

Estudio de inducción y descargas inversas en líneas de transmisión multicircuito. Caso: L/T Esmeraldas - Santo Domingo 230 y 69 kV.

Ing. Luis E. Caraguay Ramirez

Ing. Luis E. Ruales Corrales

Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador

Abstract.- The propose of multicircuit transmission line Esmeraldas - Santo Domingo 230 and 69 kV is to optimize the existing right of way subtransmission line of 69 kV to locate several circuits at different voltage levels in a single structure known transmission lines multicircuit. With the help of the electromagnetic transients program, EMTP/ATP are simulated the electromagnetic induction and backflashover phenomena in two different scenarios. In a first scenario analyzes the electromagnetic induction phenomenon and shows the maximum induced voltages in different cases, placing emphasis when the 69 kV circuit is deenergized and 230 kV circuits energized. In the second scenario the phenomenon of backflashover is analyzed, transient effect produced by a lightning stroke, direct lightning stroke on the cable guard or transmission tower with different values of current and the backflashover phenomenon in the insulator strings of 230 and 69 kV is observed.

KEY WORDS: Backflashover, electromagnetic induction, lightning stroke, multicircuit transmission lines, EMTP/ATP.

I. INTRODUCCIÓN.

El fenómeno de inducción en líneas de transmisión no es de fácil interpretación, ya que se trata de la interacción de los campos electromagnéticos en el espacio, campos denominados: campo eléctrico y campo magnético; la buena comprensión y estructuración de estos conceptos es condición suficiente para obtener un claro conocimiento del fenómeno de inducción electromagnética.

Las descargas atmosféricas son una de las causas fundamentales de salida de servicio en los sistemas eléctricos de potencia, el impacto de rayos en los conductores de guarda puede ocasionar descargas inversas o flameo inverso a través de la cadena de aisladores en una línea de transmisión.

Conseguir nuevas rutas para las líneas de transmisión tiene un grado de dificultad lo cual ha llevado a optimizar los derechos de vía de las líneas de transmisión existentes para ubicar varios circuitos, inclusive a diferentes niveles de voltaje en una misma estructura, que se denominan

líneas de transmisión multicircuito.

II. FENÓMENO DE INDUCCIÓN Y FLAMEO INVERSO

A. Fenómeno de inducción en líneas de transmisión.

Inducción de campo eléctrico. En una línea de transmisión desenergizada paralela a una o más líneas de transmisión energizadas, los voltajes y corrientes se inducen en la línea desenergizada por un mecanismo conocido como inducción de campo eléctrico.

Para entender el fenómeno de inducción de campo eléctrico y los parámetros que afectan a voltajes y corrientes inducidas, se detalla el caso de dos conductores, figura 2.1. El conductor (a) está conectado a una fuente de voltaje y el conductor (b) está desenergizado. [1].

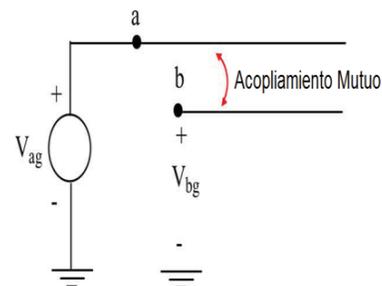


Figura 2.1

Dos conductores, inducción de campo eléctrico. [1]

La configuración de la figura 2.1 se representa por un circuito capacitivo como se observa en la figura 2.2, cuando dos conductores están separados por un medio dieléctrico, tales como el aire, se crea un condensador, también se crea una capacitancia entre cada conductor y tierra, así como una capacidad entre los dos conductores, es decir, la capacidad mutua.

Figura N° 2.2
Circuito acoplado capacitivo de 2 circuitos paralelos.[1]

Dónde:

Cab, Capacitancia mutua, en F/m.

Cag y Cbg Las capacitancias a tierra de los dos conductores, en F/m.

Vbg Voltaje inducido en el conductor (b), en V.

Vag Voltaje que alimenta al conductor (a), en V.

El voltaje inducido en el conductor (b), debido a un voltaje que es aplicado al conductor (a) se pueden encontrar por división de voltaje. [1]

$$V_{bg} = \left(\frac{C_{ab}}{C_{ab} + C_{bg}} \right) V_{ag} \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1), se puede observar que la distancia de las dos líneas paralelas no tiene ningún impacto en la magnitud del voltaje inducido.

Inducción de campo magnético. Las líneas de transmisión eléctrica que comparten la misma faja de servidumbre o torre con una línea de transmisión de otro tipo comparten un acoplamiento magnético entre ambas.

La corriente que fluye en el circuito energizado debido a las cargas o cortos circuitos, producirá un campo magnético que enlaza a los conductores del circuito desenergizado. El campo magnético creado por la línea energizada induce un voltaje a la línea desenergizada. Este fenómeno se llama fenómeno de inducción de campo magnético. [1].

La figura 2.3 muestra el caso de dos conductores que ayudará a comprender el fenómeno de inducción de campo magnético.

De la figura 2.3, la corriente que fluye en el conductor (a) produce un campo magnético que enlaza al conductor (a) y al conductor (b). Este campo magnético induce un voltaje que es longitudinal; es decir, distribuidos a lo largo de la longitud del conductor desenergizado.

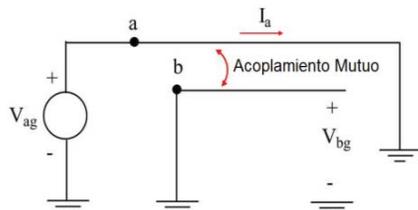


Figura N° 2.3
Inducción de campo magnético.[1]

Si el conductor está conectado a tierra, como se muestra en la figura 2.3, el voltaje se puede medir con respecto a tierra en cualquier lugar remoto desde ese

punto. La magnitud de voltaje fase-tierra (V_{bg}) (2.2) al final de la línea, está en función de la corriente que fluye en el conductor (a), la distancia entre las líneas y de la longitud que se encuentran en paralelo.

$$\vec{V}_{bg} = \vec{I}_a * \vec{Z}_{ab} \quad (2.2)$$

Donde:

Vbg Voltaje fase-tierra, en V/m.

Ia Corriente del conductor energizado, en A.

Zab Impedancia mutua entre el conductor (a) y (b), en ohmios por metro.

Línea de transmisión trifásica.- En una línea de transmisión trifásica, la ecuación (2.2) se puede ampliar como se observa en la ecuación (2.3). [1]

$$\vec{V}_{bg} = \vec{I}_{a'} * \vec{Z}_{a'b} + \vec{I}_{b'} * \vec{Z}_{b'b} + \vec{I}_{c'} * \vec{Z}_{c'b} \quad (2.3)$$

Ahora el voltaje inducido está en función de las corrientes de la línea energizada; y, de las impedancias mutuas entre las líneas energizadas y desenergizadas. Los términos de la ecuación (2.3) representan los conductores de fase de la línea energizada.

