

Diseño y construcción de un modelo a escala de la línea de transmisión de 500 kV Coca Codo Sinclair – El Inga para el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia

María Ramos, Sara Tupiza y Jesús Játiva, IEEE Member

Resumen—En este trabajo se realiza el diseño y construcción de un modelo a escala de la línea de transmisión de 500 kV Coca Codo Sinclair – El Inga, con el fin de efectuar estudios experimentales en estado estable y transitorio. Se construyen dos módulos considerando para cada uno la mitad de la longitud de la línea de transmisión real.

En base a la matriz de impedancias y admitancias reducidas, obtenidas a través del modelamiento de la línea de transmisión real en el software Power Factory de DIGSILENT, se realiza el diseño del modelo electromagnético y electrostático equivalente para cada uno de los módulos. Las especificaciones de los elementos inductivos y capacitivos se obtienen mediante los valores nominales de voltaje y potencia del sistema de 500 kV y se los relaciona con los valores nominales del Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia mediante una conversión en valores en por unidad que reflejan de manera exacta los parámetros reales de la línea de transmisión.

El modelo electromagnético se representa en base a la matriz de impedancia conformada por impedancias propias y mutuas. En el acoplamiento magnético se considera la construcción de bobinas de núcleo de aire, en tanto que, las impedancias propias se componen de las impedancias de las bobinas de núcleo de aire más las impedancias de bobinas de núcleo de hierro.

La resistencia común, que toma en cuenta las resistencias de retorno por el cable de guardia y la tierra, se modela con una resistencia de niquelina instalada en el neutro de cada módulo.

El modelo electrostático está representado por capacitancias entre fases y fase a tierra, compuestas de arreglos de capacitores. Se realizan mediciones de parámetros eléctricos, análisis de efecto Ferranti, estudios de cortocircuitos y flujos de potencia.

Palabras Clave—Línea de transmisión de 500 kV, Diseño y construcción, Modelo electromagnético y electrostático a escala.

I. INTRODUCCIÓN

LAS líneas de transmisión cumplen un papel muy importante dentro de un sistema eléctrico de potencia debido a que transportan la energía eléctrica desde las centrales de generación hacia los sistemas de distribución.

Debido a la complejidad del estudio de los sistemas eléctricos de potencia, se han desarrollado programas computacionales que ayudan a su interpretación y análisis. Sin embargo, el contar con un modelo físico a escala permitirá complementar los conocimientos teóricos de forma que se pueda entender los fenómenos electromagnéticos en una línea de transmisión.

Una línea real tiene parámetros serie y paralelo distribuidos a lo largo de su trayectoria, en tanto que en el laboratorio serán simulados físicamente a escala como un circuito eléctrico con parámetros concentrados.

Con la disposición de un modelo a escala de la línea de transmisión de 500 kV Coca Codo Sinclair - El Inga, se podrán realizar varios estudios experimentales de los fenómenos que se presentan en una línea de transmisión real de extra alto voltaje.

Cabe señalar que un modelo a escala de un componente importante del sistema de potencia posibilitará la integración con otros componentes, tales como: generadores, transformadores y cargas, construidos también a escala, para trabajos de investigación teórico prácticos de utilidad para la academia y la industria eléctrica del país.

II. METODOLOGÍA

Actualmente, el Ecuador dispone de un Sistema de Transmisión de Extra Alto Voltaje de 500 kV, construido con el fin de transportar la potencia generada desde la central Coca Codo Sinclair, que posee una capacidad de 1500 MW [1]. Las líneas de transmisión que operan a 500 kV, son: Coca Codo Sinclair-San Rafael, San Rafael- El Inga, El Inga- Tisaleo, Tisaleo-Chorrillos. Se modela la línea Coca Codo Sinclair – El Inga, cuyas características se muestran en la Tabla I.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE COCA CODO SINCLAIR – EL INGA DE 500 kV

Línea de Transmisión	Longitud [km]	Descripción
Coca Codo Sinclair- San Rafael	7,8	2 módulos con conductor de fase ACAR 1100 MCM, formadas por un haz de 4 conductores.
San Rafael- El Inga	118,2	

Se ha construido la línea de transmisión de simple circuito Coca Codo Sinclair - San Rafael - El Inga de 500 kV, en dos módulos, desde el pórtico de salida del proyecto hidroeléctrico, que se encuentra ubicada en el cantón El Chaco, provincia de Napo, y se secciona en la subestación San Rafael, la misma que se ubica en el mismo cantón, aproximadamente a 7,8 km al noroccidente de la central. Posteriormente, las líneas recorren el cantón

Quijos de la provincia de Napo y finalizan en la subestación El Inga, situada en el cantón Quito, provincia de Pichincha [2].

