

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

Ing. Daysi P. Landázuri M.

Ing. Martha Rumipamba Y.

Ing. Luis Ruales C.

*Facultad de Ingeniería Eléctrica Y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador*

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

Con la simulación del interruptor en la S/E El Inga incluido el Sistema Nacional Interconectado se determina valores de transitorios electromagnéticos producidos en la operación de apertura del interruptor, considerando fallas kilométricas tanto trifásicas como monofásicas y el corte de pequeñas corrientes capacitivas.

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

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

**Palabras Claves:** Interruptor de Potencia, Arco Eléctrico, ATP (Alternative Transient Program), TRV (Voltaje Transitorio de Recuperación), ecuaciones de Cassie y Mayr, modelo “Caja Negra”, Envoltorio de esfuerzos dieléctricos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Como parte del desarrollo del sistema eléctrico ecuatoriano, CELEC EP - Transelectric ha propuesto el Plan de Expansión 2010 - 2020 para el Sistema Nacional de Transmisión (SNT), en donde consta el sistema a nivel de 500 kV para el cual se debe considerar el diseño de líneas y subestaciones a este nivel de voltaje. El presente proyecto pretende sugerir el tipo de interruptor adecuado en base a estudios de transitorios electromagnéticos mediante un software, debido a que una modelación

dinámica del arco llevaría a tener una idea más cercana a la realidad.

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

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

## 2 INTERRUPTOR DE POTENCIA

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

### 2.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL INTERRUPTOR

#### 2.1.1 Proceso De Cierre

Esta operación se realiza para energizar alguna parte del sistema. Antes de ocurrir el cierre existe un voltaje entre los contactos del interruptor, a este voltaje se le denomina “voltaje de cierre”.

#### 2.1.2 Proceso de Apertura

Esta operación se realiza con el objetivo de desenergizar o interrumpir alguna parte del sistema. Estando cerrado el interruptor se libera el mecanismo de apertura el cual permite que los contactos principales se separen; la separación de los contactos genera el arco eléctrico

### 2.2 ARCO ELÉCTRICO

En el momento que los contactos del interruptor empiezan a separarse, empieza a fluir por el medio extintor una alta densidad de corriente como consecuencia de varios factores: la energía cinética de las moléculas que rodean la superficie de los contactos combinada con la energía del arco, hacen que estas pasen de un estado sólido a un estado líquido. La energía aportada por el incremento de temperatura y por las fuerzas atractivas intermoleculares (fuerzas de Van der Waals), hacen que del estado líquido pasen a estado gaseoso [1]. Este estado es conocido como estado de plasma.

## 2.3 TECNOLOGÍA APLICADA A LOS INTERRUPTORES

Por su capacidad, por su voltaje de operación se pueden clasificar de distintas maneras, pero como regla general se agrupan según la tecnología empleada para apagar el arco eléctrico que se forma entre los contactos cuando comienza la operación de apertura o termina la operación de cierre. La tabla 1.1 muestra el rango de voltaje, en el cuál se indica las técnicas de interrupción usadas actualmente.

Tabla 1.1 Relación entre el voltaje nominal y el tipo de interruptor [7].

Técnica de Interrupción	Voltaje (kV)								
	0	1	3	12	24	36	72.5	245	765
Aire									
Aceite									
Aire Comprimido									
SF6									
Vacio									

## 2.4 SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS DE FRENTE LENTO O POR MANIOBRA

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

## 2.5 VOLTAJE TRANSITORIO DE RECUPERACION (TRV)

El TRV es la diferencia entre los voltajes del lado de la fuente y la carga, que aparece entre los terminales del interruptor, después de la interrupción de corriente [2]. Tal como se muestra en la figura 1.1.

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

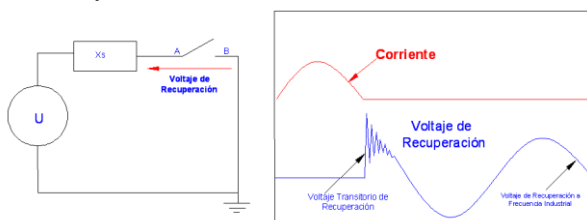


Figura 2.1 Voltaje Transitorio de Recuperación.

