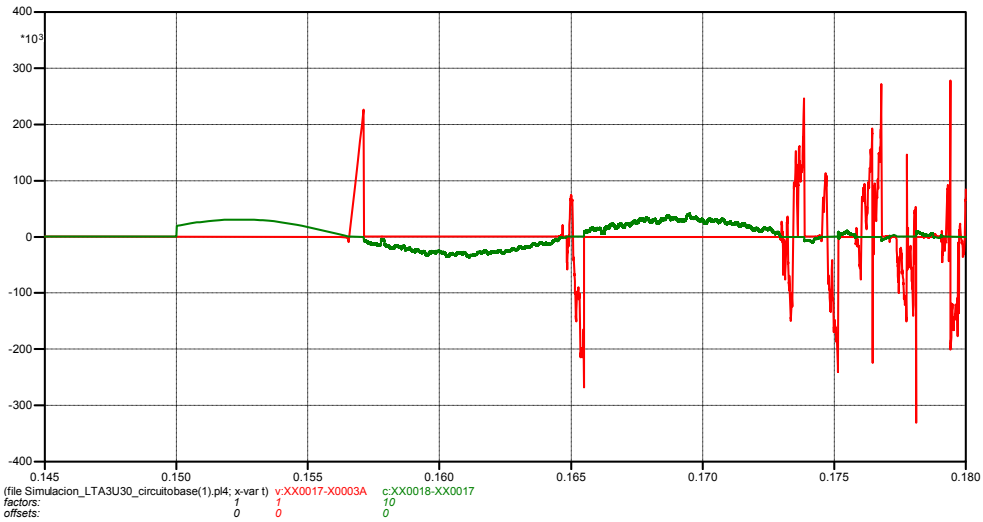


Figura 57 Corriente y voltaje de arco para una falla a 96.5 km (50%)

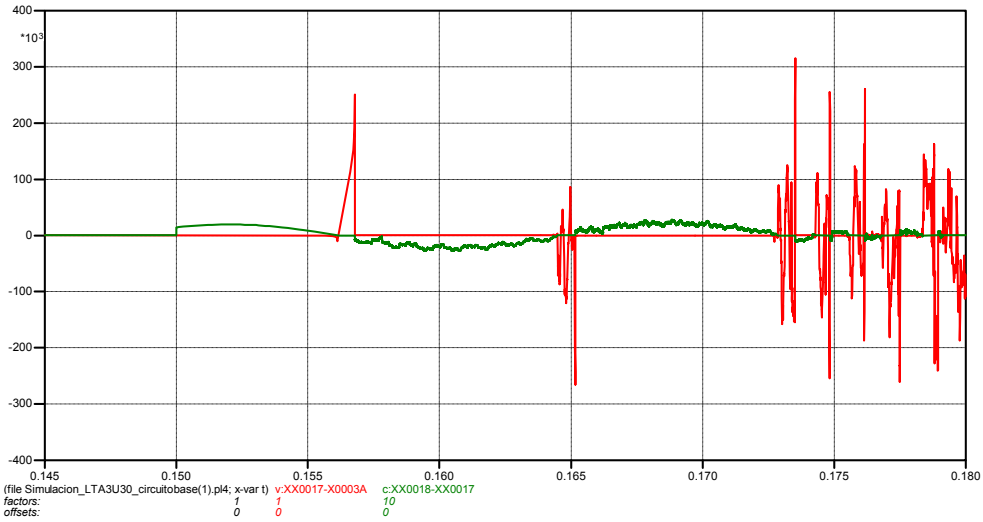


Figura 58 Corriente y voltaje de arco para una falla a 154.4 km (80%)

El resumen de las mediciones realizadas para las diferentes simulaciones se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 9 Características de arco debido a diferentes fallas en la línea

No	Tipo apertura	U arco, V	I arco, A	Z arco, Ω	t arco, s
0	**Falla F-G term**	12.04	15627.00	0.7706	0.0195
10	**Falla F-G 10 % (19.3 km)**	17.85	11342.00	1.5735	0.0190
30	**Falla F-G 30 % (57.9 km)**	31.81	6008.70	5.2936	0.0205
60	**Falla F-G 60 % (115.8 km)**	56.87	3659.10	15.5425	0.0190
80	**Falla F-G 80 % (154.4 km)**	83.59	2621.70	31.8855	0.0195
100	**Carga lado TCL**	243.14	901.18	269.8032	0.0200

Los valores registrados en la tabla anterior son por contacto de polo de interruptor. El tiempo de operación registrado es desde el inicio de la separación de los contactos hasta el tiempo de la extinción de la corriente de arco.

VI.5 ANÁLISIS DE LA ENERGÍA DEL ARCO

Tomando como base los resultados obtenidos en la simulación de los diferentes tipos de eventos se realiza el análisis de la energía del arco eléctrico en la cámara del interruptor y se establecen las tasas de erosión de contactos. Estos análisis se realizan con las relaciones desarrolladas en [1] y [19].

Para fines prácticos, la caída de tensión en el ánodo y la caída de tensión en el cátodo se relacionan con el voltaje de arco medido en la simulación de ATP. De esta forma se emplea la tensión de arco para realizar los cálculos.

$$E_c + E_a \approx U_{arco} \tag{6.2}$$

Además, se establece que el material del contacto de arqueo, donde se presenta el plasma de arco es una aleación de Cobre-Tungsteno, materiales comúnmente empleados para este fin, por sus características físicas de soportar la erosión del arco y porque sus componentes no reaccionan con los compuestos del medio de interrupción durante los procesos de vaporización y fundición.

Por otra parte, se presupone también que el desgaste de los contactos se realiza sólo en la porción del contacto que tiene esta aleación, porque el diseño de la cámara de interrupción y las toberas fuerzan a la columna de arco a fluir por una trayectoria determinada (véase figuras 15 y 16 del Capítulo IV)

Tabla 10 Cálculos de energía y erosión de contactos

No	Tipo apertura	Energía $W = (E_c + E_a)IT$	Volumen de metal vaporizado $V = W/\rho JH$	Tasa de erosión $R = 1000\,V/IT$	Carga Eléctrica $Q = \int_{t_{arc}} \lvert i(t)\rvert dt \approx I_{RMS} \cdot t_{arc}$	Erosión específica $\frac{m}{Q} = \frac{\Delta U_{eff}}{h_{Vap}} - \frac{2C}{h_{Vap}} \cdot \frac{\alpha \cdot I_{RMS}^{\beta} \cdot \sqrt{t_{arc}}}{Q}$
1	Falla F-G term	3667.86314	0.0419847	0.1378488	304.5702	0.00000164
2	Falla F-G 10 % (19.3 km)	3843.80706	0.0439986	0.2042793	215.3846	0.00000286
3	Falla F-G 30 % (57.9 km)	3914.20370	0.0448044	0.3640914	123.0582	0.00000586
4	Falla F-G 60 % (115.8 km)	3949.72121	0.0452110	0.6509886	69.4497	0.00001122
5	Falla F-G 80 % (154.4 km)	4269.21395	0.0488681	0.9568710	51.0707	0.00001700
6	Carga lado TCL	4382.28063	0.0501623	2.7831466	18.0236	0.00005157

De los resultados anteriores, se observa que aun cuando la corriente de arco es más elevada para una falla en terminales, la tasa de erosión, es menor que la presentada para operaciones de apertura con corriente de carga.

Esta relación se no debe ser interpretada en la forma estricta que operaciones normales del interruptor, provocan mayor erosión de los contactos. Debe establecerse la relación directa que la tasa de erosión depende de la energía del arco y, ésta a su vez depende de la relación entre la tensión de arco, la corriente de arco y el tiempo de extinción, por lo tanto, la erosión de los contactos, para corrientes bajas, es similar a la erosión presentada a corrientes altas, es decir, ante un mismo número de operaciones de interrupción de corriente de diferente nivel, la erosión de los contactos deberá ser similar.

Esta condición se muestra en la siguiente gráfica elaborada con las relaciones desarrolladas en [1]. Como se muestra, la energía del arco permanece prácticamente constante para los eventos simulados a diferentes longitudes de línea. Por lo tanto, la cantidad de volumen de metal vaporizado de los contactos, es prácticamente igual.

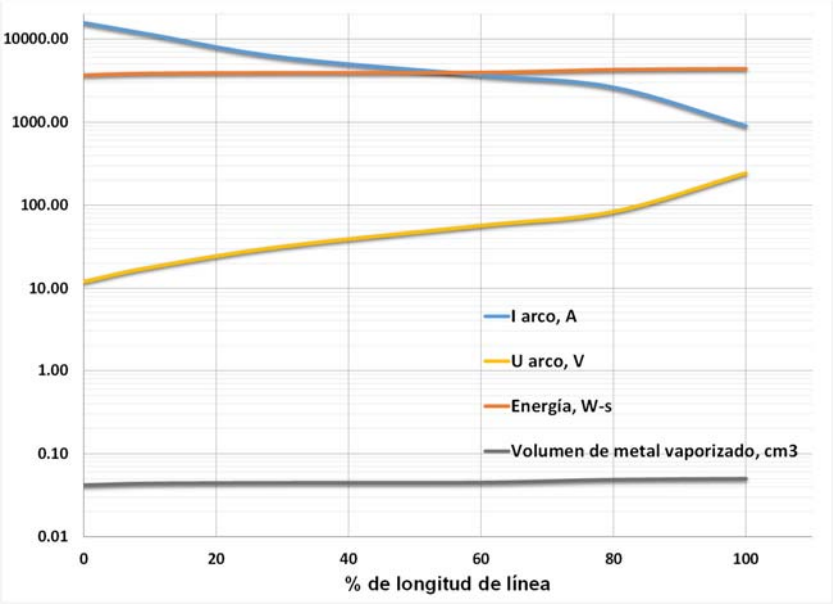


Figura 59 Comportamiento de la Energía del Arco eléctrico para diferentes distancias de línea

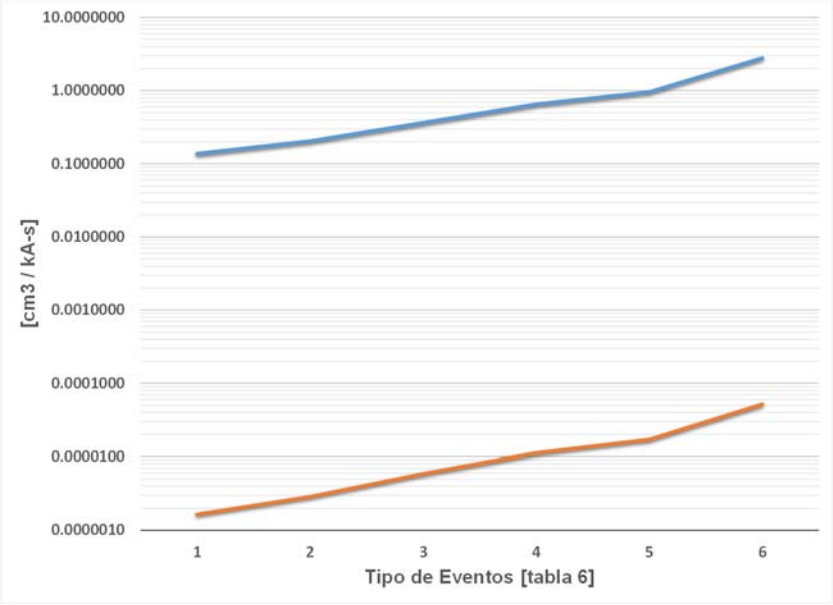


Figura 60 Comparación de las tasas de erosión. En azul tasa de erosión obtenida por [1]; el rojo razón de erosión específica obtenida por [19]

Por otra parte, comparando la relación entre las tasas de erosión, se observa que tienen un comportamiento similar. Esto refuerza la idea que la erosión de los contactos depende directamente de la energía del arco eléctrico.

De acuerdo con [19], utilizando la siguiente relación, se compara el incremento de la tasa de erosión específica respecto de la carga eléctrica transportada en arco, para las diferentes simulaciones de falla.

$$\frac{m}{Q} = \frac{\Delta U_{eff}}{h_{vap}} - \frac{2 \cdot C}{h_{vap}} \cdot \chi^{-1} \tag{6.3}$$

Donde

$$\chi = \frac{Q}{A_{contact} \cdot \sqrt{t_{arc}}} \tag{6.3}$$

El valor de χ se emplea como abscisa.