Para el diseño y construcción del modelo a escala, se considera una sola longitud de 126 km, y a su vez se construye únicamente una de las dos líneas existentes en el sistema, puesto que la otra posee las mismas características eléctricas y mecánicas.

Para el diseño de los módulos de la línea de transmisión, se empieza por estructurar las matrices de impedancias y admitancias obtenidas a través del software Power Factory de DIGSILENT, en donde se ingresan los datos de configuración de torre, tipo de conductor de fase y cables de guardia, con su respectiva disposición geométrica.

Las torres de transmisión de la línea Coca Codo Sinclair - El Inga, tienen una altura promedio de 52,5 m. Cada fase está formada por un haz de 4 conductores de aleación de aluminio ACAR 1100 MCM 18/19 y disponen de dos cables de guardia, uno de ellos es de acero galvanizado 3/8" extra resistente y el otro es de fibra óptica OPGW de 48 fibras [3]. Los conductores están sostenidos en estructuras metálicas de celosía, auto-soportantes, del tipo "cabeza de gato", de configuración horizontal.

Los datos de los conductores se muestran en las Tablas II, III, IV, V y VI, y fueron proporcionados por CELEC EP Unidad de Negocios TRANSELECTRIC [3].

Una vez ingresados los datos en el software Power Factory se obtienen las matrices de impedancias y admitancias naturales, reducidas y simétricas.

TABLA II
DATOS DEL CONDUCTOR DE FASE

CONDUCTOR DE FASE	
ACAR 1100 MCM	
Voltaje nominal	500 kV
Corriente nominal	1,052 kA
Número de subconductores	4
Espaciamento del haz	0,457 m
Modelo del conductor	Conductor Sólido
DATOS DEL SUBCONDUCTOR	
Resistencia DC (20° C)	0,0556 Ohm/km
GMR (Radio Medio Geométrico)	13,95 mm
Diámetro externo	30,66 mm
Temperatura máxima de operación	80° C
Resistencia DC (80° C)	0,0687 Ohm/km

Las matrices de impedancias y admitancias naturales son de 5x5, en donde se considera que el neutro o cable de guardia posee el mismo voltaje que la tierra. Para obtener los datos requeridos para la construcción, se utilizan las matrices de impedancia y admitancia reducidas a 3x3, en la que los efectos del neutro y tierra están absorbidos dentro de las impedancias y admitancias propias y mutuas de los conductores de fase [4].

TABLA III
DATOS DEL CABLE DE GUARDIA OPGW-48B4-90

CABLE DE GUARDIA	
OPGW-48B4-90	
Voltaje nominal	500 kV
Corriente nominal (De corta duración 1s)	8 kA
Número de subconductores	1
Modelo del conductor	Conductor Sólido
DATOS DEL SUBCONDUCTOR	
Resistencia DC (20° C)	0,0557 Ohm/km
GMR (Radio Equivalente)	6,6198 mm
Diámetro externo	13,4 mm
Temperatura máxima de operación	80° C
Resistencia DC (80° C)	0,5574 Ohm/km

TABLA IV
DATOS DEL CABLE DE GUARDIA ACERO GALVANIZADO

CABLE DE GUARDIA	
ACERO GALVANIZADO 3/8"	
Voltaje nominal	500 kV
Corriente nominal	0,0172473 kA
Número de subconductores	1
Modelo del conductor	Conductor Sólido
DATOS DEL SUBCONDUCTOR	
Resistencia DC (20° C)	3,9815 Ohm/km
GMR (Radio Medio Geométrico)	3,707 mm
Diámetro externo	9,144 mm
Temperatura máxima de operación	80° C
Resistencia DC (80° C)	4,9275 Ohm/km