## 2.6 MANIOBRAS CON CARGAS INDUCTIVAS Y CAPACITIVAS

Este tipo de maniobras pueden originar sobrevoltajes de frente lento. Esto se debe fundamentalmente a que este tipo de sobrevoltajes producidos por la interrupción de corrientes inductivas y capacitivas están desfasadas alrededor de 90° del voltaje. Por lo tanto, al momento de interrumpir la corriente a su paso por cero, el voltaje estará en su valor máximo, lo cual ocasiona incrementos o transitorios en el voltaje que aparece a través de los contactos del interruptor luego de haber sido interrumpida la corriente.

## 2.7 FALLAS SIMÉTRICAS Y ASIMÉTRICAS

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

## 3. IMPLEMENTACIÓN MEDIANTE MODELS

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

## 3.1 MODELADO DEL INTERRUPTOR DE POTENCIA

El interruptor de potencia es uno de los elementos más complejos que existen en las redes eléctricas de potencia, el desarrollo de un modelo matemático detallado para simular y analizar la interacción entre interruptor y la red es muy difícil esto debido a que el arco eléctrico es el principal fenómeno que describe al interruptor.

Consiste de una serie de procesos físicos que incluyen leyes de conservación de energía, termodinámica y gases que ocurren durante la interrupción de la corriente. Por este motivo el punto de partida para modelar el interruptor es el modelado del arco eléctrico.

## 3.2 MODELO TIPO "CAJA NEGRA"

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

### 3.2.1 Modelo de Cassie

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

$$\frac{1}{g} \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left( \left( \frac{v}{V_0} \right)^2 - 1 \right) \quad (3.1)$$

### 3.2.2 Modelo de Mayr

La ecuación dinámica que representa el modelo de Mayr es:

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

### 3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE ARCO ELÉCTRICO

Las expresiones dinámicas, de Mayr o de Cassie, son fundamentales para la representación del interruptor mediante el modelo de caja negra. Esta técnica de simulación del arco eléctrico consiste en el uso de señales de entrada obtenidos a través del sistema para luego relacionarlos con la ecuación diferencial escogida Mayr, Cassie o la combinación de éstas. Debido a que los modelos dependen de la magnitud de corriente a ser interrumpida, este trabajo se enfoca en realizar la simulación de la combinación de las dos ecuaciones Ec.(3.1) y Ec.(3.2).

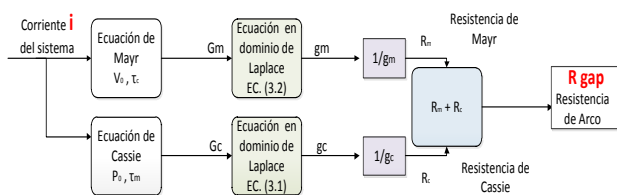


Figura 3.1 Diagrama de bloques para obtener el modelo de arco eléctrico

### 3.4 DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES DEL S.N.I.

**Sistema de Transmisión El Inga – Yaguachi.-** Este sistema de transmisión enlaza los principales centros de carga del país a nivel de 500 kV y está formada por una línea de transmisión que es la de mayor longitud a este nivel de voltaje.

Las características asociadas a estas líneas de transmisión del sistema de 500 kV se muestran a continuación.

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

Los estudios enfocados a la propuesta del tipo de interruptor para la implementación en líneas de transmisión a nivel de 500 kV se realizan en la subestación El Inga, tomando en consideración que al ser todavía un sistema en estudio, sus características podrían ser susceptibles a cambios. Además, en el caso de que se requiera datos del sistema que aún no estén definidos por

el área de planificación de CELEC EP – Transelectric, se asumirá valores típicos con criterio técnico o valores de otros sistemas de características similares y que se encuentren en funcionamiento. Se asumirá que el esquema de conexión de barras del patio de 500 kV será del tipo de Interruptor y Medio (1 ½ interruptores), debido a que es el esquema más usado en patios de subestaciones con este nivel de voltaje.