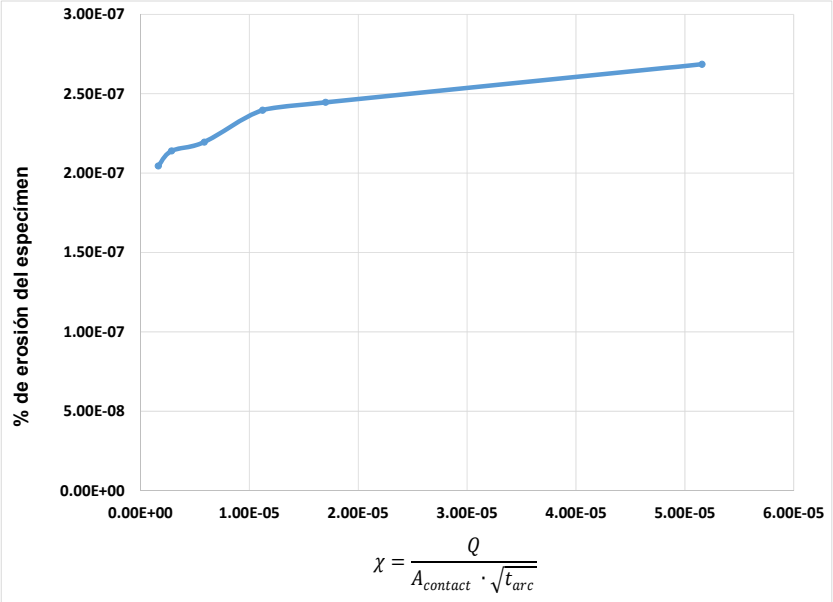


Figura 61 Variación de la erosión específica respecto de χ

De los resultados anteriores se establece que la energía del arco eléctrico es el principal causante de la erosión de los contactos, debido a los procesos electro-térmicos que se desarrollan en la superficie de los contactos, así como en los componentes que los rodean (toberas de soplado, cilindros de barrido, pantallas aislantes, etc.). Esta energía, de acuerdo a los resultados, es prácticamente igual para todos los eventos simulados en el interruptor bajo estudio, la cual depende únicamente de los parámetros eléctricos del circuito asociado al interruptor.

La corriente que fluye a través de los contactos del interruptor, cuando está cerrado, depende directamente de los parámetros de la carga conectada al sistema de potencia. Por otra parte, el ángulo de fase entre dicha corriente y el voltaje, también es determinado por las mismas características eléctricas. Durante la separación de los contactos, la corriente no cambia en forma instantánea y continua fluyendo en el entrehierro de los contactos.

Una vez que el interruptor inicia la separación de los contactos, inicia también su interacción con el sistema. En esencia, la separación de contactos, es la interconexión de una resistencia variable entre la fuente y la carga. Es aquí donde la dinámica del arco toma un papel importante en su propia extinción, ya que es su propia energía quien lo mantiene encendido (recordemos los procesos de establecimiento del arco e ionización: emisión de campo, ionización por impacto e ionización térmica) y ésta misma energía es aprovechada por las toberas de soplado para su extinción, cuando la corriente cruza por cero. Si el entrehierro no es aún suficiente para que el medio dieléctrico pueda soportar la TTR, el arco se encenderá nuevamente hasta el siguiente cruce por cero, mientras que la separación de contactos incrementa hasta un valor en que el medio dieléctrico pueda soportar la TTR e impedir una posterior re-ignición.

Los planteamientos anteriores no contradicen la hipótesis que a mayor corriente de arco se tiene un desgaste mayor de contactos. El rápido incremento de la temperatura en la superficie de los contactos, provocada por un canal de arco de alta intensidad, creará una mayor cantidad de metal vaporizado de la superficie de los contactos, causando un mayor desgaste, lo cual concuerda con los estudios realizados por diversos autores, sobre los

cuales se especifica una separación constante de electrodos, así como una tensión de arco constante para cualquier nivel de corriente. Por otra parte, el tiempo de arqueo también juega un papel muy importante, ya que a mayor tiempo de sostenimiento del arco, también se presentará mayor desgaste.

Sin embargo el diseño de los interruptores y su velocidad de operación limitan las condiciones anteriores y hacen que, dentro del rango de corriente nominal de corto circuito, el tiempo de extinción de la corriente de arco y el aguante a la TTR, sean similares para cada evento. Dejando que la energía del arco actúe sobre los contactos un tiempo comprendido entre dos a tres semiciclos.

Ahora bien, reforzando la primera parte de hipótesis establecida en esta tesis, donde se establece que la energía del arco eléctrico es la fuerza principal del desgaste de los contactos, puede observarse en la figura 53, después de la TTRI el arco eléctrico permanece encendido desde $t_1 = 0.15351$ hasta $t_2 = 0.1685$, posteriormente se apaga y por la TTR subsecuente, se enciende nuevamente en $t_3 = 0.1705$ hasta $t_4 = 0.172$, tiempo en que finalmente la corriente de arco se extingue. Comparando con la figura 54, aunque la corriente de arco es mayor, sólo se tiene presente en $t_1 = 0.1505$ a $t_2 = 0.154$; de $t_3 = 0.1570$ a $t_4 = 0.1620$. Aquí se tienen intervalos de tiempo en los que el arco permanece apagado. Por esta razón, la energía del arco, contenida en ambos tipos de eventos, es la misma, provocando una erosión similar en cada uno.

Los factores que influyen en el tiempo de sostenimiento del arco en la cámara de interrupción son las inductancias y capacitancias de la línea de transmisión y sus acoplamientos, razón por la cual, a mayor distancia, es más difícil para un interruptor, extinguir la corriente de arco.

La erosión de los contactos es un proceso acumulativo. Cada operación de extinción de corriente de arco producirá un determinado nivel de desgaste. Por lo tanto, la acumulación de erosión se puede establecer como

$$\sigma_{acum} = \frac{\sum m_i}{\sum Q_i} \tag{6.4}$$

Donde i es el número de operaciones del interruptor.

El efecto del incremento en la tasa de erosión específica para las diferentes magnitudes de corriente se muestra en la siguiente gráfica.

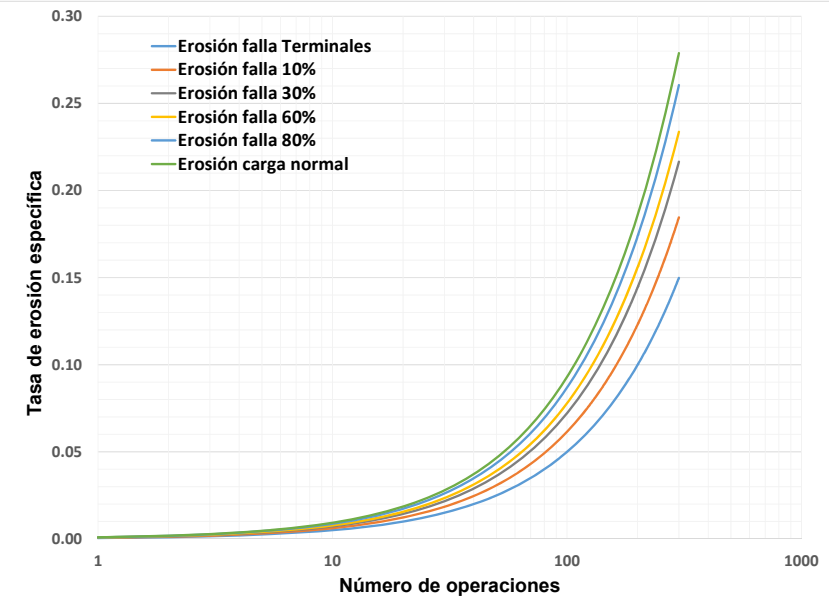


Figura 62 Variación de la erosión específica

VI.6 EFECTO DE LA EROSIÓN SOBRE EL VALOR DE LA RESISTENCIA DE CONTACTOS

La medición de la resistencia de contactos es una de las pruebas empleadas para determinar la condición operativa de los interruptores de potencia. En esta prueba se inyecta una determinada corriente y se mide la caída de tensión entre los electrodos (contactos) expresando, de esta forma, un valor en microhmios correspondiente a la resistencia de conexión.

El valor de la resistencia de contactos puede ser afectada por diversas causas como: deslizamiento y fricción mecánica debido a operaciones de apertura y cierre en forma continua; oxidación de los contactos por permanecer mucho tiempo en posición cerrado y; erosión provocada arco eléctrico.

Este último es el factor de deterioro que se estudió en esta tesis y para determinar la relación que tiene con el valor de la resistencia de contactos, debe analizarse la construcción de la cámara de interrupción.

Para el caso del interruptor TCL A3U30, la cámara de interrupción tiene la siguiente disposición física

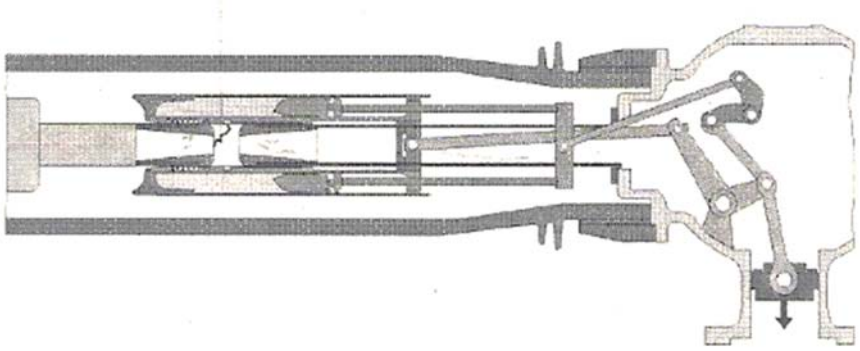


Figura 63 Cámara de interrupción del interruptor TCL A3U30

El diseño de la cámara de interrupción y la forma de operación del cilindro de barrido, obligan al canal de arco a establecerse a través de los contactos de arqueo, los cuales están diseñados expresamente para este fin pudiendo soportar grandes esfuerzos electro-térmicos.

Los demás componentes de la cámara de interrupción, así como los contactos de potencia, no están sometidos a los esfuerzos provocados por el arco eléctrico, por lo tanto, el deterioro que se presenta en éstos, puede considerarse que sólo es debido a la fricción mecánica por el deslizamiento en las operaciones de apertura y cierre, y a la oxidación que pudiera presentarse mientras están en posición cerrado.

La prueba de resistencia de contactos es el principal medio de medición de esta condición de deterioro. Se espera que, el resultado de esta prueba, incremente en forma lineal con el número de operaciones del interruptor. Si el resultado de esta prueba presenta valores fuera de lo estimado, puede ser indicativo de daños internos o deterioros que pueden ser originados por diversos factores, y no sólo por la interrupción de corriente de corto circuito.

Una vez establecido este punto, se ve la necesidad de contar con tablas de erosión establecidas por el fabricante, así como la cantidad máxima de material que puede perderse de los contactos de arqueo, antes que pierdan sus propiedades mecánicas y físicas de diseño, para que los ingenieros de encargados del mantenimiento, realicen estudios mediante el empleo de las técnicas desarrolladas en esta tesis, para analizar el comportamiento del interruptor en el circuito particular en el que estarán conectados. De esta forma pueden realizarse estimaciones del comportamiento y del número de operaciones máximas que deben alcanzarse para realizar actividades de mantenimientos mayores.

También se establece que, una vez alcanzado el número máximo de operaciones de interrupción, ya no se tendrá suficiente cantidad de material en los contactos de arqueo, y el proceso de erosión deberá ser recalculado para el material restante del contacto. Sin embargo, llegar a este punto no es algo deseable y debe ser evitado.

VI.6.1 RESULTADOS DE PRUEBAS DE RESISTENCIA DE CONTACTOS

Las pruebas de resistencia de contactos que se han realizado en el interruptor bajo estudio se presentan en la siguiente tabla, así mismo se incluyen en el anexo G.