TABLA V
DISPOSICIÓN GEOMÉTRICA DE LOS CONDUCTORES DE FASE

COORDENADAS DE LAS FASES [m]		
Fase	x	y
a	-11,48	41,55
b	0	41,55
c	11,48	41,55

TABLA VI
DISPOSICIÓN GEOMÉTRICA DE LOS CABLES DE GUARDIA

COORDENADAS DEL CABLE DE GUARDIA [m]		
Cable de guardia	x	y
Acero galvanizado	-9,06	52,5
OPGW	9,06	52,5

Entonces, se tienen las siguientes matrices:

Matriz reducida de impedancias:

$$Z = \begin{bmatrix} 0,0964 + 0,5490j & 0,0846 + 0,2384j & 0,0840 + 0,1830j \\ 0,0846 + 0,2384j & 0,1017 + 0,5313j & 0,0877 + 0,2253j \\ 0,0840 + 0,1830j & 0,0877 + 0,2253j & 0,1024 + 0,52367j \end{bmatrix} \Omega/\text{km}$$

Matriz reducida de admitancias:

$$Y = \begin{bmatrix} 0 + 4,20659j & 0 - 1,01454j & 0 - 3,69416j \\ 0 - 1,01454j & 0 - 4,45651j & 0 - 1,01149j \\ 0 - 3,69416j & 0 - 1,01149j & 0 + 4,21274j \end{bmatrix} \text{ uS/km}$$

El modelo a escala de la línea de transmisión de 500 kV Coca Codo Sinclair – El Inga será utilizado en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia, por lo que debe transformarse a los valores base de 220 V y 5 kVA.

La línea de transmisión real tiene un SIL de 968,45 MW, por lo que se asume la potencia base de 1000 MVA y voltaje base de 500 kV. Lo deseado es que los fenómenos que ocurren en la línea de transmisión real se reproduzcan de manera similar en el modelo a escala. Es evidente que las mediciones de las señales eléctricas reales serán diferentes a las mediciones obtenidas en el modelo, este problema es posible resolver igualando los valores en por unidad del modelo a escala con los valores en por unidad de la línea de transmisión real, como se muestran en las ecuaciones (1) y (2).

$$\{Z\}_{pu \text{ modelo}} = \{Z\}_{pu \text{ real}} \quad (1)$$

$$\frac{Z_{\text{modelo}}}{Z_{\text{base modelo}}} = \frac{Z_{\text{real}}}{Z_{\text{base real}}}$$

$$\{Y\}_{pu \text{ modelo}} = \{Y\}_{pu \text{ real}} \quad (2)$$

$$\frac{Y_{\text{modelo}}}{Y_{\text{base modelo}}} = \frac{Y_{\text{real}}}{Y_{\text{base real}}}$$

Con iguales valores en por unidad, la medición de una señal eléctrica que se registre en el modelo a escala convertida en por unidad, será equivalente a la medición de la misma señal eléctrica presente en la línea de transmisión real. El proceso para el cálculo de los valores en por unidad es el siguiente:

Bases para la línea Coca Codo Sinclair – El Inga:

$$V_{\text{base real}} = 500 \text{ kV}, S_{\text{base real}} = 1000 \text{ MVA}$$

$$Z_{\text{base real}} = \frac{V_{\text{base}}^2}{S_{\text{base}}} = \frac{(500 \text{ kV})^2}{1000 \text{ MVA}} = 250 \Omega$$

$$Y_{\text{base real}} = \frac{1}{Z_{\text{base}}} = \frac{1}{250 \Omega} = 0,004 \text{ S}$$

Bases para el modelo a escala de la línea de transmisión:

$$V_{\text{base modelo}} = 220 \text{ V}, S_{\text{base modelo}} = 5 \text{ kVA}$$

$$Z_{\text{base modelo}} = \frac{V_{\text{base}}^2}{S_{\text{base}}} = \frac{(220 \text{ V})^2}{5 \text{ kVA}} = 9,68 \Omega$$

$$Y_{\text{base modelo}} = \frac{1}{Z_{\text{base}}} = \frac{1}{9,68 \Omega} = 0,1033 \text{ S}$$