La línea desenergizada crea un camino para la corriente de flujo magnético inducido. La figura (2.4) muestra el caso de dos conductores (a) y (b), donde el conductor (b) se encuentra conectado a tierra en ambos extremos.

Como se observa en la figura 2.4, la corriente será inducida al conductor (b) por el fenómeno de inducción de campo magnético creado por la magnitud de la corriente (I_a).

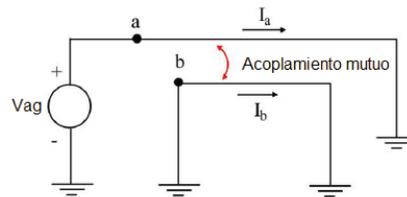


Figura N° 2.4
Corriente inducida electromagnéticamente.[1]

La corriente (I_b) se formula como se muestra en la ecuación (2.4) [1].

$$\vec{I}_b = - \frac{\vec{Z}_{ab}}{\vec{Z}_{bb}} * \vec{I}_a \quad (2.4)$$

Dónde:

Zbb Impedancia del conductor (b), en ohmios por metro.

Zab Impedancia mutua entre el conductor (a) y el conductor (b), en ohmios por metro.

Ia Corriente que fluye en el conductor (a), en A.

Ib Corriente inducida que fluye en el conductor (b), en A.

Acerca de la corriente inducida dada en la ecuación (2.4) es muy importante destacar lo siguiente:

En primer lugar, al igual que el voltaje inducido causado por el fenómeno de inducción de campo eléctrico y la corriente inducida causada por el fenómeno de inducción de campo magnético es independiente de la longitud de las dos líneas paralelas.

B. Flameo Inverso.

Cuando una descarga atmosférica impacta en el cable de guarda o directamente en la torre, una parte de su intensidad deriva a tierra a través de la impedancia de la torre (Z_T) y de la impedancia de puesta a tierra de la misma (Z_{PAT}). Observar figura 2.5. [4].

Dependiendo de los valores de Z_T y Z_{PAT} , los sobre voltajes en los aisladores (medidas desde el brazo de la torre hacia el conductor de fase) pueden producir el flameo de los mismos, esto se conoce como flameo inverso.[4].

Para que ocurra un flameo inverso, el sobrevoltaje a través del aislador debe de ser mayor o igual a su aislamiento crítico a impulso tipo rayo (CFO Critical Flash Over). El caso más desfavorable de flameo inverso tiene lugar cuando la descarga atmosférica impacta en la torre; en este caso la impedancia efectiva equivalente resultante vista en ese punto, es el paralelo de la impedancia de la torre con el paralelo de las impedancias correspondientes a las dos direcciones de propagación del conductor de tierra; y ambas en serie con la resistencia de puesta a tierra, siendo su valor: [4]

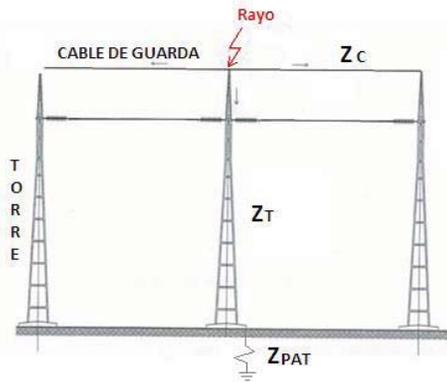


Figura N° 2.5
Flameo inverso, el voltaje debe de ser mayor que el nivel de aislamiento a impulso tipo rayo de los aisladores.

- a) La línea tiene un único cable de guarda

$$Z_{eq} = \frac{Z_T * Z_C}{2 * Z_T + Z_C} + Z_{PAT} \quad (2.5)$$

- b) La línea tiene 2 cables de guarda.

$$Z_{eq} = \frac{Z_T * Z_C}{4 * Z_T + Z_C} + Z_{PAT} \quad (2.6)$$

Dónde:

- Z_T Impedancia de la torre de transmisión.
- Z_C Impedancia característica del cable de guarda.
- Z_{PAT} Resistencia de puesta a tierra

La intensidad crítica, I_c , para la cual se produce el flameo inverso es la intensidad que produce un sobre voltaje en el brazo de la torre y que supera el nivel de aislamiento del aislador es: [4]

$$I_c = \frac{CFO}{Z_{eq}} \quad (2.7)$$

Descripción del fenómeno de flameo inverso.-

Cuando una descarga atmosférica cae en un cable de guarda, figura 2.6, la corriente debida a la descarga fluye en ambos sentidos a través de la impedancia característica del cable de guarda. La corriente y el voltaje se propagan hasta llegar a la torre, bajan por esta y se encuentran con una resistencia de puesta a tierra que disipa la energía asociada con la descarga atmosférica.

Lo mismo podemos decir cuando la descarga atmosférica cae directamente en la torre, figura 2.7.

El voltaje producido por la descarga es producto de la corriente y de la impedancia a través de la cual fluye.

Las descargas atmosféricas que caen en los vanos de los cables de guarda y en las torres, tienen la tendencia a caer en las proximidades de éstas, porque se constituyen en los puntos más elevados de las líneas de transmisión.

Figura N° 2.6
Descarga atmosférica en el cable de guarda.

Figura N° 2.7
Descarga atmosférica directamente en la torre.

La descarga atmosférica que cae en el cable de guarda o directamente en la torre, al llegar a la base de la torre (suelo) y encuentra una alta resistencia (resistencia de puesta a tierra de la torre), provoca una onda de corriente reflejada que origina un aumento de potencial eléctrico entre el brazo de la torre y el conductor de fase, hasta el punto que se supera el aislamiento proporcionado por el aire exterior a la cadena de aisladores y se presenta un flameo desde el brazo de la torre (que se encuentra a un alto potencial) hacia el conductor de fase, fenómeno conocido como flameo inverso, como puede apreciarse en la figura 2.8.