Tabla 2.3 Líneas de transmisión a 500 Kv [6]

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

La Figura 3.2 muestra el diagrama unifilar del patio de 500 kV de la subestación El Inga, considerando el esquema de disyuntor y medio

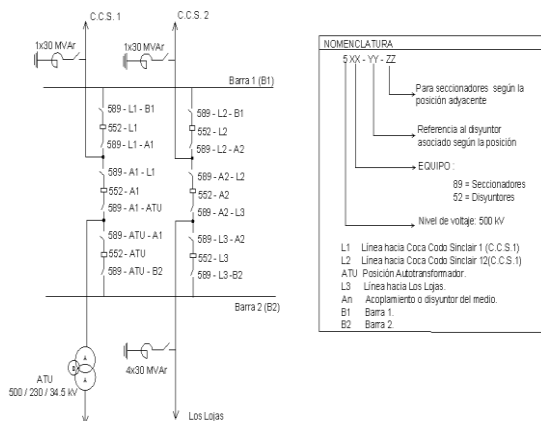


Figura 3.2 Diagrama unifilar de la Subestación El Inga

### 3.6 CARACTERÍSTICAS DE CONDUCTORES DE LAS L/T Y CONFIGURACIÓN DE LAS TORRES.

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

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

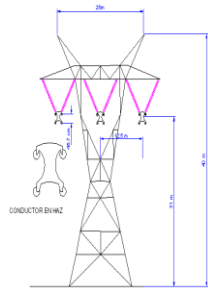


Figura 3.3 Estructura típica de 500 kV

#### 4. CASOS DE ESTUDIO DEL SISTEMA

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

Con la finalidad de validar la modelación del interruptor, se realiza la comparación de resultados obtenidos entre el interruptor ideal (herramienta para el diseño de circuitos eléctrica propia del programa ATPDraw) y el modelo de interruptor simulado en MODELS de ATP.

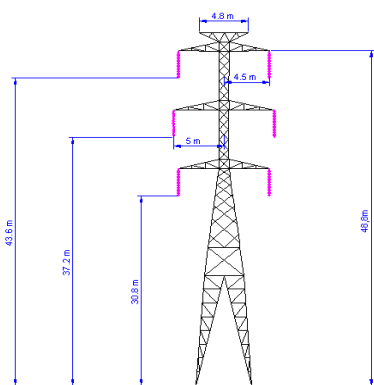


Figura 3.2. Estructura típica de 230 kV

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

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

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

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

Un resumen de los valores máximos de voltaje y corriente obtenidos en el caso del corte de corriente debida a una falla trifásica en terminales del interruptor en el lado de la S/E El Inga se muestra en la Tabla 4.1.

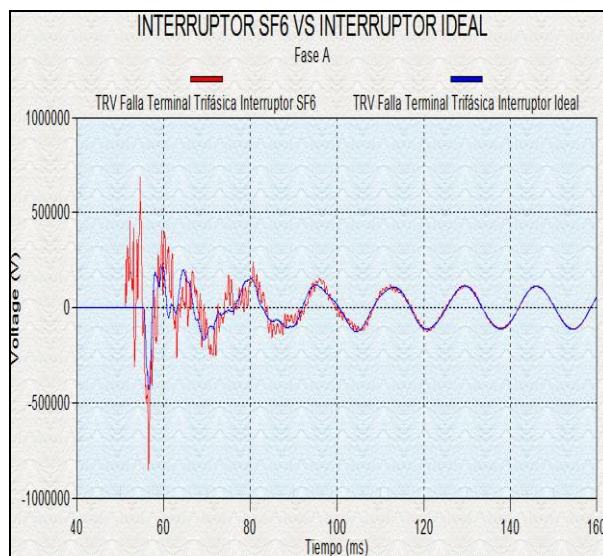


Figura 4.1 Voltajes Transitorios de Recuperación en la Falla Trifásica en Terminales del, Interruptor Ideal vs Interruptor en SF6.

Tabla 4.1 Resultados del corte de corriente en una falla trifásica en los terminales del interruptor en la S/E El Inga.