De modo que los factores de escalamiento para las matrices de impedancia y admitancia en por unidad de longitud del modelo están dados por las ecuaciones (3) y (4).

$$\{Z\}_{\text{modelo}} = \frac{Z_{\text{base modelo}}}{Z_{\text{base real}}} * \{Z\}_{\text{real}} \quad (3)$$

$$\{Y\}_{\text{modelo}} = \frac{Y_{\text{base modelo}}}{Y_{\text{base real}}} * \{Y\}_{\text{real}} \quad (4)$$

Los valores numéricos de los factores de escalamiento para las matrices de impedancia y admitancia en por unidad de longitud del modelo son:

$$\{Z\}_{\text{modelo}} = 0,03872 * \{Z\}_{\text{real}}$$

$$\{Y\}_{\text{modelo}} = 25,8284 * \{Y\}_{\text{real}}$$

El modelo a escala de la línea de transmisión está integrado por un equipo de dos módulos de 63 km de longitud cada uno, es decir, la línea de transmisión se encuentra segmentada a la mitad de su trayectoria total. Considerando la longitud de cada módulo, las ecuaciones de las matrices de impedancia y admitancia en por unidad son expresadas de la siguiente forma:

$$\{Z\}_{\text{modelo}} = 2,43936 * \{Z\}_{\text{real}}$$

$$\{Y\}_{\text{modelo}} = 1627,06612 * \{Y\}_{\text{real}}$$

Una vez calculados los factores de escalamiento para los módulos de 63 km de longitud, las matrices de impedancia y admitancia, considerando la operación de los módulos a 60 Hz, son:

$$\{R\}_{\text{modelo}} = \begin{bmatrix} 0,235293 & 0,206510 & 0,205028 \\ 0,206510 & 0,248156 & 0,214155 \\ 0,205028 & 0,214155 & 0,249810 \end{bmatrix} \Omega$$

$$\{L\}_{\text{modelo}} = \begin{bmatrix} 3,55273 & 1,54269 & 1,18412 \\ 1,54269 & 3,43781 & 1,45810 \\ 1,18412 & 1,45810 & 3,38839 \end{bmatrix} \text{ mH}$$

$$\{C\}_{\text{modelo}} = \begin{bmatrix} 18,1549 & 4,37858 & 1,59433 \\ 4,37858 & 19,2335 & 4,36541 \\ 1,59433 & 4,36541 & 18,1814 \end{bmatrix} \mu\text{F}$$

III. MODELO ELECTROMAGNÉTICO EQUIVALENTE

La matriz de inductancias y resistencias del modelo a escala contiene los parámetros serie de la línea de transmisión constituidos por resistencias y reactancias inductivas de bobinas de núcleo de aire en conjunto con bobinas de núcleo de hierro. Adicionalmente se considera la resistencia común Rg presente en los términos fuera de la diagonal de la matriz de impedancias, como se muestra en Figura 1.

El acoplamiento inductivo está representado por bobinas de núcleo de aire, las mismas que también son parte de las inductancias propias de la matriz de inductancias.

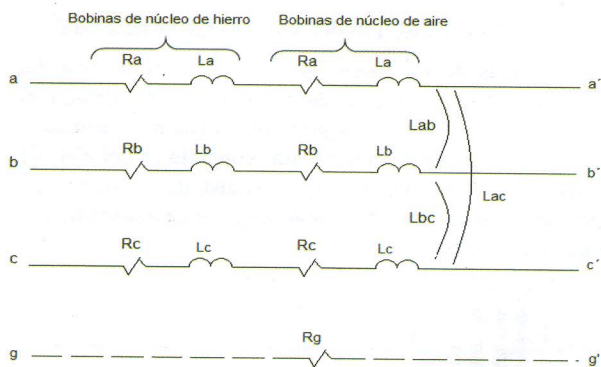


Figura 1 Modelo electromagnético equivalente

La matriz de impedancias a escala queda representada de la siguiente manera:

$$Z = \begin{bmatrix} R_a + j\omega(L_a + M_{aa}) & R_g + j\omega(M_{ab}) & R_g + j\omega(M_{ac}) \\ R_g + j\omega(M_{ba}) & R_b + j\omega(L_b + M_{bb}) & R_g + j\omega(M_{bc}) \\ R_g + j\omega(M_{ca}) & R_g + j\omega(M_{cb}) & R_c + j\omega(L_c + M_{cc}) \end{bmatrix}$$