Tabla 11 Resultados de prueba de Resistencia de Contactos de Interruptor TCL A3U30

		Año 2003	Año 2010	Año 2014
Fase A	Contacto 1	35.0	37.7	38.7
	Contacto 2	37.0	37.9	38.5
Fase B	Contacto 1	35.0	38.5	38.1
	Contacto 2	36.0	37.0	36.9
Fase C	Contacto 1	37.0	36.6	37.0
	Contacto 2	36.0	36.8	37.2

En la figura 64, se muestra una clara tendencia del incremento de la resistencia de contactos. Sin embargo, este incremento tiende a ser lineal y proporcional en las tres fases, independientemente de la cantidad de operaciones que se han realizado por falla. También es importante notar, que las primeras lecturas tomadas en el año 2003, fueron realizadas con un equipo de prueba diferente al empleado en los años 2010 y 2014. Esta situación desestima los resultados iniciales y deja con validez sólo la tendencia de los años subsecuentes[14]

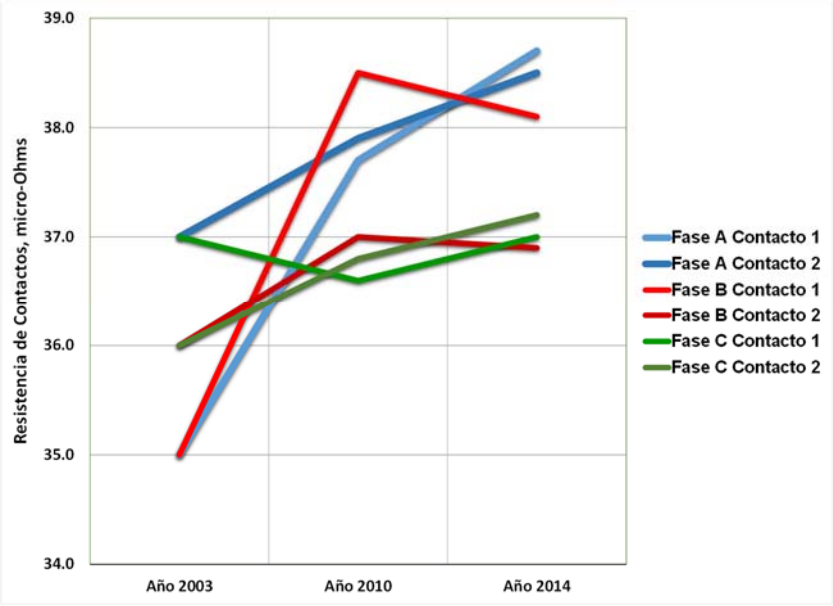


Figura 64 Variación de la resistencia de contactos del Interruptor A3U30

[14] El equipo empleado para las pruebas realizadas en los años 2010 y 2014 es marca Vanguard, tipo DMOM-200.

De acuerdo con lo estimado en la estadística de fallas y a los números de operaciones promedio anuales, durante el intervalo de tiempo mencionado en el párrafo anterior, el interruptor A3U30 realizó siete operaciones bajo condiciones de falla: cuatro en la fase A (de los cuales dos fueron con corriente de falla menor a la corriente nominal de servicio) dos en la fase B y uno en la Fase A. Además se tienen un total de 28 operaciones por condición de operación normal.

Puede, por lo tanto, inferirse, que el incremento en el valor de la resistencia de contactos es debido únicamente al desgaste provocado en el contacto fijo y los dedos de contacto móvil, por el deslizamiento durante las operaciones de cierre y apertura.

CONCLUSIONES

En esta tesis se abordó la comprensión del fenómeno del arco eléctrico y sus efectos en los contactos de los interruptores.

Desde los primeros estudios que intentaron definir la naturaleza y comportamiento del arco, hasta los más recientes, donde se reconoce la intervención de fenómenos complejos de transferencia de calor, el arco eléctrico se concibe como un plasma conductor de alta energía que cortocircuita los electrodos de los interruptores e interconecta a la fuente y la carga, provocando que la corriente continúe fluyendo a través de un medio dieléctrico altamente ionizado.

En la física de la naturaleza, cualquier manifestación energética está regida por el Principio de Conservación de Energía. Por esta razón, el arco presentado entre dos electrodos que se separan, es la manifestación de la energía eléctrica, que intenta permanecer en el estado estable previo a la desconexión, y la cual se fuerza a cambiar por la separación física del medio de unión entre los componentes pasivos y los componentes activos, para llevarlos a un nuevo estado de estabilidad. Esta manifestación energética, en forma de plasma eléctrico, contiene una gran cantidad de energía, la cual se manifiesta como la facilidad de conducción eléctrica y una alta temperatura.

En los sistemas de potencia se tienen dos formas principales de transmisión de energía eléctrica: corriente directa y corriente alterna.

Por su diferente naturaleza, el arco eléctrico que se produce en la separación de contactos, también tiene naturalezas distintas. En corriente continua no existe cruce natural de la corriente por cero. Esta característica hace que la extinción del arco en corriente directa sea un proceso más complicado, y por lo tanto tus efectos en los contactos son más considerables.

Por el contrario, en corriente alterna, la corriente cruza por cero varias veces por segundo, por lo que la extinción del arco se logra por medio del manejo de dos componentes

principales: propiciando que el medio dieléctrico entre los contactos no esté ionizado, de esta forma no se tendrán electrones libres que permitan la circulación de corriente y, asegurando que la separación de los contactos sea tal que el medio de interrupción soporte la tensión transitoria de restablecimiento. Esto hace que la tarea de extinguir la corriente de arco en CA sea una tarea relativamente fácil para los interruptores.

Los interruptores son componentes de los sistemas eléctricos sobre los que se puede ejercer una acción premeditada o autónoma, para modificar las condiciones de los circuitos. Se ha establecido que estos dispositivos son los directamente responsables de lograr la adaptabilidad de los sistemas de potencia. Son también los elementos que deben tener mayor cuidado en su diseño y fabricación, ya que deben operar, mediante dispositivos de maniobra mecánicos, para realizar cambios eléctricos, y al ser éstos los encargados de realizar dichos cambios, también son los encargados de soportar los fenómenos transitorios que se producen. Es decir, aunque no generan energía eléctrica, son componentes activos de los sistemas de potencia.

Se ha definido a los interruptores como dispositivos de conexión y desconexión de componentes de los sistemas eléctricos. Para hacer esta función, un interruptor de potencia es la integración de diferentes componentes mecánicos como resortes, levas, pernos, trinquetes, gatillos, presión de fluidos, etc., y eléctricos tales como relevadores, motores, presencia o ausencia de voltaje, etc., los cuales trabajan en conjunto con la finalidad de realizar la separación o unión física de los contactos de las cámaras de interrupción.

El estudio del arco eléctrico, el continuo crecimiento de la demanda de energía eléctrica y el desarrollo de nuevos materiales, han permitido la evolución de los interruptores de potencia. Cada día los equipos se diseñan con un mayor grado de simplicidad mecánica y eléctrica que los hacen más confiables.

Los interruptores de potencia aprovechan la energía del arco para propiciar su propia extinción. Es decir, se emplean sus propiedades térmicas y la sobrepresión que ésta genera, para provocar flujos de medio aislante frío alrededor del arco, el cual enfría

progresivamente el canal de arco reduciendo su energía. Además, conforme aumenta la separación entre los contactos, mayor cantidad de medio aislante ocupa ese espacio, provocando la deionización incrementando la razón de pérdida de energía del plasma. De esta forma, cuando la corriente cruza por cero, la energía del arco se vuelve cero.

Un aspecto que debe ser tomado en cuenta en el diseño de interruptores, es que cuando la corriente cruza por cero y se extingue, el sistema eléctrico (principalmente los componentes inductivos) continúa demandando corriente eléctrica. Esta demanda hace que la tensión a través de los contactos se incremente en forma considerable provocando la TTRI. En los primeros instantes de la operación de apertura, la separación física de los contactos es aún pequeña, por lo tanto, ante el incremento de voltaje y la presencia de iones, el medio dieléctrico rompe y el arco eléctrico se establece nuevamente.

Una vez que el arco cortocircuita a los contactos, la tensión entre los contactos disminuye considerablemente, el mecanismo de accionamiento continua separando los contactos haciendo que el entrehierro se haga más grande. La energía del arco nuevamente es aprovechada para su extinción y los procesos de enfriamiento y recambio del medio dieléctrico se presentan nuevamente. El voltaje entre los contactos cortocircuitados por el arco, o tensión de arco, disminuye de forma tal que en el siguiente cruce por cero se produce una nueva extinción de la corriente.

Si el medio entre los contactos no es capaz de soportar la nueva TTR, se tendrá un nuevo reencendido del arco, y los procesos descritos de presentarán hasta el siguiente cruce por cero.

En los sistemas de potencia, los procesos de extinción de arco y reencendido duran de dos a tres semiciclos. Es decir, que los interruptores de potencia, por lo general controlan la dinámica del arco para lograr una extinción en un tiempo de 17 a 24 ms.

Aun cuando el proceso de extinción de corriente involucra procesos físicos como la separación de contactos, transferencia de calor del arco hacia el medio y flujos de medio aislante a través del canal de arco para asegurar una trayectoria definida, el arco eléctrico

se interpreta como una resistencia variable que se interconecta entre la fuente y la carga. Esta resistencia incrementa la caída de tensión entre los contactos y provoca que la corriente deje de fluir cuando cruza por cero.

El voltaje entre los contactos también juega un papel relevante en el arco eléctrico. El incremento de tensión entre los contactos una vez que la corriente se extingue es factor decisivo para el reencendido. La TTR entonces debe ser soportada por el interruptor para poder asegurar una extinción exitosa de la corriente de arco.

Ahora bien, desde el punto de vista de los contactos, la presencia del arco eléctrico en su superficie provoca procesos de pérdida de material o erosión. Esto es porque a través del canal de arco fluyen electrones del cátodo al ánodo, los cuales son tomados del medio de interrupción y, principalmente, de los materiales con que están fabricados los contactos.

Es por esta razón que los diseñadores de interruptores construyen equipos con dos tipos diferentes de contactos: los contactos de potencia o principales, a través de los cuáles se asegura que la corriente eléctrica fluya libremente sin presentar una resistencia considerable, fabricados de materiales con excelente propiedades conductivas y; los contactos de arqueo, los cuales están fabricados con materiales de alta resistencia a la degradación por arco eléctrico y cesión de electrones al canal de arco.

Los materiales de los contactos de arqueo no están diseñados para la operación normal, por esta razón no se emplean como medios de conexión principal.

Por otra parte, se estableció que el diseño de los interruptores y de las cámaras de interrupción es tal que se asegure que el canal de arco se manifieste sólo por una trayectoria definida y a través de los contactos de arqueo, y no a través de los contactos principales.

Por lo anterior, como se demostró en el desarrollo de esta tesis, es difícil establecer una relación lineal entre el valor de la resistencia de contactos y el grado de desgaste de los

contactos ocasionado por arco eléctrico. Más aún, no es posible establecer en forma precisa, que el valor de la resistencia de contactos sea directamente afectado por la corriente de corto circuito que el interruptor debe manejar.

En complemento a lo anterior, no debe perderse de vista que, los métodos convencionales para efectuar la prueba de resistencia de contactos que se tiene establecida en los procedimientos de mantenimiento de la CFE, miden la resistencia del contacto de potencia, es decir, la conexión efectiva entre dos componentes que en principio no están sometidos a procesos de arco eléctrico. Por lo tanto, una desviación en el resultado de prueba es función principal de daño interno como componentes flojos o defectuosos, ensambles inadecuados o procesos de mantenimiento efectuados sin los cuidados necesarios, o de procesos de degradación por humedad en el medio de interrupción y oxidación de éstos.

En el desarrollo de esta tesis, se ha establecido entonces que, el arco eléctrico y sus efectos se presentan en aquellos componentes que, en principio, fueron diseñados para este fin, y por lo tanto, deben ser capaces de soportar dichos esfuerzos sin sufrir deterioro considerable.

Por otra parte, el estudio del arco eléctrico que han realizado diversos autores y la suposición que la caída de tensión en el cátodo y el ánodo es constante para cualquier nivel de corriente, no es del todo aplicable para la operación real de los interruptores. Se ha demostrado que el principal motor productor del arco a través de los contactos, mientras se realiza el proceso de interrupción, es la característica eléctrica del sistema de potencia en ese punto en particular, así como de las impedancias de los elementos involucrados durante una falla (impedancia característica de líneas de transmisión, impedancia de conexión a tierra, condiciones de potencia del sistema en el momento de ocurrencia de la falla, etc.)