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

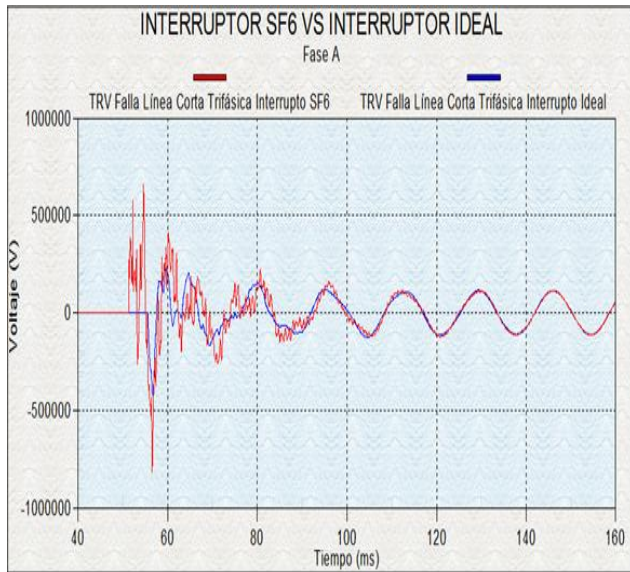
En la tabla 4.1 se presenta los resultados obtenidos del TRV y de la corriente, tanto en el interruptor ideal como en el interruptor en SF6. Siendo los valores del TRV en SF6 más elevados que los del interruptor ideal en los tres polos del interruptor, estos valores presentan un incremento a razón promedio del 1.77 respecto al TRV del interruptor ideal.

#### 4.2 INTERRUPCIÓN EN CONDICIÓN DE FALLA LEJOS DEL INTERRUPTOR (SHORT – LINE FAULT).

Para la simulación de la interrupción en condición de falla lejos del interruptor se considera fallas monofásicas y trifásicas aplicadas en tramos cortos de la

línea de transmisión a distancias entre 1 a 5 km del disyuntor [4].

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



**Figura 4.2** Voltajes Transitorios de Recuperación en la Falla Trifásica de Línea Corta, Interruptor Ideal vs Interruptor en SF6.

#### 4.2.1 Falla Trifásica

Un resumen de los valores máximos de voltaje y corriente obtenidos en el caso del corte de corriente debida a una falla trifásica aplicada en un corto tramo de la Línea El Inga – Yaguachi se muestra en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2** Resultados del corte de corriente en una falla trifásica aplicada en un corto tramo de la Línea El Inga – Yaguachi

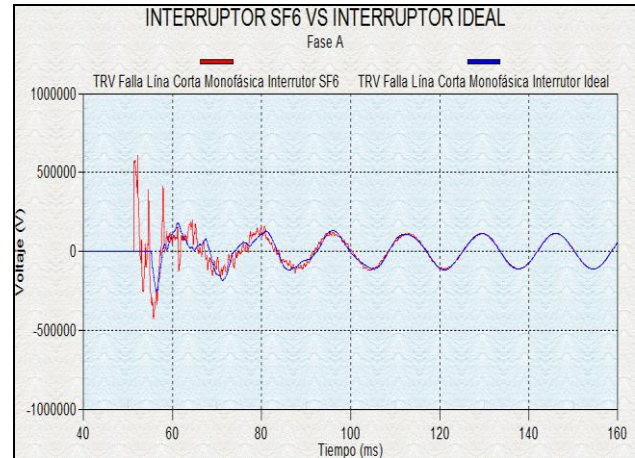
Tipo de Interruptor	TRV (kV)			CORRIENTES (kA)	
	Fase A	Fase B	Fase C	I Falla	I Interrupción
IDEAL	419,7	253,47	502,55	19,067	14,197
SF6	814,61	563,77	663,25	20,992	6,948

En la tabla 4.2 se presenta los resultados obtenidos del TRV y de la corriente tanto en el interruptor ideal como en el interruptor en SF6. Siendo los valores del TRV en SF6 más elevados que los del interruptor ideal en los tres polos del interruptor, estos valores presentan un incremento a razón promedio del 1.7 respecto al TRV del interruptor ideal.