Donde:

- La, Lb y Lc: Inductancias propias de las bobinas de núcleo de hierro de cada fase
- Ra, Rb y Rc: Resistencias de cada fase que, en el modelo a escala constituyen las resistencias del conductor de las bobinas de núcleo de hierro y de hierro.
- Rg: Resistencia de retorno a tierra
- Maa, Mbb y Mcc: Inductancia propia de las bobinas de núcleo de hierro de cada fase
- Mab, Mbc, Mca: Inductancia mutua de las bobinas de núcleo de hierro

En la construcción del modelo electromagnético, las bobinas de núcleo de hierro representan el acoplamiento inductivo y por ende los elementos fuera de la diagonal de la matriz de inductancias [5]. En razón de que se usan tablas de constantes y relaciones de distancias entre planos y entre ejes, así como con el número de vueltas de las bobinas, el cálculo de las inductancias propias y mutuas de bobinas circulares requiere de criterios iniciales de diseño. Las especificaciones del diseño de las bobinas de núcleo de hierro se obtienen con el software "INDUCTANCIA_BOBINAS_NUCLEO_AIRE", desarrollado en la referencia [6].

Con el programa se determinan los parámetros de las bobinas: distancia entre planos, radios, número de vueltas, y tamaño del conductor.

En la construcción de las bobinas de núcleo de hierro y de aluminio, se escoge el conductor 10 AWG. Una vez especificados los parámetros de las bobinas de núcleo de hierro, se procede a ingresar los valores en el software y se desarrolla el siguiente procedimiento:

- Establecer el radio inicial R de las bobinas de las fases A, B y C.
- Establecer el número inicial de vueltas de cada bobina.
- Establecer la distancia vertical c entre planos de bobinas, que por lo general debe ser lo más cercana posible, ya que asegura un mejor acoplamiento.
- Establecer dimensiones de ancho y profundidad de la bobina.
- Obtener las tablas de inductancia mutua generadas por el software para determinar el correcto posicionamiento de las bobinas de núcleo de hierro.
- Si los valores de inductancia mutua entregados por el software no son los deseados, es decir, no satisfacen los valores que representan al acoplamiento magnético requerido, se sugiere que los radios y el número de vueltas sean modificados aleatoriamente hasta buscar el valor de las inductancias mutuas "deseadas".
- Si los valores de inductancias mutuas son aceptables, se procede a calcular el valor de las inductancias propias con ayuda del software, que también posee esa interfaz. Se debe recalcar que los valores de las inductancias propias deben ser menores a los valores de la diagonal principal de la matriz de inductancias.

Los resultados obtenidos del programa son aproximados al valor de la inductancia mutua deseada, por lo que se realiza una interpolación en base a la distancia entre planos y ejes, obteniendo así los resultados de las Tablas VII y VIII.

TABLA VII
VALORES DE INDUCTANCIAS PROPIAS OBTENIDAS PARA LAS FASES A, B Y C

INDUCTANCIAS PROPIAS			
DATOS BOBINAS	FASE A	FASE B	FASE C
NÚMERO DE VUELTAS	54	54	60
RADIO [m]	0,22	0,22	0,19
ANCHO BOBINA [m]	0,015	0,015	0,015
PROFUNDIDAD BOBINA [m]	0,036	0,036	0,036
NÚMERO DE CAPAS	9	9	10

TABLA VIII
VALORES DE LAS DISTANCIAS ENTRE EJES Y PLANOS DE LAS BOBINAS DE NÚCLEO DE AIRE

Fases	Distancia entre planos [m]	Distancia entre ejes [m]
a	0,02	0,0449
b	0,02	0,0431
c	0,04	0,0425

Con las distancias entre ejes y entre planos de las bobinas de núcleo de hierro, se procede a establecer las coordenadas a las cuales van a ser posicionadas en el momento de la construcción, como se muestran en la Tabla IX.