Ahora bien, considerando que el arco eléctrico es una manifestación de energía que se produce cuando se fuerza a un sistema eléctrico a modificar sus características, a través de la desconexión de elementos, es lógico establecer que la energía que mantiene

encendido a dicho arco eléctrico depende de tres condiciones principales: la tensión entre los electrodos o tensión de arco; la magnitud de la corriente y; el tiempo que permanece encendido el arco.

Por lo anterior, la suposición que la tensión de arco es constante para cualquier nivel de corriente es válida sólo para condiciones de laboratorio. Condiciones que pueden variar significativamente respecto de la operación real de los interruptores.

De acuerdo a la suposición anterior, es estableció, como punto medular de esta tesis, el empleo de programas basados en transitorios electromagnéticos como el EMTP-ATP, para estudiar el comportamiento del arco eléctrico basado en los modelos de arco desarrollados previamente por diversos investigadores, así como la determinación de la energía contenida en el mismo arco, para establecer un parámetro de comparación que base su estudio en el fenómeno físico de deterioro de contactos, y no sólo en la suposición de una cierta cantidad acumulada de corriente o un determinado número de operaciones.

Los resultados obtenidos en el estudio del arco eléctrico para el caso de tipo, demostraron que la energía contenida en el arco, para diversas características de operación de interruptores, es similar, e incluso que para corrientes de arco reducidas, la tasa de erosión es mayor que la obtenida para corrientes de arco elevadas. Por esta razón con la evaluación energética desarrollada por la dinámica de arco, es fácil comprender por qué para un interruptor de potencia es más sencillo interrumpir corrientes de corto circuito elevadas en comparación con corrientes de corto circuito relativamente bajas o corrientes de carga normal. Razón por la cual, interruptores instalados en reactores o bancos de capacitores sufren un mayor desgaste que los interruptores instalados en líneas de transmisión, aun cuando la cantidad de corriente es mucho menor en los primeros.

Se hace notar entonces, que los procedimientos de mantenimiento basados sólo en el número de operaciones o en la corriente de corto circuito acumulada no es una práctica fiable y puede incurrirse en costos excesivos o mal dirigidos.

Con estos resultados, se demuestra que los programas de mantenimiento de los interruptores de potencia deben realizarse en base al desgaste de los contactos ocasionados por la energía de la corriente de arco, y en la erosión máxima permisible que pueden tener los contactos de arqueo y/o principales.

Esta afirmación enfatiza un cambio de ideología: los interruptores de potencia deben ser evaluados en base al proceso principal de deterioro de sus componentes activos: la energía contenida en el arco y la tasa de desgaste de los contactos por arco eléctrico.

En concordancia con el párrafo anterior, se hace evidente la necesidad de establecer periodos de mantenimiento basados en la condición de deterioro de los contactos de arqueo y/o de potencia, de acuerdo a la energía del arco. Para esto, los fabricantes de los interruptores, deben presentar tasas de erosión que puedan ser equiparadas con la energía del arco, y no sólo establecer dichas actividades a parámetros de tiempo de vida y número de operaciones.

Con esto se podrían emplear materiales de diferentes tasas de erosión en los contactos de arqueo y el único efecto directo sería en el aumento o disminución de los periodos de mantenimiento, sin afectar su integridad y/o su confiabilidad.

El estudio presentado en esta tesis es de aplicación general. Como se demostró, puede modificarse el circuito eléctrico y los parámetros del sistema, para simular cualquier segmento del sistema de potencia. Con esto el estudio presentado no se limita a una aplicación particular. Además, modificando las constantes del modelo del arco, o empleando modelos de arco de otros autores, puede extenderse el estudio a diferentes tecnologías de interrupción, como vacío y pequeño volumen de aceite.

DESARROLLOS POSTERIORES.

El modelo del arco eléctrico empleado en el desarrollo de esta tesis permitió determinar la cantidad de energía contenida en el arco para diversas aplicaciones y tipos de eventos. Sin embargo es posible mejorar la precisión de los resultados empleando modelos de arco que integren tasas de transferencia de calor, velocidad en la separación de los contactos, degradación del medio de interrupción y la propia degradación de los contactos de arqueo.

Pese a lo anterior, se sólo se prevé que se mejore la exactitud de los resultados, presentando tasas de erosión más acordes a la realidad, y no una tendencia contraria a lo expuesto en esta tesis. Esto es porque la energía del arco depende de las mismas variables eléctricas, es decir, del sistema de potencia. La integración de estos componentes en el modelo provocará una disminución en la tasa de erosión, no en la tendencia.

Los resultados obtenidos en la tasa específica de erosión fueron considerando que el área de contacto es igual a la unidad. Esta suposición no afecta la tendencia del resultado obtenido, ya que todas las simulaciones y cálculos fueron realizadas con este planteamiento. Queda para estudio posterior, determinar en forma precisa el área de contacto o de arqueo, para el caso del interruptor Siemens, para obtener resultados más precisos.

REFERENCIAS

[1] W. R. Wilson, «High-Current Arc Erosion of Electric Contact Materials,» *AIEE Winter General Meeting,* pp. 657-664, Agosto 1955.

[2] T. P. CFE, *Base de Datos y Registros de Pruebas, SE Tecali,* Tecali de Herrera, Puebla, 2014.

[3] Comisión Federal de Electricidad, Manual de Operación de Interruptores de Potencia, C. d. T. y. Transformación, Ed., 2013.

[4] M. H. Ayrton, «The Electric Arc,» *The Electrician,* 1902.

[5] C. D. Ramirez Pacheco, «Plasma y Arco Eléctrico en Interruptores de Potencia,» de *Plasma y Arco Eléctrico en Interruptores de Potencia*, Cuernavaca, Morelos, 2007.

[6] F. Furfari, «Dr. Joseph Slepian - Scientist, engineer, inventor,» *IEEE, Ind Applicat. Mag.,* vol. 6, pp. 14-19, 2000.

[7] J. Slepian, «Theory of the deion circuit-breaker,» *AIEE, Trans,* vol. 48, pp. 523-527, 1929.

[8] D. Prince, «The theory of of oil-blast circuit-breaker,» *AIEE Trans,* vol. 51, pp. 166-170, 1932.

[9] H. A. D. a. N. I. Elkalashy, «Universal Arc Representation Using EMTP,» *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol. 20, nº 2, April 2005.

[10] H. Edels, «Properties and Theory of The Electric Arc,» *The Institution of Electrical Engineers,* pp. 55-69, 1961.

[11] D. V. N. H. Ayrton, The Electric Arc, New York, 1902.

[12] M. Wehrli, «Die Vorgänge an der Kathode beim Übergang von der Glim in die Bogenentladung,» *Helvetica Physica Acta,* vol. 1, p. 323, 1928.

[13] W. Elenbass, «Die Qecksilber-Hochdruckentladung,» *Physica,* p. 673, 1934.

[14] G. Heller, «Dynamical Similarity Laws of the Mercury High Pressure Discharge,» *Physics,* p. 389, 1935.

[15] V. Francis, «Theory of the High Pressure Mercury-Vapour Discharge,» *Philosophical Magazine,* vol. 37, p. 433, 1946.

[16] G. a. H. Schmitz, «Zur numerischen Berenchnung von Temperatureverteilungen in wandstabilisierten Bogenentladungen,» *Seitschift für Physik,* vol. 129, p. 104, 1951.

[17] O. a. D. H. Koch, «Ein Beitrag zur Temperaturbestimmung im wandstabilisierten Quecksilberhochdruckbogen,» *Zeitscrift für Physik,* vol. 129, p. 140, 1951.

[18] R. D. Garzón, High Voltage Circuit Breakers. Design and Applications, New York: Marcel Dekker, Inc, 2002, pp. 15-40.

[19] M. S. T. V. V. B. a. T. H. Jens Tepper, «Investigation on Erosion of Cu/W Contacts in High-Voltage Circuit Breakers,» *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies,* vol. 29, nº 3, 2006.

[20] J. Slepian, «Extinction of an a.c. arc,» *Transactions AIEE,* vol. 47, p. 1398, 1928.

[21] W. F. S. D. C. Prince, «The oil blast circuit breaker,» *Transactions AIEE,* vol. 50, pp. 506-512, 1931.

[22] R. F. W. Guy St.-Jean, «Equivalence between direct and synthetic short-circuit interruption test on HV circuit breakers,» *IEEE transactions on power apparatus and systems,* Vols. %1 de %2PAS-102, nº 7, pp. 2216-2223, 1983.

[23] O. Mayr, «Beitrage zur Theorie des Statisghen und des Dynamishen Licht-bogens,» *Archiv fur Electrotechnik,* vol. 37, nº 12, pp. 588-608, 1943.

[24] J. T. E. Browne, «A study of arc behavior near current zero by means of mathematical models,» *AIEE Transactions,* vol. 67, pp. 141-143, 1948.

[25] Comisión Federal de Electricidad, Manual de Operación de Interruptores de Potencia, C. d. T. y. Transformación, Ed., 2003.

[26] S. R K, I. I y D. S G, Handbook of Switchgears, McGraw-Hill, 2005.

[27] L. v. d. Sluis, Transients in Power Systems, West Sussex, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001.

[28] IEC, High-voltage switchgear amd controlgear - Part. 100: Alternating-current circuit-breakers, Geneva: IEC Central Office, 2004.

[29] A. Greenwood, Electrical Transients in Power Systems, Troy, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1990.

[30] C. D. Ramirez Pacheco, «Curso ATP Draw,» Cuernavaca, Morelos, 2010.

[31] S. C. IEEE, «Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers,» *IEEE Power Engineering Society,* pp. 2-4, 2005.

[32] M. K. Z. G. A. Ahmethodzic, «Computer Simulation of High Voltage SF6 Circuit Breakers: Approach to modeling and Application Results,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,* vol. Vol. 18, nº 4, pp. 1314-1322, 2011.

[33] D. R.W.Alexander, «Transient Recovery Voltage (TRV) for High-Voltage Circuit Breakers. Tutorial».

[34] S. AG, Instrucciones de Servicio Interruptor de Potencia 3AT3 EI, Berlin: Siemens AG, 2002, pp. 13-16.

[35] P. C. C. Ramírez, «Simulation of electric power circuit breakers in the EMTP incorporating electric arc models application to reactor bank switching and short line fault,» *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena,* pp. 660-664, 2001.

ANEXO A

Table 3 – Limits of temperature and temperature rise for various parts, materials and dielectrics of high-voltage switchgear and controlgear

Nature of the part, of the material and of the dielectric (Refer to points 1, 2 and 3) (Refer to note)	Maximum value	
	Temperature °C	Temperature rise at ambient air temperature not exceeding 40 °C K
1 Contacts (refer to point 4)		
Bare-copper or bare-copper alloy		
– in air	75	35
– in SF_6 (sulphur hexafluoride) (refer to point 5)	105	65
– in oil	80	40
Silver-coated or nickel-coated (refer to point 6)		
– in air	105	65
– in SF_6 (refer to point 5)	105	65
– in oil	90	50
Tin-coated (refer to point 6)		
– in air	90	50
– in SF_6 (refer to point 5)	90	50
– in oil	90	50
2 Connection, bolted or the equivalent (refer to point 4)		
Bare-copper, bare-copper alloy or bare-aluminium alloy		
– in air	90	50
– in SF_6 (refer to point 5)	115	75
– in oil	100	60
Silver-coated or nickel-coated refer to point 6)		
– in air	115	75
– in SF_6 (refer to point 5)	115	75
– in oil	100	60
Tin-coated		
in air	105	65
– in SF_6 (refer to point 5)	105	65
– in oil	100	60
3 All other contacts or connections made of bare metals or coated with other materials	(Refer to point 7)	(Refer to point 7)
4 Terminals for the connection to external conductors by screws or bolts (refer to point 8)		
– bare	90	50
– silver, nickel or tin-coated	105	65
– other coatings	(Refer to point 7)	(Refer to point 7)

Table 3 *(continued)*

Nature of the part, of the material and of the dielectric (Refer to points 1, 2 and 3) (Refer to note)	Maximum value	
	Temperature °C	**Temperature rise at ambient air temperature not exceeding 40 °C** K
5 Oil for oil switching devices (refer to points 9 and 10)	90	50
6 Metal parts acting as springs	(Refer to point 11)	(Refer to point 11)
7 Materials used as insulation and metal parts in contact with insulation of the following classes (refer to point 12)		
– Y	90	50
– A	105	65
– E	120	80
– B	130	90
– F	155	115
– Enamel: oil base	100	60
synthetic	120	80
– H	180	140
– C other insulating material	(Refer to point 13)	(Refer to point 13)
8 Any part of metal or of insulating material in contact with oil, except contacts	100	60
9 Accessible parts		
– expected to be touched in normal operation	70	30
– which need not to be touched in normal operation	80	40
NOTE The points referred to in this table are those of 4.4.3.		