#### 4.2.2 Falla Monofásica

Un resumen de los valores máximos de voltaje y corriente obtenidos en el caso del corte de corriente debida a una falla Monofásica aplicada en un corto tramo de la Línea El Inga – Yaguachi se muestra en la Tabla 4.3.

En la tabla 4.3 se presenta los resultados obtenidos del TRV y de la corriente tanto en el interruptor ideal como en el interruptor en SF6. Siendo los valores del TRV en SF6 más elevados que los del interruptor ideal en los tres polos del interruptor, estos valores presentan un incremento a razón promedio del 1.7 respecto al TRV del interruptor ideal.



**Figura 4.3** Voltajes Transitorios de Recuperación Corriente en la Falla monofásica en Línea Corta, Interruptor Ideal vs Interruptor en SF6

**Tabla 4.3** Resultados del corte de corriente en una falla Monofásica aplicada en un corto tramo de la Línea El Inga – Yaguachi.

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

### 4.3 INTERRUPTIÓN DE CORRIENTES CAPACITIVAS

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

Un resumen de los valores máximos de voltaje y corriente obtenidos en el caso del corte de corriente capacitiva aplicada en Línea El Inga – Yaguachi en vacío se muestra en la Tabla 4.4.

En la tabla 4.4 se presenta los resultados obtenidos del TRV y de la corriente tanto en el interruptor ideal como en el interruptor en SF6. Siendo los valores del TRV y de la corriente en SF6 más elevados que los del interruptor ideal en los tres polos del interruptor, estos valores presentan un incremento a razón promedio del 1.15 y del 4.19 al TRV y corriente respectivamente del interruptor ideal.

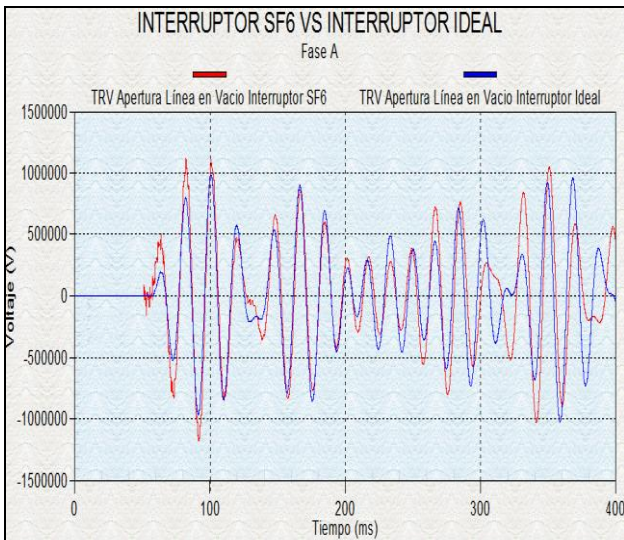


Figura 4.4 Voltajes Transitorios de Recuperación en apertura de la Línea en Vacío, Interruptor Ideal vs Interruptor en SF6.

Tabla 4.4. Resultados del corte de corriente en una interrupción de corrientes capacitivas aplicada en la Línea El Inga – Yaguachi en vacío.

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

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 REPRESENTACIÓN DEL TRV EN NORMAS

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

#### a) Trazo de referencia a Cuatro Parámetros

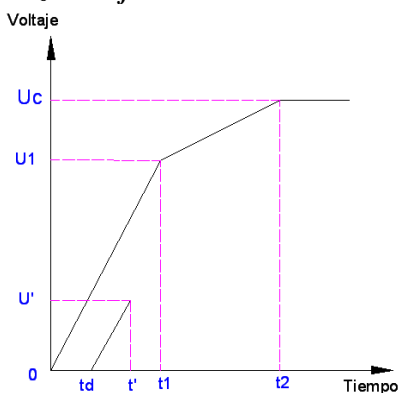


Figura 5.1 Representación del TRV de cuatro parámetros [5].