TABLA IX
COORDENADAS DEL CENTRO DE LAS BOBINAS DE NÚCLEO DE AIRE

Fase	Posición (x ; y) [cm]
A	(0 ; 0)
B	(2,3 ; 3,9)
C	(4,3 ; 0)

Una vez obtenidos los valores de las inductancias propias, se calcula el valor de las bobinas de núcleo de hierro, cuyas especificaciones se detallan en la Tabla X. Las inductancias de las bobinas de núcleo de hierro deben complementar los valores de la diagonal principal de la matriz de impedancias.

TABLA X
VALORES DE LAS BOBINAS DE NÚCLEO DE HIERRO PARA CADA MÓDULO

Lmodelo [H]	Laire [H]	Lhierro= Lmodelo - Laire [H]
0,00355273	0,00245	0,001101
0,00343781	0,00245	0,000986
0,00338839	0,00249	0,000899

Para el diseño de las bobinas de núcleo de hierro se parte de la ecuación (5).

$$N = \sqrt{\frac{l_g L}{0,4\pi A_c F \cdot 10^{-8}}} \text{ vueltas} \quad (5)$$

Una vez conocida el área del núcleo ferromagnético, se escoge el tipo de láminas EI, llamadas así por la forma que tienen las piezas; y, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla XI.

TABLA XI
ESPECIFICACIONES PARA LAS BOBINAS DE NÚCLEO DE HIERRO

L	L [mH]	Factor	l _g [cm]	A _c [cm ²]	N [vueltas]
La	1,101	1,289	0,2	8,4527	38
Lb	0,98	1,289	0,2	8,4527	37
Lc	0,89	1,289	0,2	8,4527	36

Con las especificaciones de las bobinas de núcleo de aire y de hierro, se procede a su construcción. En el caso de las bobinas de núcleo de aire se realiza el enrollado con ayuda de moldes de madera, en cuanto a las bobinas de núcleo de hierro se realiza el enrollado sobre carretes preparados para el tipo de núcleo especificado.

En cada bobina es necesario colocar papel aislante entre cada capa, con el fin de asegurar un adecuado aislamiento.

Una vez construidas las bobinas se procede a colocarlas en una estructura de madera, con soportes y elementos de sujeción.

IV. MODELO ELECTROSTÁTICO EQUIVALENTE

Las admitancias de las líneas de transmisión provienen del efecto electrostático presente en los conductores debido al voltaje aplicado. Para conseguir un modelo físicamente realizable es necesario formar un conjunto adicional de coeficientes de capacitancia. El diagrama de acoplamiento electrostático para el modelo a escala de línea de transmisión se muestra en la Figura 2.

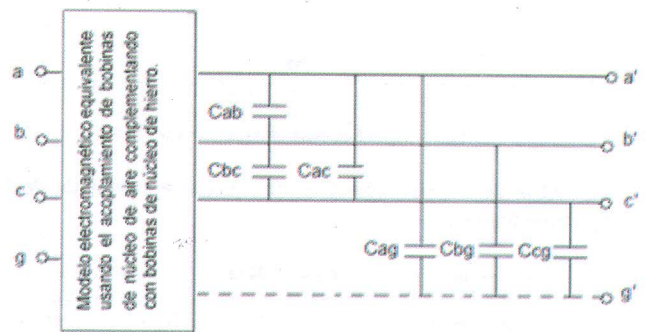


Figura 2 Modelo de acoplamiento electrostático de cada módulo

En la representación de parámetros concentrados mediante el modelo π, se requiere dividir el valor de la capacitancia en dos segmentos, sin embargo, debido a aspectos constructivos se simula todo el efecto electrostático en un solo lado de cada uno de los módulos, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla XII.