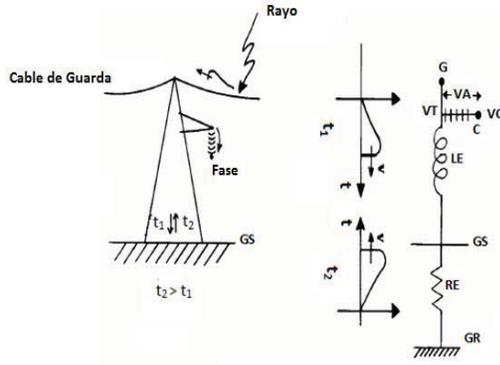


Figura N° 2.8
Fenómeno de flameo inverso.[14]

Dónde:

- G Cable de guarda.
- C Conductor de fase.
- LE Inductancia equivalente de la torre.
- RE Resistencia equivalente de puesta a tierra
- GS Superficie del suelo
- GR Tierra de referencia
- VT Voltaje de la torre
- VC Voltaje del conductor
- VA Voltaje en el aislamiento
- t1 Tiempo de la onda incidente
- t2 Tiempo de la onda reflejada
- tf Tiempo de flameo inverso

III. MODELACIÓN DE COMPONENTES EN EMTP-ATP

EMTP (ElectroMagnetic Transient Program), ó ATP (Alternative Transient Program), es un programa digital utilizado para simular transitorios electromagnéticos, electromecánicos y de sistemas de control en sistemas eléctricos polifásicos de potencia.

A. Fenómeno de Inducción.

El sistema a ser modelado en el programa ATP se indica en la figura N°. 3.1. [11].

Líneas de transmisión.- Para el fenómeno de inducción es modelada con el modelo PI, a frecuencia industrial de 60 Hz.

La información de la línea de transmisión a modelarse se detalla en la tabla N° 3.1 como también se indica la geometría de la torre de transmisión a 230 y 69 kV. en la figura N° 3.2.

Longitud	156 km	
N° de Circuitos	3	
	230 kV Doble circuito	
	69 kV Un circuito	
Resistividad del terreno	100 Ω.m	
DATOS	CONDUCTOR DE FASE 230 kV	CONDUCTOR DE FASE 69 kV
Material	Aluminio/ Acero - 18/19	Aluminio/ Acero
Tipo	ACAR 1200	PARTRIDGE 266.8
Diámetro exterior	3.202cm	1.628 cm
Diámetro interior	2.286 cm	0.6 cm
Resistencia en c.c (20°C)	0.0509 Ω/km	0.211 Ω/km
Flecha	4.33 m	3.78 m

La flecha se obtuvo con un vano promedio de 200 m.

HS

Tabla N° 3.1
L/T Multicircuito Santo Domingo – Esmeraldas 230 y 69 kV.

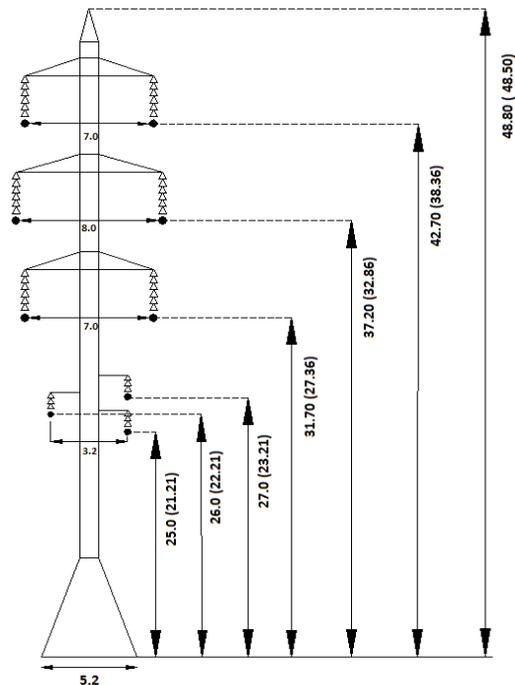


Figura N° 3.2
Geometría de la torre de transmisión multicircuito 230 y 69 kV.
L/T Santo Domingo – Esmeraldas.

B. FLAMEO INVERSO.

El sistema a ser modelado para el análisis de flameo inverso se indica en la figura N°. 3.3.

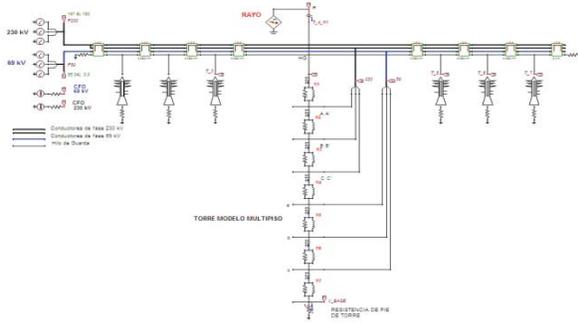


Figura N° 3.3. Modelo de análisis. Esquema en ATP.

Línea de transmisión.- Es representada con el modelo JMARTI, con parámetros en función de la frecuencia.

Torre de transmisión.- Se utilizarán dos modelos de torres, el modelo vertical de la línea sin pérdidas para las torres adyacentes al impacto del rayo y el modelo de torre multipiso en la cual impactará la descarga atmosférica.

1. Modelo vertical de la línea sin pérdidas.- En este tipo de fenómeno la torre de transmisión es modelada como línea de transmisión monofásica con parámetros distribuidos a cuya base se encuentra conectada la resistencia de pie de torre. Son varios los modelos que se han propuesto para determinar la impedancia de impulso de las torres de transmisión. Uno de los modelos propuestos es el cónico, figura N° 3.4; que proporciona una impedancia constante de acuerdo a la geometría de la torre a utilizar. [10]

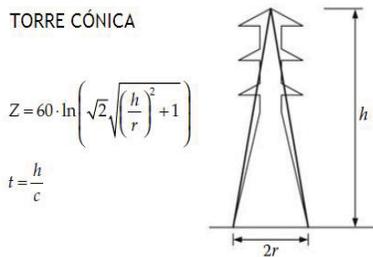


Figura N° 3.4 Impedancia de impulso de una torre cónica. [10]

Dónde:

- r** radio de la base de la torre, en metros (m)
- h** altura de la torre, en metros (m)
- c** velocidad de la luz.

Para el presente análisis, la torre de transmisión que se utilizará se muestra en la figura 3.2 y se tiene que la longitud del radio y la altura de la torre multicircuito son 2,6 y 48.8 metros respectivamente, con lo que se obtiene una impedancia característica de aproximadamente 200 ohmios.

2. Modelo de la torre multipiso.- Está compuesto por secciones que representan las secciones de la torre entre brazos de la torre. Cada sección consiste de una línea sin pérdidas en serie con un circuito en paralelo R-L, El modelo de torre multipiso se indica en la figura 3.5.