ANEXO B. Cédula de Mantenimiento Interruptor SIEMENS 3AT3

6.2 Instandhaltungsplan

Instandhaltungsdienste
A = Kontrolle
B = Instandhaltung
C = Kontrolle des Kontaktsystems

A	B	C	Absatz	Instandhaltungsmaßnahme
X	X	X	6.3.1	Allgemeine Kontrolle
X	X	X	6.3.2	Zahl der Schaltspiele und besondere Vorkommnisse notieren
X			6.3.3	SF_6-Gas-Füllung prüfen
	X	X	6.3.4	SF_6-Gas absaugen, Öldruck ablassen und Schaltvorrichtung anbauen
	X	X	6.3.5	Kontrolle des Kontaktsystems und des Blaszylinders
	X	X	6.3.6	Sichtkontrolle der Teile des Zwischengetriebes
	X	X	6.3.7	Sichtkontrolle der Teile des Einschaltwiderstand-Getriebes
	X	X	6.3.8	Filterbeutel austauschen
	X	X	6.3.9	SF_6-Gas einfüllen
X	X		6.3.10.1	Sichtkontrolle am Hydrauliksystem
X	X		6.3.10.2	Kontrolle des Korrosionsschutzes am Hydraulikspeicher
X	X		6.3.10.3	Kontrolle der Auslöser
X			6.3.10.4	Ölstand und Ölqualität kontrollieren
	X		6.3.10.5	Schlauch erneuern
	X		6.3.10.6	Öl ablassen, Ölbehälter und Ansaugfilter reinigen und neues Öl einfüllen
X	X		6.3.10.7	Ölpumpe entlüften

Tab. 20 Instandhaltungsplan (Teil 1)

6.2 Plan de mantenimiento

Servicios de mantenimiento
A = Control
B = Plan de mantenimiento
C = Control del sistema de contactos

A	B	C	Párrafo	Operaciones de mantenimiento
X	X	X	6.3.1	Control general
X	X	X	6.3.2	Anotar el número de ciclos de maniobra y los eventos particulares
X			6.3.3	Comprobación de la carga de gas SF_6
	X	X	6.3.4	Aspirar gas SF_6, evacuar presión de aceite y montar el dispositivo de maniobra
	X	X	6.3.5	Control del sistema de contactos y el cilindro de barrido
	X	X	6.3.6	Control visual de las partes de la transmisión intermedia
	X	X	6.3.7	Control visual de las partes de la transmisión de la resistencia de cierre.
	X	X	6.3.8	Cambiar las bolsas de filtro
	X	X	6.3.9	Carga de gas SF_6
X	X		6.3.10.1	Control visual en el sistema hidráulico
X	X		6.3.10.2	Control de la protección de corrosión en el acumulador hidráulico
X	X		6.3.10.3	Control de los disparadores
X			6.3.10.4	Control del nivel y la calidad del aceite
	X		6.3.10.5	Renovación del tubo flexible
	X		6.3.10.6	Evacuar el aceite, limpiar el depósito de aceite y el filtro de aspiración, y verter aceite nuevo.
X	X		6.3.10.7	Purga de aire de la bomba de aceite

Tabla 20 Cédula de mantenimiento (parte 1)

Instandhaltungsdienste

A = Kontrolle

B = Instandhaltung

C = Kontrolle des Kontaktsystems

Servicios de mantenimiento

A = Control

B = Plan de mantenimiento

C = Control del sistema de contactos

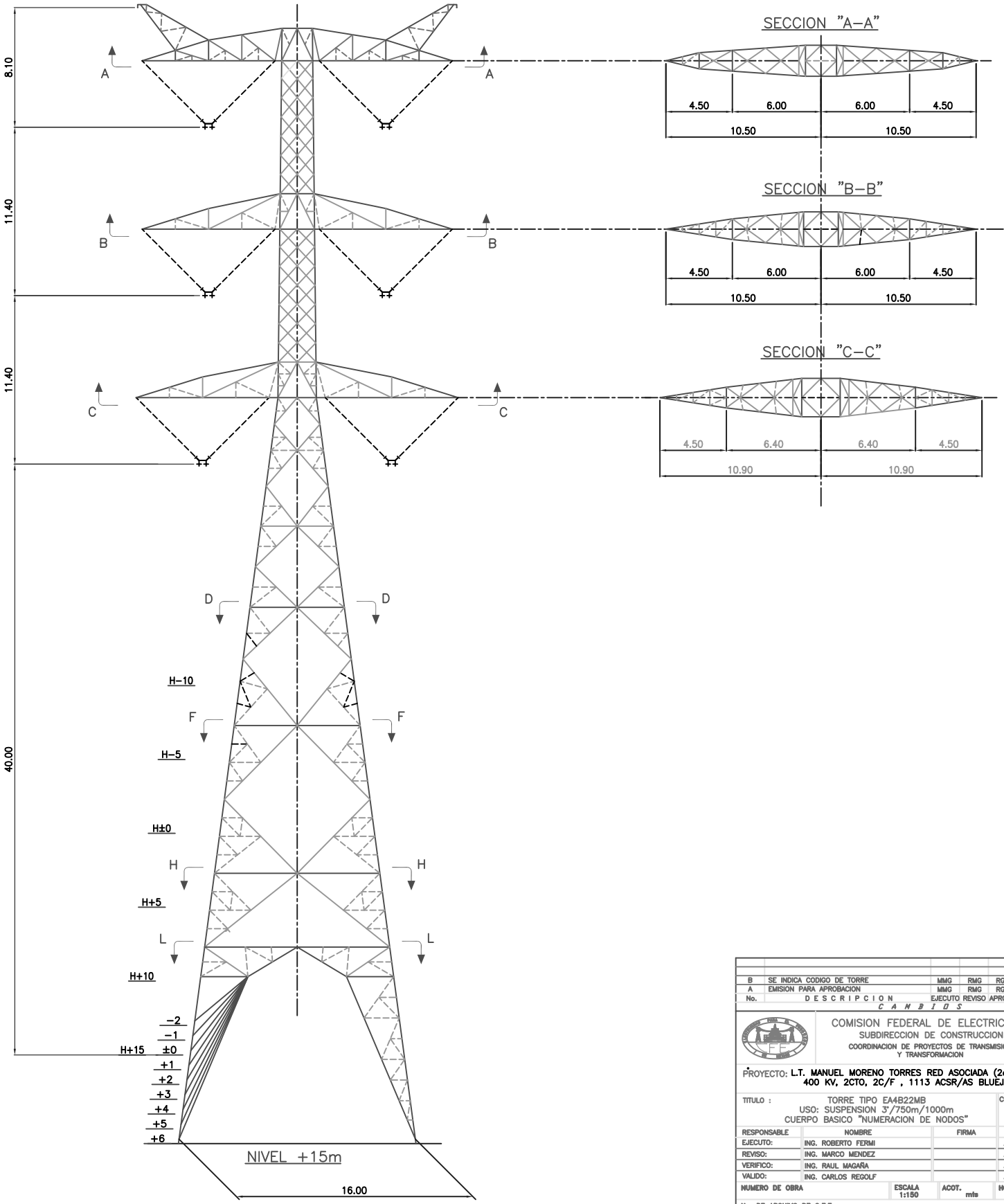
A	B	C	Absatz	Instandhaltungsmaßnahme
	X		6.3.10.8	Entlüften des Hydrauliksystems
	X		6.3.10.9	Hydrauliksystem auf Nenndruck bringen
X	X		6.3.10.10	Stickstoffvorfülldruck kontrollieren
X	X		6.3.10.11	Ansprechdruck und Schließdruck des Sicherheitsventils kontrollieren
X	X		6.3.10.12	Innere Dichtheit des Hydrauliksystems kontrollieren
X	X		6.3.11	Ansprechwerte des SF_6-Dichtewächters und der Öl-Druckschalter kontrollieren
	X		6.3.12	Schalter-Manometer für SF_6-Gas und Drucköl prüfen
X	X		6.3.13	Heizung zur Verhinderung von Kondenswasser
X	X	X	6.3.14	Funktionskontrollen
	X	X	6.3.15	Dichtheitsprüfung
	X		6.3.16	Elektrische Verbindungen
X	X		6.3.17	Korrosionsschutz
	X	X	6.3.18	SF_6-Gas-Feuchtegehalt prüfen
	X	X	6.3.19	SF_6-Luftanteil messen

Tab. 21 Instandhaltungsplan (Teil 2)

A	B	C	Párrafo	Operaciones de mantenimiento
	X		6.3.10.8	Purga de aire del sistema hidráulico
	X		6.3.10.9	Puesta del sistema de hidráulico a la presión nominal
X	X		6.3.10.10	Controlar la presión de carga inicial de nitrógeno
X	X		6.3.10.11	Controlar la presión de reacción y la presión de cierre de la válvula de seguridad
X	X		6.3.10.12	Control de fugas internas en el sistema hidráulico
X	X		6.3.11	Controlar los valores de reacción del densímetro del SF_6 y de los interruptores automáticos de aumento de presion del aceite.
	X		6.3.12	Comprobar el manómetro del interruptor para gas SF_6 y el aceite de presión
X	X		6.3.13	Calefacción contra condensaciones
X	X	X	6.3.14	Controles de funcionamiento
	X	X	6.3.15	Comprobación de la hermeticidad
	X		6.3.16	Conexiones eléctricas
X	X		6.3.17	Protección anticorrosiva
	X	X	6.3.18	Controlar el contenido de humedad del gas SF_6
	X	X	6.3.19	Medición del contenido de aire en el SF_6

Tabla 21 Cédula de mantenimiento (parte 2)

Anexo C. Perfil de Estructura EA4B22MB



B	SE INDICA CODIGO DE TORRE	MMG	RMG	RGC	JUN/02
A	EMISION PARA APROBACION	MMG	RMG	RGC	ABR/02
No.	DESCRIPCION	EJECUTO	REVISO	APROBO	FECHA

CAMBIOS

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
SUBDIRECCION DE CONSTRUCCION
COORDINACION DE PROYECTOS DE TRANSMISION Y TRANSFORMACION

PROYECTO: L.T. MANUEL MORENO TORRES RED ASOCIADA (2a ETAPA) 400 KV, 2CTO, 2C/F , 1113 ACSR/AS BLUEJAY

TITULO : TORRE TIPO EA4B22MB
USO: SUSPENSION 3°/750m/1000m
CUERPO BASICO "NUMERACION DE NODOS"

CODIGO: K9

RESPONSABLE	NOMBRE	FIRMA	FECHA:
EJECUTO:	ING. ROBERTO FERMI		ABR/2002
REVISO:	ING. MARCO MENDEZ		ABR/2002
VERIFICO:	ING. RAUL MAGAÑA		ABR/2002
VALIDO:	ING. CARLOS REGOLF		ABR/2002

NUMERO DE OBRA	ESCALA	ACOT.	HOJA:
	1:150	mts	2 DE 2

No. DE ARCHIVO DE C.F.E.

IDENTIFICADOR DE ASEGURAMIENTO DE CALIDAD:

Propiedad de C.F.E., prohibida su reproducción parcial o total.