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

$$k_{pp} * \sqrt{\frac{2}{3}} * U_r \quad (5.1)$$

donde :

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

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

$$RRRV = u_1 / t_1 \quad (5.2)$$

#### b) Trazo de referencia a Dos Parámetros

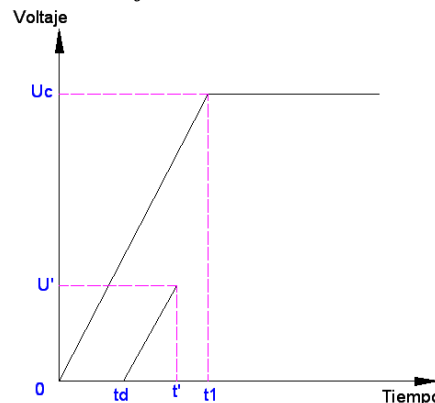


Figura 5.2 Representación del TRV de dos parámetros [5].

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

Los valores nominales del TRV para interruptores tripolares con voltaje inferior a los 100 kV, corresponde a la representación de dos parámetros. Los valores se encuentran especificados en las Norma IEC 62271-100. Para valores por encima de los 100 kV, son de cuatro parámetros. Los valores se encuentran indicados en la tabla 5.1, tomados de la norma antes referida.

Tabla 5.1 Valores estándar del TRV, para valores superiores a 245 kV [[5].

Volt. Nom. $U_r$ kV	Prueba Oblig.	$k_{pp}$ p.u.	$k_{af}$ p.u.	Primer volt. de ref. $U_1$ kV	Valor Pico del TRV $U_c$ kV	RRRV $U_1/t_1$ kV/ $\mu$ s
550	Falla en Terminal	1,3	1,4	438	817	2
	Falla de Línea Corta	1	1,4	337	629	2
	Fuera de Fase	2	1,25	674	1123	1,54

### 5.3 TRAZADO DE LA ENVOLVENTE DE ESFUERZOS DEBIDO A FALLA TRIFÁSICA APLICADA EN LOS TERMINALES DE LA LÍNEA EL INGA – YAGUACHI.

Con la envolvente de esfuerzos encontrada se determina la representación del TRV, que en este caso es

de cuatro parámetros. En base a estos resultados la tasa de crecimiento es:

$$RRRV = 0.104 \frac{kV}{\mu s}$$

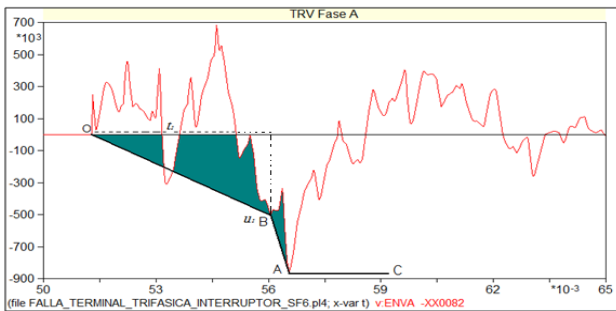


Figura 5.3 Envolvente de esfuerzos en la Fase A en Falla Trifásica en Terminales del interruptor

Tabla 5.2 Comparación de resultados con valores estándar

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

En la tabla 5.2, se presenta un resumen de los resultados obtenidos comparados con el valor estándar de la norma según la cual, la tasa de crecimiento (Rate of Rise) en los interruptores no debe sobrepasar el valor indicado, que para este caso es 2.

#### 5.4 TRAZADO DE LA ENVOLVENTE DE ESFUERZOS DEBIDO A LA FALLA MONOFÁSICA APLICADA EN UN CORTO TRAMO DE LA LÍNEA EL INGA – YAGUACHI

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

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

En la tabla 5.3, se presenta un resumen de los resultados obtenidos versus el valor estándar de la norma, según la norma la tasa de crecimiento en los interruptores no debe sobrepasar el valor dado que para este caso es 2.