La impedancia de cada sección Z_{T1} y Z_{T2} está basada en la fórmula de Jordan, sin incluir la representación de las cruzetas; además, las resistencias de amortiguación e inductancias se deducen de acuerdo con las siguientes ecuaciones: [3], [10].

$$R_i = \frac{-2 \cdot Z_{T1} \cdot \ln \sqrt{\gamma} \cdot h_i}{h_1 + h_2 + h_3} \quad (i = 1, 2, 3) \tag{3.1}$$

$$R_4 = -2 \cdot Z_{T2} \cdot \ln \sqrt{\gamma} \tag{3.2}$$

$$L_i = \alpha \cdot R_i \cdot \frac{2h}{c} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \tag{3.3}$$

Dónde:

- Z_{T1}** impedancia característica de las tres secciones superiores de la torre
- Z_{T2}** impedancia característica de la sección inferior de la torre
- h_i** altura de cada sección de la torre
- γ** coeficiente de atenuación
- α** coeficiente de amortiguación

El coeficiente de atenuación está entre 0.7 y 0.8, mientras que el coeficiente de amortiguación es igual a uno.

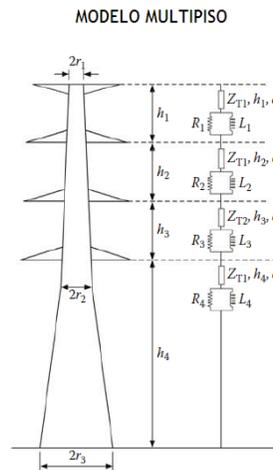


Figura N° 3.5 Modelo de torre multipiso.[10]

El cálculo de la Impedancia (Z), según Jordan se deduce de la siguiente manera, ecuación 3.4:[10]

$$Z = 60 \left(\ln \left(\frac{h}{r_{eq}} \right) - 1 \right) \tag{3.4}$$

Dónde:

- h** altura de la torre
- r_{eq}** radio equivalente obtenido de la geometría de la estructura y dado por la ecuación 3.5 y figura 3.6. [10]

$$r_{eq} = \frac{r_1 h_2 + r_2 h + r_3 h_1}{2h} \quad (h = h_1 + h_2) \quad (3.5)$$

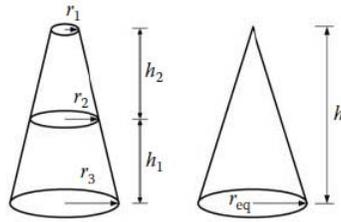


Figura N° 3.6. Geometría para el cálculo del radio equivalente. [10]

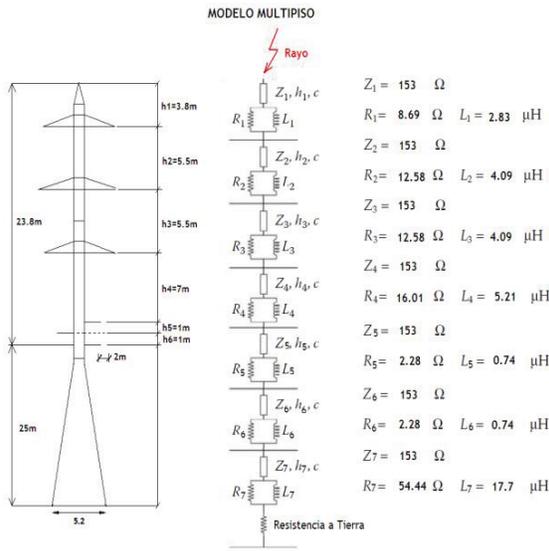


Figura N° 3.7. Resultados del modelo de torre multicircuito 230 y 69 kV.

Resistencia de pie de torre.- el valor pico de sobrevoltaje que aparece sobre la torre está principalmente determinado por la impedancia de pie de torre aparente en el momento de la descarga, debido a que la reflexión de la base de la torre puede llegar mucho más rápido al tope de la torre que las reflexiones de las torres adyacentes.

La influencia de la resistencia de pie de torre aparente sobre el voltaje en el tope de la torre es determinada por su respuesta que depende de la corriente y el tiempo.

La respuesta del tiempo es generalmente despreciada y la impedancia es dependiente de la magnitud de la corriente del rayo como se muestra en la ecuación 3.6. [4],[18].

$$R_T = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (3.6)$$

Dónde:

- R₀**, resistencia de pie de torre medida a baja corriente y baja frecuencia (Ω).
- R_T**, resistencia de puesta a tierra aparente en el momento de la descarga (Ω).
- I_g**, corriente limitante para inicializar una ionización suficiente del suelo (A).
- I**, corriente de la descarga atmosférica a través de la resistencia de pie de torre (kA).

La corriente limitante es función de la ionización del suelo y está dada por la ecuación 3.7. [4],[18].

$$I_g = \frac{E_0 \cdot \rho}{2\pi R_0^2} \quad (3.7)$$

Dónde:

- r**, resistividad del suelo en (Ω/m).
- E₀**, gradiente de ionización del suelo (300 kV/m).

Como se puede observar en las expresiones anteriores la resistencia de pie de torre no es constante, su valor es dependiente de la corriente, por lo que para la resistencia de pie de torre, se utiliza una resistencia con característica no lineal, dependiente de la corriente.

El valor de I_g puede determinarse con la expresión (3.7) que para una resistividad del suelo de 100 Ω/m y el gradiente de ionización del suelo de 300 kV/m la corriente es de 52.5 kA, y R₀ es la resistencia medida en campo 10 Ω .

Los valores de resistividad del suelo, gradiente de ionización del suelo y la resistencia de pie de torre son valores obtenidos de trabajos realizados en campo por CELEC EP Transelctric. [4],[11]

Cadena de aisladores.- La cadena de aisladores se va a representar por dos fuentes de corriente continua, fuentes que representarán el CFO de 230 kV, tabla 3.2; y, el CFO de 69 kV tabla 3.3, (CFO Critical Flash Over).

Número de Aisladores	CFO [kV] (Positivo)	CFO [kV] (Negativo)
20 <3500 msnm	1745	1785
21 >3500 msnm	1825	1870

Tabla N° 3.2. CFO de la cadena de aisladores de 230 kV. Manual NGK, aisladores tipo 53-2.[11]

Voltaje de Servicio [kV]	CFO [kV] (Positivo)	CFO [kV] (Negativo)
69	350	--

Tabla N° 3.3. CFO de la cadena de aisladores de 69 kV.

Para observar el flameo inverso, el sobrevoltaje a través del aislador debe ser mayor o igual a su aislamiento a impulso tipo rayo (CFO).

IV. ANÁLISIS DE CASOS

En el fenómeno de inducción electromagnética se observará los voltajes inducidos máximos que pueden generar los diferentes niveles de voltaje, dando mayor énfasis cuando el circuito de 69 kV se encuentra desenergizado y los circuitos de 230 kV energizados.