ANEXO D. Simulaciones de Fallas en Nodo EDO

```
Summary of fault being displayed:
Prefault voltage: Flat Bus V=1 p.u.
Generator impedance: Subtransient
MOV iteration:                  [Off]

================================================================================================================================================
  1. Interm. Fault on:   22000 EDO-400 400.kV - 16840 TCL-CS3 400.kV 1L 1LG 1.00% Type=A
                                                    FAULT CURRENT (A @ DEG)
                + SEQ             - SEQ             0 SEQ            A PHASE            B PHASE            C PHASE
             4430.3@ -81.1     4430.3@ -81.1     4430.3@ -81.1     13291.0@ -81.1       0.0@   0.0       0.0@   0.0
                                                    THEVENIN IMPEDANCE (OHM)
           2.23761+j 14.628   2.19953+j 14.557   3.65446+j22.3311

                SHORT CIRCUIT MVA= 9208.3         X/R RATIO= 6.3692     R0/X1= 0.24983    X0/X1= 1.5266
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
BUS -16840 TCL-$1 $EDO-   400.KV  AREA   1  ZONE   2   TIER   0       (PREFAULT V=1.000@   0.0 PU)
                                + SEQ            - SEQ            0 SEQ           A PHASE          B PHASE          C PHASE
VOLTAGE (KV, L-G)          >    165.472@  -0.1    65.224@-179.7   100.250@ 179.6     0.000@   0.0   249.222@-127.1   250.886@
126.8
BRANCH CURRENT (A) TO      >
 16840 TCL-CS3       400.  1L      27.9@ -89.9      26.8@ -89.8      54.4@ -90.9     109.1@ -90.4      27.0@ -94.0      27.0@ -
89.8
 22000 EDO-400       400.  1L    4457.9@  98.9    4456.8@  98.9    4483.9@  98.8   13398.7@  98.8      27.0@  86.0      27.0@
90.2

CURRENT TO FAULT (A)       >     4430.3@ -81.1    4430.3@ -81.1    4430.3@ -81.1   13291.0@ -81.1       0.0@   0.0       0.0@
0.0
THEVENIN IMPEDANCE (OHM)   >    14.7982@  81.3   14.7222@  81.4   22.6282@  80.7
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
MONITORED BRANCH:  22000 EDO-400        400.KV -> -16840 TCL-$1 $EDO-   400.KV  1L

                                  + SEQ            - SEQ            0 SEQ           A PHASE          B PHASE          C PHASE
RELAY CURRENT (A)                4458.2@ -81.1    4457.1@ -81.1    4484.4@ -81.2   13399.7@ -81.2      27.2@ -94.0      27.3@ -
89.8

BUS VOLTAGES (KV, L-G)
 22000 EDO-400        400.kV    168.650@  -0.0    62.045@-179.9    89.534@-179.6    17.089@  -2.5   245.925@-125.5   245.266@
125.6
-16840 TCL-$1 $EDO-   400.kV    165.472@  -0.1    65.224@-179.7   100.250@ 179.6     0.000@   0.0   249.222@-127.1   250.886@
126.8
            3Io=   13453.2@ -81.2 A      Va/Ia=        1.28@  78.7 Ohm      (Va-Vb)/(Ia-Ib)=        19.1@ 132.4 Ohm
            (Zo-Z1)/3Z1 = 0.7959 @-15.0
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



Summary of fault being displayed:
Prefault voltage: Flat Bus V=1 p.u.
Generator impedance: Subtransient
MOV iteration:                  [Off]

================================================================================================================================================
  1. Interm. Fault on:   22000 EDO-400 400.kV - 16840 TCL-CS3 400.kV 1L 2LG 1.00% Type=B-C
                                                    FAULT CURRENT (A @ DEG)
                + SEQ             - SEQ             0 SEQ            A PHASE            B PHASE            C PHASE
             9741.0@ -81.2     5901.5@  98.5     3839.6@  99.2       0.0@   0.0     14769.1@ 165.7     14671.2@  31.8
                                                    THEVENIN IMPEDANCE (OHM)
           2.23761+j 14.628   2.19953+j 14.557   3.65446+j22.3311

                SHORT CIRCUIT MVA= 10232.4        X/R RATIO= 6.49104    R0/X1= 0.24983    X0/X1= 1.5266
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
BUS -16840 TCL-$1 $EDO-   400.KV  AREA   1  ZONE   2   TIER   0       (PREFAULT V=1.000@   0.0 PU)
                                + SEQ            - SEQ            0 SEQ           A PHASE          B PHASE          C PHASE
VOLTAGE (KV, L-G)          >     86.884@  -0.1    86.884@  -0.1    86.884@  -0.1   260.651@  -0.1     0.000@   0.0     0.000@
0.0
BRANCH CURRENT (A) TO      >
 16840 TCL-CS3       400.  1L      60.2@ -90.1      35.7@  89.7      47.1@  89.4      22.6@  88.5     101.9@ 144.2     102.4@
35.3
 22000 EDO-400       400.  1L    9800.5@  98.7    5936.8@ -81.6    3886.1@ -80.9      22.6@ -91.5   14864.0@ -14.4   14773.4@-
148.2

CURRENT TO FAULT (A)       >     9741.0@ -81.2    5901.5@  98.5    3839.6@  99.2       0.0@   0.0   14769.1@ 165.7   14671.2@
31.8
THEVENIN IMPEDANCE (OHM)   >    14.7982@  81.3   14.7222@  81.4   22.6282@  80.7
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
MONITORED BRANCH:  22000 EDO-400        400.KV -> -16840 TCL-$1 $EDO-   400.KV  1L

                                  + SEQ            - SEQ            0 SEQ           A PHASE          B PHASE          C PHASE
RELAY CURRENT (A)                9801.1@ -81.3    5937.2@  98.4    3886.5@  99.1      22.8@  88.5   14864.9@ 165.6   14774.4@
31.8

BUS VOLTAGES (KV, L-G)
 22000 EDO-400        400.kV     93.874@   0.2    82.649@  -0.3    77.596@   0.6   254.113@   0.2    13.334@-138.6    15.537@
136.9
-16840 TCL-$1 $EDO-   400.kV     86.884@  -0.1    86.884@  -0.1    86.884@  -0.1   260.651@  -0.1     0.000@   0.0     0.000@
0.0
            3Io=   11659.4@  99.1 A      Va/Ia=   1.12e+004@ -88.4 Ohm      (Va-Vb)/(Ia-Ib)=        17.8@  16.4 Ohm
            (Zo-Z1)/3Z1 = 0.7959 @-15.0
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
```

```
Summary of fault being displayed:
Prefault voltage: Flat Bus V=1 p.u.
Generator impedance: Subtransient
MOV iteration:                  [Off]

================================================================================================================================================
  1. Interm. Fault on:   22000 EDO-400 400.kV - 16840 TCL-CS3 400.kV 1L 3LG 1.00%
                                                    FAULT CURRENT (A @ DEG)
                 + SEQ              - SEQ              0 SEQ              A PHASE            B PHASE            C PHASE
              15612.2@ -81.3         0.0@   0.0         0.0@   0.0     15612.2@ -81.3     15612.2@ 158.7     15612.2@  38.7
                                                    THEVENIN IMPEDANCE (OHM)
            2.23761+j 14.628   2.19953+j 14.557   3.65446+j22.3311

                 SHORT CIRCUIT MVA= 10816.4        X/R RATIO= 6.54007     R0/X1= 0.24983    X0/X1= 1.5266
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
BUS -16840 TCL-$1 $EDO-   400.KV  AREA   1  ZONE   2   TIER   0       (PREFAULT V=1.000@   0.0 PU)
                                  + SEQ              - SEQ              0 SEQ              A PHASE            B PHASE            C PHASE
VOLTAGE (KV, L-G)          >      0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@
0.0
BRANCH CURRENT (A) TO      >
 16840 TCL-CS3       400.  1L      96.0@ -90.2       0.0@   0.0       0.0@   0.0      96.0@ -90.2      96.0@ 149.8      96.0@
29.8
 22000 EDO-400       400.  1L   15707.0@  98.6       0.0@   0.0       0.0@   0.0   15707.0@  98.6   15707.0@ -21.4   15707.0@-
141.4

CURRENT TO FAULT (A)       >    15612.2@ -81.3       0.0@   0.0       0.0@   0.0   15612.2@ -81.3   15612.2@ 158.7   15612.2@
38.7
THEVENIN IMPEDANCE (OHM)   >    14.7982@  81.3   14.7222@  81.4   22.6282@  80.7
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
MONITORED BRANCH:  22000 EDO-400        400.KV -> -16840 TCL-$1 $EDO-   400.KV  1L

                                  + SEQ              - SEQ              0 SEQ              A PHASE            B PHASE            C PHASE
RELAY CURRENT (A)               15707.9@ -81.4       0.0@   0.0       0.0@   0.0   15707.9@ -81.4   15707.9@ 158.6   15707.9@
38.6

BUS VOLTAGES (KV, L-G)
 22000 EDO-400        400.kV     11.231@   4.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0    11.231@   4.0    11.231@-116.0    11.231@
124.0
-16840 TCL-$1 $EDO-   400.kV      0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@
0.0
            3Io=       0.0@   0.0 A      Va/Ia=       0.715@  85.4 Ohm      (Va-Vb)/(Ia-Ib)=       0.715@  85.4 Ohm
            (Zo-Z1)/3Z1 = 0.7959 @-15.0
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------


Summary of fault being displayed:
Prefault voltage: Flat Bus V=1 p.u.
Generator impedance: Subtransient
MOV iteration:                  [Off]

================================================================================================================================================
  1. Interm. Fault on:   22000 EDO-400 400.kV - 16840 TCL-CS3 400.kV 1L LL 1.00% Type=A-B
                                                    FAULT CURRENT (A @ DEG)
                 + SEQ              - SEQ              0 SEQ              A PHASE            B PHASE            C PHASE
              7826.2@ -81.4      7826.2@ -21.4         0.0@   0.0     13555.3@ -51.4     13555.3@ 128.6      0.0@   0.0
                                                    THEVENIN IMPEDANCE (OHM)
            2.23761+j 14.628   2.19953+j 14.557   3.65446+j22.3311

                 SHORT CIRCUIT MVA= 9391.4         X/R RATIO= 6.58019     R0/X1= 0.24983    X0/X1= 1.5266
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
BUS -16840 TCL-$1 $EDO-   400.KV  AREA   1  ZONE   2   TIER   0       (PREFAULT V=1.000@   0.0 PU)
                                  + SEQ              - SEQ              0 SEQ              A PHASE            B PHASE            C PHASE
VOLTAGE (KV, L-G)          >    115.219@   0.0   115.219@-120.0     0.000@   0.0   115.219@ -60.0   115.219@ -60.0   230.437@
120.0
BRANCH CURRENT (A) TO      >
 16840 TCL-CS3       400.  1L      48.6@ -90.2      47.4@ -30.1       0.0@   0.0      83.1@ -60.6      83.1@ 120.3       1.2@
26.1
 22000 EDO-400       400.  1L    7874.2@  98.6    7873.0@ 158.6       0.0@   0.0   13637.3@ 128.6   13637.6@ -51.4       1.2@-
153.9

CURRENT TO FAULT (A)       >     7826.2@ -81.4    7826.2@ -21.4       0.0@   0.0   13555.3@ -51.4   13555.3@ 128.6       0.0@
0.0
THEVENIN IMPEDANCE (OHM)   >    14.7982@  81.3   14.7222@  81.4   22.6282@  80.7
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
MONITORED BRANCH:  22000 EDO-400        400.KV -> -16840 TCL-$1 $EDO-   400.KV  1L

                                  + SEQ              - SEQ              0 SEQ              A PHASE            B PHASE            C PHASE
RELAY CURRENT (A)                7874.7@ -81.4    7873.4@ -21.4       0.0@   0.0   13638.1@ -51.4   13638.4@ 128.6       1.2@
26.1

BUS VOLTAGES (KV, L-G)
 22000 EDO-400        400.kV    120.837@   0.2   109.603@-120.2     0.000@   0.0   114.968@ -55.1   116.291@ -64.7   230.438@
120.0
-16840 TCL-$1 $EDO-   400.kV    115.219@   0.0   115.219@-120.0     0.000@   0.0   115.219@ -60.0   115.219@ -60.0   230.437@
120.0
            3Io=       0.0@-161.4 A      Va/Ia=        8.43@  -3.7 Ohm      (Va-Vb)/(Ia-Ib)=       0.715@  85.4 Ohm
            (Zo-Z1)/3Z1 = 0.7959 @-15.0
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
```