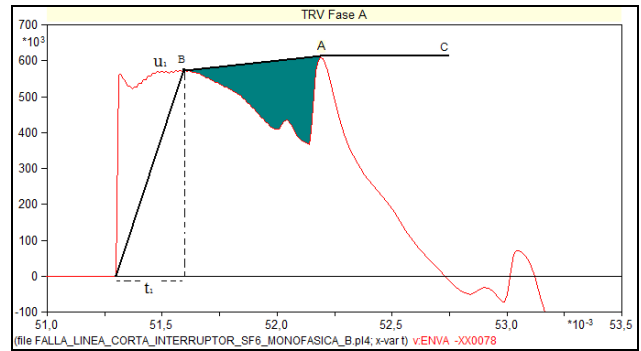


Figura 5.4 Envolvente de esfuerzos en la Fase A, debido a Falla Monofásica en un corto tramo de la Línea

Tabla 5.3 Comparación de resultados con valores estándar

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

## 6. CONCLUSIONES

- La modelación del interruptor de potencia consiste en el modelado de caja negra que al considerar al arco eléctrico como un bipolo, la simulación del interruptor se realiza a partir de la señal de corriente de excitación del sistema, que a través soluciones de las ecuaciones de Mayr y Cassie consideradas, se obtiene una respuesta que es, la resistencia del arco eléctrico en función del tiempo, éste modelo al ser comparada con el interruptor ideal presenta las mismas tendencias en las formas de onda del TRV, mostrando detalles más pronunciados.
- En los casos simulados el TRV más elevado se tiene en la interrupción de la línea El Inga – Yaguachi en vacío, con un valor pico de 1164,2 kV en bornes del interruptor y con una corriente de interrupción de 1275,5 A.
- Los TRVs obtenidos en la simulación de fallas trifásicas o fallas simétricas, aplicadas en terminales del interruptor y en un corto tramo de la línea no presentan mayor incremento, sin embargo son las que limitan la capacidad de interrupción del disyuntor. Los valores obtenidos son de 851,68 y 814,61 kV respectivamente.

- Con los resultados obtenidos se realizó el cálculo y la comparación de la RRRV, con las especificadas en la Norma IEC 62271-100. Siendo estos valores los que determinan la envoltura de esfuerzos dieléctricos del interruptor, entre los valores obtenidos se tiene RRRVs que van desde 0,104 a 1,202 kV/  $\mu$ s los cuales se ajustan a los valores de la Norma que especifica un valor límite de 2 kV/  $\mu$ s.

### REFERENCIAS

- [1] LOU VAN der Sluis, Transients in Power Systems. John Wiley & Sons, Ltd. The Netherlands. 2001.
- [2] DUFOURNET D. Alexander R., IEEE Tutorial on TRVs  
www.ewh.ieee.org/soc/pes/switchgear/TRVTutorial (2005).
- [3] SAILEMA K., PROAÑO X., “Análisis de sobrevoltajes a frecuencia industrial y por maniobra en líneas de transmisión a nivel de 500 kV”, Tesis. EPN, Facultad de Ingeniería Eléctrica – 2010.
- [4] FURNAS/UFF, Grupo Cigré. Equipamentos Eléctricos – Especificação e Aplicação em Subestações de Corrente Alternada, 1985.
- [5] NORMA IEC 62271-100 (High-voltage switchgear and controlgear - Part 100; high voltage alternating-current circuit breakers).
- [6] TRANSELECTRIC S.A., Plan de Expansión de Transmisión 2009-2020. Ecuador, Octubre 2009.
- [7] GIMÉNEZ Walter F., La simulación del arco eléctrico, Ediciones UNL. 2003.

### BIOGRAFÍAS

#### Daysi Paola Landázuri Moreno



Nació en Quito, el 12 junio de 1984. Sus estudios secundarios los realizó en la Unidad Educativa Experimental “Manuela Cañizares”. Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

#### Martha Rumipamba Yungán



Nació en Riobamba, el 10 diciembre. Sus estudios secundarios los realizó en el Colegio Técnico Humanístico Experimental “Quito”. Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

#### Luis Ruales Corrales

Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, 1978; Egresado del PSEC de GE, Schenectady, NY. Profesor principal a tiempo parcial de la EPN. Jefe de Sistemas de Potencia y Protecciones de la División de Ingeniería Eléctrica del INECEL hasta 1999; responsable del Área de Planificación y Estudios de Transelectric hasta el 2005; Vicepresidente Técnico de Transelectric, mayo 2005 – febrero 2010 y desde el mes de marzo del presente año ejerce las funciones de Gerente de Construcciones en CELEC EP – Transelectric.