En lo que respecta al análisis del flameo inverso, se observará el sobrevoltaje que causa la disrupción eléctrica en la cadena de aisladores de 230 y 69 kV.

A. Fenómeno de Inducción.

Caso 1: Inducción en la línea de subtransmisión Santo Domingo – La Concordia de 69 kV.

En un tramo de 26 km de la línea mencionada, se modela torres de transmisión multicircuito 230 y 69 kV.

En la simulación del fenómeno de inducción previamente se han tomado las acciones siguientes:

- Desconectar la carga en la S/E La Concordia de 69 kV.
- Desenergizar la línea de subtransmisión Santo Domingo - La Concordia de 69 kV.
- Dejar desconectadas las puestas a tierra en las subestaciones de la línea de subtransmisión de 69 kV.
- Simular y observar el fenómeno de inducción que causan los circuitos de 230 kV sobre el circuito de 69 kV.

En la figura 4.1 se observa el fenómeno de inducción que causan los circuitos de transmisión de 230 kV. sobre el circuito de subtransmisión de 69 kV.

La tabla 4.1 se muestran los valores de voltajes inducidos en cada una de las fases del circuito desenergizado de 69 kV.

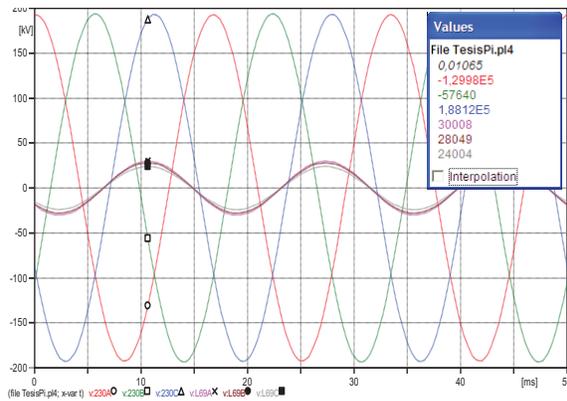


Figura N° 4.1.

Fenómeno de inducción.

Círculo energizado de 230 kV y circuito desenergizado de 69 kV.

Circuito Santo Domingo - La Concordia de 69 kV, desenergizado.						
Fases	Barra 69 kV, S/E Santo Domingo		Mitad del tramo de las torres multicircuito 230 y 69 kV		Barra 69 kV, S/E La Concordia.	
	Vpico [kV]	Vrms [kV]	Vpico [kV]	Vrms [kV]	Vpico [kV]	Vrms [kV]
A	29,916	37	29,991	37	30,065	37
B	27,963	34	28,032	34	28,101	34
C	23,926	29	23,989	29	24,052	29

Tabla N° 4.1.
Voltajes inducidos.

Circuito Santo Domingo – La Concordia de 69 kV., desenergizado.

Los circuitos energizados de 230 kV, inducen un voltaje no solo en el sector de las torres multicircuito 230 y 69 kV; si no también a lo largo de toda la línea de subtransmisión Santo Domingo – La Concordia de 69 kV y en cada una de sus subestaciones respectivas, que alcanza un valor máximo en la fase A de 37 kV. fase-tierra.

Caso 2. Voltajes inducidos máximos en la mitad de la línea de subtransmisión Santo Domingo– La Concordia de 69 kV con torres multicircuito.

Los voltajes máximos inducidos según la conexión, ubicación y valores de las puestas a tierra se detallan en las siguientes tablas: 4.2, 4.3 y 4.4.

La tabla 4.2 se detalla los resultados obtenidos según la conexión de las puestas a tierra en las subestaciones de Santo Domingo y la Concordia de 69 kV.

El valor máximo de resistencia admitido es de 1 ohm para una subestación eléctrica, basado en la norma IEEE Std. 80-2000, “Guide for Safety in AC Substation Grounding”. [21].

Así mismo la tabla 4.3 se detalla los resultados obtenidos según la apertura y conexión de las puestas a tierra ubicadas en el sector de la torres multicircuito 230 y 69 kV, además se varía el valor de la resistencia de puesta a tierra en 10, 50 y 100 ohms.

Finalmente la tabla 4.4, resultados obtenidos según el valor de resistencia de puesta a tierra local: 10, 50 y 100 ohms, ubicadas a 800 m de distancia, para dar mayor seguridad a la zona de trabajo.

La zona de trabajo se ubica en la mitad del tramo de las torres multicircuito 230 y 69 kV de la línea de subtransmisión Santo Domingo – La Concordia de 69 kV.

La conexión de puestas a tierra en las subestaciones Santo Domingo y La Concordia de 69 kV, logró reducir los voltajes inducidos como se puede apreciar en la tabla 4.2 subcaso 3, a excepción en el sector del tramo de las torres multicircuito 230 y 69 kV.

Así mismo, el voltaje inducido en las fases desenergizadas se tienen diferentes valores, esto se debe a la configuración geométrica de la torre multicircuito que se está utilizando y dichos valores se puede apreciar en la tabla 4.2. El voltaje inducido de la fase A es mayor que en la fase B y fase C debido a que la fase A se encuentra más cerca a los circuitos energizados de 230 kV.

Subcaso	Sector	Puesta a tierra 1 Ohm	Fases del Circuito de 69 kV	Vpico [V]	Vrms [V]
1	S/E Santo Domingo	X	A B C	2,55 2,21 1,59	3 3 2
	Mitad del tramo de las torres multicircuito 230 y 69 kV		A B C	31,38 28,4 28,95	38 35 35
	S/E Concordia		A B C	102 92,92 88,78	123 114 109
2	S/E Santo Domingo		A B C	253,92 236,95 220,57	311 290 270
	Mitad del tramo de las torres multicircuito 230 y 69 kV		A B C	136,28 127,48 118,12	167 156 145
	S/E Concordia	X	A B C	2,55 2,22 1,6	3 3 2
3	S/E Santo Domingo	X	A B C	4,15 3,39 2,55	5 4 3
	Mitad del tramo de las torres multicircuito 230 y 69 kV		A B C	31,73 30,67 27,63	39 38 34
	S/E Concordia	X	A B C	1,63 1,28 1,11	2 2 1

Tabla N° 4.2
Voltajes inducidos máximos.
Conexión de las puestas a tierra en cada subestación de 69 kV.