ANEXO D. Simulaciones de Fallas en Nodo TCL

```
Summary of fault being displayed:
Prefault voltage: Flat Bus V=1 p.u.
Generator impedance: Subtransient
MOV iteration:                  [Off]

================================================================================================================================================
  1. Interm. Fault on:   16200 TCL-400 400.kV - 16840 TCL-CS3 400.kV 1L 1LG 1.00% Type=A
                                                    FAULT CURRENT (A @ DEG)
                  + SEQ              - SEQ              0 SEQ              A PHASE            B PHASE            C PHASE
               6250.1@ -80.7      6250.1@ -80.7      6250.1@ -80.7     18750.3@ -80.7         0.0@   0.0         0.0@   0.0
                                                    THEVENIN IMPEDANCE (OHM)
            1.77337+j10.1838   1.76218+j10.1735   2.44474+j 16.105

                  SHORT CIRCUIT MVA= 12990.6        X/R RATIO= 6.09701     R0/X1= 0.24006    X0/X1= 1.58143
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
BUS -16200 TCL-$1 $TCL-   400.KV  AREA   1  ZONE   2   TIER   0       (PREFAULT V=1.000@   0.0 PU)
                                + SEQ              - SEQ              0 SEQ            A PHASE           B PHASE           C PHASE
VOLTAGE (KV, L-G)          >    166.334@   0.2    64.532@ 179.5   101.811@-179.3     0.000@   0.0   252.997@-127.1   250.167@ 127.6
BRANCH CURRENT (A) TO      >
 16200 TCL-400       400.  1L    6250.2@  99.3    6250.2@  99.3    6250.3@  99.3   18750.7@  99.3       0.1@  91.2       0.1@  94.5
 16840 TCL-CS3       400.  1L       0.1@ -90.6       0.1@ -90.5       0.2@ -89.3       0.5@ -90.0       0.1@ -88.8       0.1@ -85.5

CURRENT TO FAULT (A)       >     6250.1@ -80.7    6250.1@ -80.7    6250.1@ -80.7   18750.3@ -80.7       0.0@   0.0       0.0@   0.0
THEVENIN IMPEDANCE (OHM)   >    10.3371@  80.1    10.325@  80.2   16.2895@  81.4
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
MONITORED BRANCH:  16200 TCL-400        400.KV -> -16200 TCL-$1 $TCL-   400.KV  1L

                                  + SEQ              - SEQ              0 SEQ            A PHASE           B PHASE           C PHASE
RELAY CURRENT (A)                6250.2@ -80.7    6250.2@ -80.7    6250.3@ -80.7   18750.7@ -80.7       0.1@ -88.8       0.1@ -85.5

BUS VOLTAGES (KV, L-G)
 16200 TCL-400        400.kV    164.881@   0.1    65.983@ 179.7   103.266@-179.2     4.416@-170.7   252.997@-127.1   250.167@ 127.6
-16200 TCL-$1 $TCL-   400.kV    166.334@   0.2    64.532@ 179.5   101.811@-179.3     0.000@   0.0   252.997@-127.1   250.167@ 127.6
            3Io=   18750.9@ -80.7 A      Va/Ia=       0.236@ -90.0 Ohm      (Va-Vb)/(Ia-Ib)=        13.3@ 134.3 Ohm
            (Zo-Z1)/3Z1 = 0.0000 @  0.0
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



Summary of fault being displayed:
Prefault voltage: Flat Bus V=1 p.u.
Generator impedance: Subtransient
MOV iteration:                  [Off]

================================================================================================================================================
  1. Interm. Fault on:   16200 TCL-400 400.kV - 16840 TCL-CS3 400.kV 1L 2LG 1.00% Type=B-C
                                                    FAULT CURRENT (A @ DEG)
                  + SEQ              - SEQ              0 SEQ              A PHASE            B PHASE            C PHASE
              13864.6@ -80.3      8486.3@ 100.1      5379.0@  99.0         0.0@   0.0     20852.3@ 167.1     21088.2@  32.4
                                                    THEVENIN IMPEDANCE (OHM)
            1.77337+j10.1838   1.76218+j10.1735   2.44474+j 16.105

                  SHORT CIRCUIT MVA= 14610.3        X/R RATIO= 5.86077     R0/X1= 0.24006    X0/X1= 1.58143
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
BUS -16200 TCL-$1 $TCL-   400.KV  AREA   1  ZONE   2   TIER   0       (PREFAULT V=1.000@   0.0 PU)
                                + SEQ              - SEQ              0 SEQ            A PHASE           B PHASE           C PHASE
VOLTAGE (KV, L-G)          >     87.621@   0.3    87.621@   0.3    87.621@   0.3   262.863@   0.3     0.000@   0.0     0.000@   0.0
BRANCH CURRENT (A) TO      >
 16200 TCL-400       400.  1L   13864.8@  99.7    8486.5@ -79.9    5379.2@ -81.0       0.1@ -87.3   20852.7@ -12.9   21088.7@-147.6
 16840 TCL-CS3       400.  1L       0.3@ -90.2       0.2@  90.3       0.2@  90.3       0.1@  92.7       0.5@ 150.0       0.5@  30.0

CURRENT TO FAULT (A)       >    13864.6@ -80.3    8486.3@ 100.1    5379.0@  99.0       0.0@   0.0   20852.3@ 167.1   21088.2@  32.4
THEVENIN IMPEDANCE (OHM)   >    10.3371@  80.1    10.325@  80.2   16.2895@  81.4
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
MONITORED BRANCH:  16200 TCL-400        400.KV -> -16200 TCL-$1 $TCL-   400.KV  1L

                                  + SEQ              - SEQ              0 SEQ            A PHASE           B PHASE           C PHASE
RELAY CURRENT (A)               13864.8@ -80.3    8486.5@ 100.1    5379.2@  99.0       0.1@  92.7   20852.7@ 167.1   21088.7@  32.4

BUS VOLTAGES (KV, L-G)
 16200 TCL-400        400.kV     84.401@  -0.0    89.591@   0.5    88.874@   0.4   262.863@   0.3     4.911@  77.1     4.967@ -57.6
-16200 TCL-$1 $TCL-   400.kV     87.621@   0.3    87.621@   0.3    87.621@   0.3   262.863@   0.3     0.000@   0.0     0.000@   0.0
            3Io=   16137.5@  99.0 A      Va/Ia=   4.25e+006@ -92.4 Ohm      (Va-Vb)/(Ia-Ib)=        12.6@  12.2 Ohm
            (Zo-Z1)/3Z1 = 0.0000 @  0.0
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
```

```
Summary of fault being displayed:
Prefault voltage: Flat Bus V=1 p.u.
Generator impedance: Subtransient
MOV iteration:                 [Off]

=============================================================================================================================================
  1. Interm. Fault on:   16200 TCL-400 400.kV - 16840 TCL-CS3 400.kV 1L 3LG 1.00%
                                                    FAULT CURRENT (A @ DEG)
                + SEQ             - SEQ             0 SEQ             A PHASE           B PHASE           C PHASE
             22340.7@ -80.1        0.0@   0.0        0.0@   0.0     22340.7@ -80.1     22340.7@ 159.9     22340.7@  39.9
                                                    THEVENIN IMPEDANCE (OHM)
          1.77337+j10.1838   1.76218+j10.1735   2.44474+j 16.105

               SHORT CIRCUIT MVA= 15478.1        X/R RATIO= 5.74257     R0/X1= 0.24006    X0/X1= 1.58143
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
BUS -16200 TCL-$1 $TCL-   400.KV  AREA   1  ZONE   2   TIER   0       (PREFAULT V=1.000@   0.0 PU)
                              + SEQ             - SEQ             0 SEQ             A PHASE           B PHASE           C PHASE
VOLTAGE (KV, L-G)          >      0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0
BRANCH CURRENT (A) TO      >
 16200 TCL-400       400.  1L   22341.2@  99.9       0.0@   0.0       0.0@   0.0    22341.2@  99.9   22341.2@ -20.1   22341.2@-140.1
 16840 TCL-CS3       400.  1L       0.5@ -90.0       0.0@   0.0       0.0@   0.0       0.5@ -90.0       0.5@ 150.0       0.5@  30.0

CURRENT TO FAULT (A)       >    22340.7@ -80.1       0.0@   0.0       0.0@   0.0    22340.7@ -80.1   22340.7@ 159.9   22340.7@  39.9
THEVENIN IMPEDANCE (OHM)   >    10.3371@  80.1    10.325@  80.2   16.2895@  81.4
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
MONITORED BRANCH:  16200 TCL-400        400.KV -> -16200 TCL-$1 $TCL-   400.KV  1L

                                 + SEQ             - SEQ             0 SEQ             A PHASE           B PHASE           C PHASE
RELAY CURRENT (A)              22341.2@ -80.1       0.0@   0.0       0.0@   0.0    22341.2@ -80.1   22341.2@ 159.9   22341.2@  39.9

BUS VOLTAGES (KV, L-G)
 16200 TCL-400        400.kV      5.262@-170.1     0.000@   0.0     0.000@   0.0     5.262@-170.1     5.262@  69.9     5.262@ -50.1
-16200 TCL-$1 $TCL-   400.kV      0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0     0.000@   0.0
            3Io=       0.0@   0.0 A      Va/Ia=       0.236@ -90.0 Ohm      (Va-Vb)/(Ia-Ib)=       0.236@ -90.0 Ohm
            (Zo-Z1)/3Z1 = 0.0000 @  0.0
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



Summary of fault being displayed:
Prefault voltage: Flat Bus V=1 p.u.
Generator impedance: Subtransient
MOV iteration:                 [Off]

=============================================================================================================================================
  1. Interm. Fault on:   16200 TCL-400 400.kV - 16840 TCL-CS3 400.kV 1L LL 1.00% Type=A-B
                                                    FAULT CURRENT (A @ DEG)
                + SEQ             - SEQ             0 SEQ             A PHASE           B PHASE           C PHASE
             11176.9@ -80.1     11176.9@ -20.1        0.0@   0.0     19358.9@ -50.1     19358.9@ 129.9       0.0@   0.0
                                                    THEVENIN IMPEDANCE (OHM)
          1.77337+j10.1838   1.76218+j10.1735   2.44474+j 16.105

               SHORT CIRCUIT MVA= 13412.3        X/R RATIO= 5.75783     R0/X1= 0.24006    X0/X1= 1.58143
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
BUS -16200 TCL-$1 $TCL-   400.KV  AREA   1  ZONE   2   TIER   0       (PREFAULT V=1.000@   0.0 PU)
                              + SEQ             - SEQ             0 SEQ             A PHASE           B PHASE           C PHASE
VOLTAGE (KV, L-G)          >    115.401@   0.0   115.401@-120.0     0.000@   0.0   115.401@ -60.0   115.401@ -60.0   230.803@ 120.0
BRANCH CURRENT (A) TO      >
 16200 TCL-400       400.  1L   11177.1@  99.9   11177.1@ 159.9       0.0@   0.0   19359.3@ 129.9   19359.3@ -50.1       0.0@   0.0
 16840 TCL-CS3       400.  1L       0.2@ -90.0       0.2@ -30.0       0.0@   0.0       0.4@ -60.2       0.4@ 120.2       0.0@   0.0

CURRENT TO FAULT (A)       >    11176.9@ -80.1   11176.9@ -20.1       0.0@   0.0   19358.9@ -50.1   19358.9@ 129.9       0.0@   0.0
THEVENIN IMPEDANCE (OHM)   >    10.3371@  80.1    10.325@  80.2   16.2895@  81.4
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
MONITORED BRANCH:  16200 TCL-400        400.KV -> -16200 TCL-$1 $TCL-   400.KV  1L

                                 + SEQ             - SEQ             0 SEQ             A PHASE           B PHASE           C PHASE
RELAY CURRENT (A)              11177.1@ -80.1   11177.1@ -20.1       0.0@   0.0   19359.3@ -50.1   19359.3@ 129.9       0.0@   0.0

BUS VOLTAGES (KV, L-G)
 16200 TCL-400        400.kV    112.809@  -0.2   117.996@-119.8     0.000@   0.0   116.266@ -62.2   114.711@ -57.7   230.803@ 120.0
-16200 TCL-$1 $TCL-   400.kV    115.401@   0.0   115.401@-120.0     0.000@   0.0   115.401@ -60.0   115.401@ -60.0   230.803@ 120.0
            3Io=       0.0@  22.7 A      Va/Ia=        6.01@ -12.0 Ohm      (Va-Vb)/(Ia-Ib)=       0.236@ -90.0 Ohm
            (Zo-Z1)/3Z1 = 0.0000 @  0.0
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
```

ANEXO F. Estadística de Fallas de Líneas Cerro de Oro - Tecali (2010 - 2016)

No.	Gerencia	Zona	Inst	Fecha	Evento	Equipo	Descripción
1	GRTC	ZTPUE	TCL	09/03/2016	D/C	LTA EDO-A3U20-TCL	EL DIA 09 DE MARZO DE 2016 A LAS 19:32:41 HRS SE PRESENTA FALLA EN LINEA TECALI A3U20 CERRO DE ORO EN FASE C-TIERRA OPERANDO LA PROTECION 85L (SEL 421) Y PROTECCION 21/21G (7SA513 SIEMENS) EN ZONA 1, LOCALIZADA A 30.76 KM, CORRIENTE DE FALLA DE 6,493 AMP. OPERA 79 DRM EXITOSAMENTE. NO HAY AFECTACION DE CARGA.
2	GRTC	ZTPUE	TCL	10/03/2016	D/C	LTA EDO-A3U20-TCL	EL DÍA 10 DE MARZO DE 2016 A LAS 11:13:22 HRS SE PRESENTA FALLA EN L.T. TCL-A3U20-EDO EN LA FASE C-TIERRA, OPERA LA PROTECCIÓN 85L (SEL421) Y LA PROTECCIÓN 21/21N (7SA513) EN ZONA 1, LOCALIZADA A 30.82KM, CORRIENTE DE FALLA 6,670 AMP, OPERA 79 DRM EXITOSO, A LAS 11:13:23 HRS CIERRA TCL-A3U20-EDO
3	GRTC	ZTPUE	TCL	10/03/2016	D	LTA EDO-A3U20-TCL	EL DÍA 10 DE MARZO DE 2016 A LAS 11:13:34 HRS SE PRESENTA FALLA EN L.T. TCL-A3U20-EDO EN LA FASE C-TIERRA, OPERA LA PROTECCION 85L (SEL421) Y LA PROTECCION 21/21N (7SA513) EN ZONA 1, LOCALIZADA A 31.99 KM, CORRIENTE DE FALLA 6,655 AMP. QUEDA LA LINEA ABIERTA PARA SU PATRULLAJE.
4	GRTC	ZTPUE	TCL	27/07/2016	D	LTA EDO-A3U20-TCL	CON HORARIO 19:55:49 HRS SE DISPARA LA L.T. TCL A3U20 EDO, OPERA LA PROTECCIONES 85L PP1(SEL421) Y 21/21N PP2 (SIEMENS 7SA513), FASE B A TIERRA, ZONA 2 CON UNA CORRIENTE DE FALLA DE 1,871 AMP. EN S.E. TECALI. LOCALIZACIÓN A 162.13 KM. CON HORARIO DE 19:57:29 HRS CIERRA L.T. TCL A3U20 EDO. NO HAY AFECTACION DE CARGA.
5	GRTC	ZTPUE	TCL	11/08/2016	D/C	LTA EDO-A3U20-TCL	EL DÍA 11 DE AGOSTO DE 2016 A LAS 21:35:52 HRS SE PRESENTA FALLA EN LINEA DE TRANSMISIÓN DE 400 KV TECALI A3U20 CERRO DE ORO, OPERA PP1 85L (SEL421), FASE B-TIERRA, LOCALIZADA A 156.27 KM, I FALLA DE 2,254 AMP. OPERA PP2 (21/21N SIEMENS 7SA513) ZONA 1, FASE B-TIERRA, OPERA 79 DRM EXITOSO. NO HAY AFECTACIÓN DE CARGA.
6	GRTC	ZTPUE	TCL	11/08/2016	D/C	LTA EDO-A3U30-TCL	EL DÍA 11 DE AGOSTO DE 2016 A LAS 21:35:53 HRS SE PRESENTA FALLA EN LINEA DE TRANSMISIÓN DE 400 KV TECALI A3U30 CERRO DE ORO, OPERA PP1 85L (SEL421), FASE B-TIERRA, LOCALIZADA A 153.10 KM, I FALLA DE 2,319 AMP. OPERA PP2 (21/21N SIEMENS 7SA513) ZONA 1, FASE B-TIERRA, OPERA 79 DRM EXITOSO. NO HAY AFECTACIÓN DE CARGA.
7	GRTC	ZTPUE	TCL	18/05/2015	D/C	LTA EDO-A3U30-TCL	EL DIA 18 DE MAYO DE 2015 A LAS 18:15 :21 DISPARA LA LINEA DE TRANSMISION TECALI A3U30 EDO OPERANDO LA PP1 85L SEL 421 FASE "B" A TIERRA I DE FALLA 2785 AMP DISTANCIA 103.08 KM OPERA LA PP2 21/21N 7SA513 SIEMENS FASE "B" A TIERRA ZONA 1 103.08 OPERA DRM EXITOSAMENTE CON HORARIO DE 18:15:22.
8	GRTC	ZTPUE	TCL	06/07/2015	D/C	LTA EDO-A3U30-TCL	EL DIA 06 DE JULIO DE 2015 A LAS 15:26:16 DISPARA LA LINEA DE TRANSMISION TECALI A3U30 EDO OPERANDO LA PP1 85L SEL 421 FASE "B" A TIERRA I DE FALLA 1436 AMP DISTANCIA 194.43KM OPERA LA PP2 21/21N 7SA513 SIEMENS FASE "B" A TIERRA ZONA 2 CON ACELERACION DE ZONA; OPERA DRM EXITOSAMENTE CON HORARIO DE 15:26:51
9	GRTC	ZTPUE	TCL	06/09/2015	D/C	LTA EDO-A3U30-TCL	EL DIA 6 DE SEPTIEMBRE A LAS 04:09 DISPARA LA L.T. TCL-A3U30-EDO OPERANDO LA PROTECCIóN 85L (SEL 421) Y 21/21N (SIEMENS 7SA513), CON ACELERACIóN DE ZONA EN FASE C A TIERRA, CON UNA CORRIENTE DE FALLA DE 1684 AMPERES. LOCALIZACIóN DE 208 KMS. TX Y RX POTT, OPERA RECIERRE MOPOLAR 79M (SEL 279) EXITOSAMENTE RESTABLECIENDO LA LINEA.
10	GRTC	ZTPUE	TCL	06/09/2015	D/C	LTA EDO-A3U20-TCL	EL DIA 6 DE SEPTIEMBRE A LAS 04:09 DISPARA LA L.T. TCL-A3U20-EDO OPERANDO LA PROTECCIóN 85L (SEL 421) Y 21/21N (SIEMENS 7SA513), CON ACELERACIóN DE ZONA EN FASE C A TIERRA, CON UNA CORRIENTE DE FALLA DE 1784 AMPERES. LOCALIZACIóN DE 203 KMS. TX Y RX POTT, OPERA RECIERRE MOPOLAR 79M (SEL 279) EXITOSAMENTE RESTABLECIENDO LA LINEA.

11	GRTC	ZTPUE	TCL	07/09/2015	D/C	LTA EDO-A3U30-TCL	EL DIA 7 DE SEPTIEMBRE A LAS 21:55 DISPARA LA L.T. TCL-A3U30-EDO OPERANDO LA PROTECCIóN 85L (SEL 421) Y 21/21N (SIEMENS 7SA513), CON ACELERACIóN DE ZONA EN FASE C A TIERRA, CON UNA CORRIENTE DE FALLA DE 2639 AMPERES. LOCALIZACIóN DE 109.34 KMS. TX Y RX POTT, OPERA RECIERRE MOPOLAR 79M (SEL 279) EXITOSAMENTE RESTABLECIENDO LA LINEA.
12	GRTC	ZTPUE	TCL	11/04/2014	D	LTA EDO-A3U30-TCL	EL DIA 11 DE ABRIL DE 2014 A LAS 15:14 HRS DISPARA LA L.T. TCL A3U30-EDO OPERANDO LA PP1 85L (SEL421) EN ZONA 1 FASE "B" A TIERRA A UNA DISTANCIA DE 46.70 Y UNA CORRIENTE DE FALLA DE 4195 AMP OPERA LA PP2 (SIEMENS 7SA513) , OPERA EL DRM CERRANDO Y VOLVIENDO A DISPARAR
13	GRTC	ZTPUE	TCL	11/04/2014	C/D	LTA EDO-A3U30-TCL	EL DIA 11 DE ABRIL DE 2014 A LAS 15:14 HRS CIERRA DISPARA LA L.T. TCL A3U30-EDO OPERANDO LA PP1 85L (SEL421) EN ZONA 1 FASE "B" A TIERRA A UNA DISTANCIA DE 43.92 Y UNA CORRIENTE DE FALLA DE 4974 AMP OPERA TAMBIEN LA PP2 (SIEMENS 7SA513)CERRANDO POR EL OPERADOR A LAS 15:15:54
14	GRTC	ZTPUE	TCL	02/09/2013	D/C	LTA EDO-A3U20-TCL	EL DIA 02 DE SEPTIEMBRE DE 2013 A LAS 18:27 HRS SE PRESENTA FALLA EN L.T. TCL-A3U20-EDO OPERA PP1 85L (SEL-421) FASE "A" A TIERRA, LOCALIZACION 154.7 KM, IFALLA DE 1748 A. OPERA 79 (DRM) EXITOSO, NO HAY AFECTACION DE CARGA. LA FALLA SE ENCUENTRA EN EL AREA DE ATENCION DE LA GRTO.
15	GRTC	ZTPUE	TCL	02/09/2013	D/C	LTA EDO-A3U30-TCL	EL DIA 02 DE SEPTIEMBRE DE 2013 A LAS 18:27 HRS SE PRESENTA FALLA EN L.T. TCL-A3U30-EDO OPERA PP1 85L (SEL-421) FASE "A" A TIERRA, LOCALIZACION 156.4 KM, IFALLA DE 1820 A. OPERA 79 (DRM) EXITOSO, NO HAY AFECTACION DE CARGA. LA FALLA SE ENCUENTRA EN EL AREA DE ATENCION DE LA GRTO.
16	GRTC	ZTPUE	TCL	03/06/2012	D/C	LTA EDO-A3U30-TCL	EL DÍA 03 DE JUNIO A LAS 01:14 HRS EN LA S.E. TECALI, SE PRESENTA DISPARO/RECIERRE MONOPOLAR DE LA LÍNEA TCL-A3U30-EDO, OPERAN LOS ESQUEMAS PP1-85L (SEL-421,FASE A-G, IFALLA 1,702 AMP, LOC. FALLA 175.42 KM, PP2 21/21N (7SA513)FASE A-G,ZONA-1,I FALLA 1830 AMP Y RELEVADOR DE RECIERRE (SEL 279).QUEDANDO LA LINEA DENTRO
17	GRTC	ZTPUE	TCL	27/04/2011	D	LTA EDO-A3U30-TCL	A LAS 18:56 HRS DISPARA CORRECTAMENTE LA L.T. TCL- A3U30-EDO OPERA SEL 421 (85L) FASE C A TIERRA SIEMENS 7SA513 (21/21N) FASE C A TIERRA ZONA 1 CON UNA IF 5016 AMP. A UNA DISTANCIA DE 51.96 KM EL INT CIERRA A LAS 18:57
18	GRTC	ZTPUE	TCL	14/08/2011	D/C	LTA EDO-A3U30-TCL	16:49 D INT. A3U30 DE L.T. TCL - EDO, 16:50 C INT. A3U30 DE L.T. TCL-EDO. OPERA PP1-85L(SEL-421), FASE A A TIERRA, OPERA PP2-21/21N (7SA513) FASE A A TIERRA. LA DISTANCIA DE FALLA ES A 107.13 KM Y CORRIENTE DE FALLA DE 2652 AMP.
19	GRTC	ZTPUE	TCL	29/07/2010	D	LTA EDO-A3U20-TCL	16:29 D A3U20, O SEL-421(85L), FASE A-N,DISTANCIA 153.25KM, IF=2298AMP. O 7SA513 (21N). 16:30 C A3U20
20	GRTC	ZTPUE	TCL	29/07/2010	D	LTA EDO-A3U30-TCL	16:29 D A3U30. O SEL-421(85L), FASE A-N,DISTANCIA 146.57KM, IF=2468AMP. O 7SA513 (21N). 16:30 C A3U30