Subcasos	Ubicación	Puesta a Tierra	Conexión de las puestas a tierra	Mitad de la longitud de la línea multicircuito 230 y 69 kV		
				Fases	Vpico [V]	Vrms [V]
1	Tramo de las torres multicircuito 230 y 69 kV	10 Ohm	Extremo Izquierdo ³	A	14,07	17
				B	13,19	16
				C	11,15	14
			Extremo Derecho ⁴	A	34,23	42
				B	33,13	41
				C	29,94	37
Ambos Extremos	A	14,58	18			
	B	13,51	17			
	C	11,31	14			
2	Tramo de las torres multicircuito 230 y 69 kV	50 Ohm	Extremo Izquierdo	A	29,12	36
				B	28,05	34
				C	25,08	31
			Extremo Derecho	A	33,92	42
				B	32,87	40
				C	29,72	36
Ambos Extremos	A	29,44	36			
	B	28,36	35			
	C	25,38	31			
3	Tramo de las torres multicircuito 230 y 69 kV	100 Ohm	Extremo Izquierdo	A	31,36	38
				B	30,31	37
				C	27,25	33
			Extremo Derecho	A	33,65	41
				B	32,62	40
				C	29,51	36
Ambos Extremos	A	31,52	39			
	B	30,44	37			
	C	27,37	34			

Nota: Resultados obtenidos con la conexión de las puestas a tierra en cada una de las subestaciones Santo Domingo y la Concordia de 69 kV., 1 ohm. * ³y⁴

Tabla N° 4.3
Voltajes inducidos máximos.
Conexión de las puestas a tierra en el tramo de transmisión con torres multicircuito 230 y 69 kV.

³ Extremo Izquierdo en dirección a la S/E de Santo Domingo de 69 kV.
⁴ Extremo Derecho en dirección a la S/E La Concordia de 69 kV.
Para 3 y 4 observar Figura N°. 3.1

Para los subcasos 1 y 2 de la tabla 4.2, se puede observar que el voltaje inducido aumenta más en el subcaso 2, cuando se realiza la conexión a tierra únicamente en la S/E La Concordia alcanza un voltaje inducido en la fase A de 311 voltios en la S/E Santo Domingo; mientras que, en el subcaso 1 con la conexión a tierra solo en la S/E Santo Domingo, alcanza un voltaje inducido en la fase A de 125 voltios en la S/E La Concordia.

Esto se debe que después del tramo de las torres multicircuito para llegar a la S/E Santo Domingo a 69 kV se tiene un tramo de subtransmisión de 10 km aproximadamente y para llegar a la S/E La Concordia a 69 kV se tiene un tramo de subtransmisión de 3 km aproximadamente.

Para realizar cualquier trabajo de mantenimiento es muy importante tomar en cuenta las respectivas seguridades para realizar estas labores, una de estas seguridades es la conexión de puestas a tierra en cada subestación, para precautelar la seguridad del personal que va a realizar el trabajo.

En la tabla 4.3, con una buena conexión de puestas a tierra en el sector de las torres multicircuito, se reduce el voltaje inducido en la mitad de las torres multicircuito en el circuito desenergizado de 69 kV que es producido por los circuitos energizados de 230 kV.

El voltaje inducido en el circuito de 69 kV, medido en la fase A en la mitad del tramo de las torres multicircuito se reduce de 39 voltios a 18 voltios con una resistencia de puesta a tierra de 100 ohmios a 10 ohmios respectivamente.

Subcasos	Puesta a tierra	Mitad de la longitud de la línea multicircuito 230 y 69 kV			
		Tramo de las torres multicircuito 230 y 69 kV	Locales 800 m	Fases	Vpico [V]
1	100 Ohm	100 Ohm	A	27,80	34
			B	26,75	33
			C	23,87	29
		50 Ohm	A	23,53	29
			B	22,55	28
			C	19,90	24
10 Ohm	A	8,77	11		
	B	8,19	10		
	C	6,48	8		
2	50 Ohm	50 Ohm	A	21,87	27
			B	20,92	26
			C	18,41	23
		10 Ohm	A	8,28	10
			B	7,71	9
			C	6,04	7
3	10 Ohm	10 Ohm	A	4,66	6
			B	4,20	5
			C	3,10	4
4	10 Ohm	10 Ohm	A	4,20	5
			B	3,50	4
			C	2,00	2

Tabla N° 4.4.
Voltajes inducidos máximos.
Variando el valor de resistencia de puesta a tierra local.

Nota Subcasos 1,2,3: Resultados obtenidos con la conexión de las puestas a tierra en cada una de las S/E Santo Domingo y la Concordia de 69 kV., 1 ohm.

Nota Subcaso 4: Resultados obtenidos con la apertura de las puestas a tierra en cada una de las S/E Santo Domingo y la Concordia de 69 kV.

Como se puede observar en la tabla 4.4 para los subcasos 1,2 y 3 la instalación de puestas a tierra locales ubicadas a 400 m de distancia a cada extremo (distancia total 800 m) y con un valor de 10 ohm se logra reducir el voltaje inducido en las fases A, B y C a 6, 5 y 4 voltios respectivamente.

Resultados obtenidos a partir de la conexión de las puestas a tierra en cada una de las subestaciones Santo Domingo y la Concordia de 69 kV de 1 ohm y conexión de puestas a tierra ubicadas a los extremos en el sector de la torres multicircuito 230 y 69 kV con un valor de 10 ohm.

Para el subcaso 4 de la tabla 4.4, resultados obtenidos a partir de la apertura de las puestas a tierra en cada una de las subestaciones Santo Domingo y la Concordia de 69 kV y conservando la conexión de puestas a tierra ubicadas en los extremos en el sector de la torres multicircuito 230 y 69 kV con un valor de 10 ohm y la conexión de puestas a tierra locales de 10 ohm se logra reducir el voltaje inducido en las fases A, B, C de 37,34, 29 kV a 5,4,2 voltios respectivamente.

La instalación de puestas a tierra locales a los extremos de la zona de trabajo brinda una mayor seguridad al grupo de trabajo y lo más importante cuidar de todo el personal para evitar accidentes mortales debido al fenómeno de inducción producido por los circuitos de 230 kV.

B. FLAMEO INVERSO.

Caso 1: Flameo Inverso.- En el presente análisis se observará con que valor de corriente (descarga atmosférica) y valor de resistencia de pie de torre se presenta el fenómeno de flameo inverso en la cadena de aisladores de la torre de transmisión multicircuito 230 y 69 kV, cuando el impacto es directamente en la estructura de la torre.

En la tablas¹ 4.5, 4.6 y 4.7 se reporta si existe o no el flameo inverso, sobretensiones producidas en la cadena de aisladores de 230 y 69 kV, para diferentes valores de corriente y resistencia de pie de torre.

Forma de onda 1,2/50 us

Resistencia de puesta a tierra ohmios	Voltaje kV	I=5kA		I=6kA		I=7kA		I=10kA		I=20kA		I=21kA		I=22kA	
		230	69	230	69	230	69	230	69	230	69	230	69	230	69
5	x	x	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0
10	x	x	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0
20	x	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0
40	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0
80	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0
100	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0
150	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0
200	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0

0: Flameo inverso x: NO Flameo inverso.
Tabla N° 4.5.
Flameo inverso

¹ Las Tablas 4.11, 4.12 y 4.13 son elaboradas mediante simulaciones en ATP.

Forma de onda 6/50 us

Resistencia de puesta a tierra ohmios	Voltaje kV	I=5kA		I=7kA		I=10kA		I=16kA		I=22kA		I=30kA		I=53kA		I=54kA	
		230	69	230	69	230	69	230	69	230	69	230	69	230	69	230	69
5	x	x	x	x	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0
10	x	x	x	x	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0
20	x	x	x	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0	0
40	x	x	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0
80	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0
100	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0
150	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0
200	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	0

0: Flameo inverso x: NO Flameo inverso.
Tabla N° 4.6.
Flameo inverso

Forma de onda 1,2/100 us

Resistencia de puesta a tierra	Voltaje kV	I=5kA		I=6kA		I=7kA		I=10kA		I=20kA		I=21kA		I=22kA		
		230	69	230	69	230	69	230	69	230	69	230	69	230	69	
5	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0
10	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0
20	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0
40	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0
80	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0
100	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0
150	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0
200	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0

0: Flameo inverso x: NO Flameo inverso.
Tabla N° 4.7.
Flameo inverso

Como se puede observar en las tablas 4.5, 4.6 y 4.7 para que exista un flameo inverso no solo depende de la magnitud de la descarga atmosférica y resistencia de pie de torre, si no, también de la forma de onda que lleva la corriente de rayo.

En la tabla 4.8 se presenta un resumen para observar claramente cuando existe un flameo inverso en las torres de transmisión multicircuito 230 y 69 kV, para resistencias de pie de torre con 10 ohmios.

Torre multicircuito 230 y 69 kV.		
Forma de onda	Circuito 69 kV	Circuito 230 kV
1.2/50	≥ 7 kA	≥ 22 kA
6.0/50	≥ 14 kA	≥ 53 kA
1,2/100	≥ 6 kA	≥ 21 kA

Tabla N° 4.8
Resumen de flameo inverso

V. CONCLUSIONES

El análisis del fenómeno de inducción en la línea de transmisión multicircuito Santo Domingo – Esmeraldas 230 y 69 kV, en el tramo de torres multicircuito 230 y 69 kV el fenómeno de inducción electromagnética no alterará a ningún circuito para su correcto funcionamiento en estado estable.

Cuando las líneas de subtransmisión Santo Domingo - La Concordia y Quinindé – Viche ambas de 69 kV, desenergizadas y sin la conexión de puesta a tierra; y, los circuitos de Esmeraldas – Santo Domingo de 230 kV energizados, los circuitos de 230 kV inducirán voltajes al circuito de 69 kV que puede alcanzar valores de 30 kV hasta 50 kV, voltajes peligrosos para el personal de mantenimiento.

Los voltajes inducidos por los circuitos de 230 kV hacia los circuitos desenergizados de 69 kV, no solo se presenta en el sector de las torres multicircuito 230 y 69 kV, sino también existe este voltaje inducido a lo largo de toda la línea de subtransmisión que llega a las respectivas subestaciones de 69 kV.

Las puestas a tierra para mantenimiento de líneas de transmisión garantiza escenarios de seguridad al personal de trabajo. En un caso de análisis de la línea de transmisión multicircuito Esmeraldas – Santo Domingo y se encuentra en mantenimiento la línea de subtransmisión Santo Domingo – La Concordia de 69 kV, la conexión de puestas a tierra en las subestaciones respectivas de 1 ohm, en el sector de las torres multicircuito de 10 ohm y en la zona de trabajo (temporales) de 10 ohm, se pudo reducir el voltaje inducido de 30 kV a 6 V., voltaje medido en la mitad del tramo de las torres multicircuito.

El análisis de flameo inverso en torres de transmisión multicircuito 230 y 69 kV, se puede presentar un flameo inverso con valores probables de corriente de rayo mayor o igual a 7 kA a nivel de 69 kV; y con valores probables de corriente de rayo mayor o igual a 22 kA a nivel de 230 kV.

Las descargas atmosféricas con valores de 7 kA y 22 kA, las torres de transmisión multicircuito 230 y 69 kV deben tener una resistencia de pie de torre de 10 ohmios. Estas descargas atmosféricas tienen una probabilidad de ocurrencia del 98% y 71% respectivamente. Manejar las conclusiones como enunciados cortos fundamentados en la teoría y los objetivos planteados.

VI. REFERENCIAS

- [1] RANDY HORTON, KEITH WALLACE. Members IEEE. "Induced Voltage and Current in Parallel Transmission Lines: Causes and Concerns". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, N° 4, October 2008.
- [2] VILLARRUBIA M. "Seguridad Eléctrica: Efectos de la Corriente Eléctrica sobre el Cuerpo Humano". Facultad de Física. Universidad de Barcelona.
- [3] M. KIZILCAY, C. NEUMANN. "Backflashover Analysis for 110-kV Lines at Multi-Circuit Overhead Line Towers". International Conference on Power Systems Transients (IPST'07) in Lyon, France on June 4-7, 2007.
- [4] MARTÍNEZ VELASCO, Juan Antonio. "Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión". Universidad Politécnica de Catalunya. España 2008.
- [5] VÁSQUEZ, Kléber. "Cálculo de sobrevoltajes originados por descargas atmosféricas en líneas de transmisión utilizando el ATP", EPN, Diciembre, 2003.
- [6] YUGCHA, Fausto. "Cálculo del comportamiento de una línea de transmisión frente al flameo Inverso basado en el método Monte Carlo", EPN, Noviembre de 2010.
- [7] CORREA, Nataly. "Diseño del apantallamiento contra descargas atmosféricas en líneas de transmisión con ayuda computacional", EPN, Septiembre 2011.
- [8] El EMTP/ATP, ElectroMagnetic Transient Program/Alternative Transient Program. <http://iitree-unlp.org.ar/caue/atp.htm>.
- [9] ZAMORA, M.I; MAZÓN, A.J. "Simulación de Sistemas Eléctricos". Pearson Educación S.A. Madrid 2005.
- [10] MARTÍNEZ VELASCO, Juan Antonio. "Power System Transients: Parameter Determination ". CRC Press, Tylor y Francis Group.
- [11] Base de Datos de CELEC EP – Unidad de Negocios Traselectric.
- [12] MONTESDEOCA, Martin. "Análisis Computacional de Líneas de Transmisión para Identificar las torres con mayor índice de fallas por efecto de Descargas Atmosféricas". E.P.N. 2008.
- [13] Sistema Nacional Interconectado SNI. Corporación CENACE, Centro Nacional de Control de Energía.
- [14] LEÓN, J. "Puestas a Tierra de Líneas de Transmisión". Gamma. Boletín Técnico. N° 15. Año 2005.
- [15] SÁIZ, Juan; SOLANO, Miguel. "Conceptos básicos de campos electromagnéticos de baja frecuencia". Universidad de Cantabria. España.
- [16] CODENSA; "Protección contra sobretensiones causadas por descargas atmosféricas". División de Ingeniería y Obras. Colombia.
- [17] GREENWOOD, Allan. "Electrical transients in power systems". New York. Second Edition. Ed: John Willey and Sons Inc, 1991.
- [18] MARTÍNEZ, Juan; CASTRO, Ferley. Análisis de sobretensiones de origen atmosférico en líneas aéreas de transporte. Parte 2: Cálculo estadístico de sobretensiones. Revista Iberoamericana del ATP, Volumen 4, Octubre 2002.
- [19] "IEEE Guide for the application of Insulation Coordination", IEEE Std 1313.2, 1999.
- [20] <http://www.significadode.org/inducir.htm>
- [21] "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding". IEEE Std. 80-2000.
- [22] Dirección de Planificación de la Corporación Nacional de Electricidad de las regionales CNEL Santo Domingo y CNEL Esmeraldas.

- [23] Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL) 1996. Normas de proyectos para las líneas de 138 kV. Ecuador.
- [24] FURNAS, Centrais Elétricas S.A. “Transitórios Elétricos e Coordenacao de Isolamento, aplicacao em sistemas de potencia de alta tensao”. Primera Edición. Editorial Universitaria. Brasil 1987.
- [25] SOLA, Pamela. “Cálculo de transitorios en líneas de transmisión a 230 kV con la aplicación a la línea Quevedo Totoras”, EPN, Febrero 2010.

VII. BIOGRAFÍA



Luis Eduardo Caraguay Ramirez.-

Nació en Loja en 1982. Sus estudios secundarios los realizó en su ciudad natal en el Instituto Técnico Superior “Daniel Álvarez Burneo” y una Tecnología en el conservatorio de música “Salvador Bustamante Celi” especialidad Violín.

Su formación profesional lo realiza en la ciudad de Quito en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de Ingeniero Eléctrico en marzo de 2013. Actualmente se desempeña como Especialista Técnico en la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP Unidad de Negocio ENERNORTE.

Ing. Luis Edmundo Ruales Corrales.- Profesional de la ingeniería eléctrica especializado en estudios de sistemas eléctricos y planificación de expansión de la generación y transmisión. Se ha desempeñado en TRANSELECTRIC S.A como Vicepresidente Técnico y en CELEC EP como Director de Generación. Actualmente se desempeña como Sub Secretario de Generación y Transmisión de Energía en el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. Desde el año 1978 es Catedrático de la Escuela Politécnica Nacional.

LÍNEA DE TRANSMISIÓN MULTICIRCUITO ESMERALDAS – SANTO DOMINGO 230 y 69 kV.

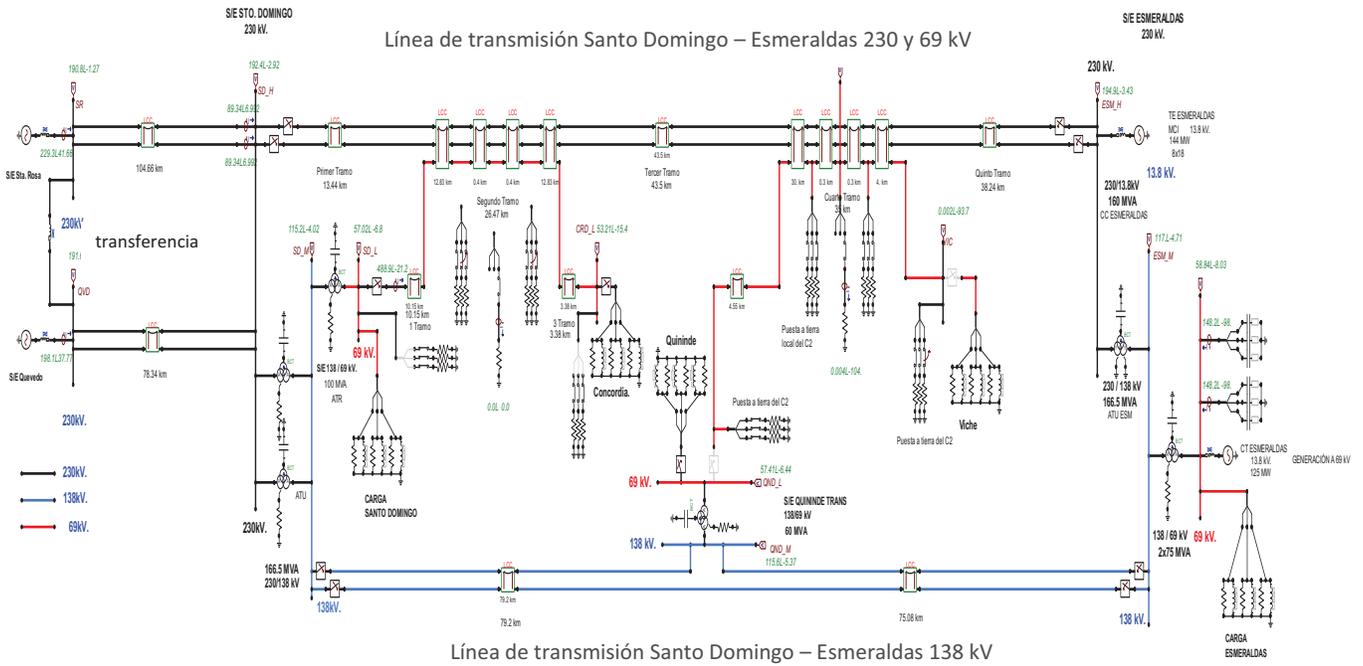


Figura No 3.1.

REPRESENTACIÓN EN ATP.

LÍNEA DE TRANSMISIÓN MULTICIRCUITO ESMERALDAS – SANTO DOMINGO 230 y 69 kV.