TABLA XII
ESPECIFICACIONES DE CAPACITORES PARA LOS MÓDULOS DEL MODELO A ESCALA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Grupo	Detalle	Arreglo	Cantidad	Valor Estándar [μF]	Capacitancia [μF]
A	Cab	Simple	1	5	5
	Cbc	Simple	1	5	5
	Cac	Serie	3	5	1,667
B	Cag	Serie	2	5	12,5
		Paralelo	1	10	
	Cbg	Simple	1	10	10
	Ccg	Serie	2	5	12,5
Paralelo		1	10		

V. RESULTADOS [7]

En la Figura 3 se muestran los dos módulos del modelo a escala de la línea de transmisión. Además, se implementa un circuito de control en el módulo 2 para el estudio de fallas de cortocircuito.

Las pruebas que se realizan al modelo a escala de la línea de transmisión son: obtención de parámetros eléctricos, fallas de cortocircuito y flujos de potencia. En las Tablas XIII, XIV, XV, y XVI se presenta un resumen de los resultados de las pruebas indicadas.

De los resultados de las pruebas de cortocircuito, los errores en las inductancias propias y mutuas están entre 0,06% y 2,76% respecto a los valores de la simulación, verificándose la validez del modelo electromagnético construido. Respecto a los resultados de las pruebas de circuito abierto, los errores entre la simulación y el modelo a escala se encuentran alrededor de 14%, comprobándose las diferencias dadas por los capacitores estándar utilizados en los arreglos del modelo.

Para el estudio de flujos de potencia se usa el modelo a escala de la línea de transmisión, como se ilustra en el esquema de la Figura 4.

Como generador se tiene el conjunto Ward- Leonard existente en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas y como carga el grupo motor-generador de la mesa N° 4.

Para el registro de mediciones se hace uso de la instrumentación computarizada disponible en el equipo Lab Volt de Festo Didactic, que a través del software LVDAC-EMS, se monitorea, procesa y despliega señales eléctricas en tiempo real con una gran precisión.

TABLA XIII
RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO REALIZADA EN EL MODELO A ESCALA

Inductancia	Simulación [mH]	Modelo a escala [mH]	Error %
Laa	7,105	7,110	0,06%
Lab	3,085	3,094	0,27%
Lac	2,368	2,373	0,18%
Lbb	6,876	6,873	0,03%
Lba	3,085	3,094	0,27%
Lbc	2,916	2,989	2,49%
Lcc	6,777	6,861	1,25%
Lca	2,368	2,401	1,40%
Lcb	2,916	2,997	2,76%

TABLA XIV
RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO REALIZADA EN EL MODELO A ESCALA

Capacitancia	Teórico [μ F]	Modelo a escala [μ F]	Error %
Caa'	36,3098	41,4416	14,13%
Cbb'	38,467	43,6735	13,53%
Ccc'	36,3629	41,4376	13,96%

TABLA XV
COMPARACIÓN DE CORRIENTES SIMÉTRICAS RMS DE FALLA DE CORTOCIRCUITO DEL MODELO Y LA SIMULACIÓN

Resultados	Corriente simétrica de cortocircuito en la mitad de la línea [kA]			Corriente simétrica de cortocircuito al final de la línea [kA]		
	Simul.	Mod.	Error %	Simul.	Mod.	Error %
Falla de cortocircuito fase-tierra	8,30	8,16	1,68	4,13	3,96	4,29
Falla de cortocircuito fase-fase	12,42	12,75	2,66	6,21	6,84	9,21
Falla de cortocircuito fase-fase-tierra	13,32	13,39	0,53	6,66	6,97	4,45
Falla de cortocircuito trifásico	14,35	14,20	1,05	7,17	7,37	2,71

Los resultados obtenidos en el modelo muestran que las fallas de cortocircuito se reproducen satisfactoriamente, ya que se obtienen valores similares a los de la línea real simulada en el programa Power Factory con porcentajes de error menores a 9,21%.

TABLA XVI
RESULTADOS DE LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA DEL MODELO A ESCALA Y DE LA SIMULACIÓN

Caso	Modelo a Escala				Simulación en Power Factory			
	V ₁	V ₂	P _{pér}	Q _{pér}	V ₁	V ₂	P _{pér}	Q _{pér}
	[V]	[V]	[W]	[VAr]	[V]	[V]	[W]	[VAr]
1	208,7	208,9	0,95	-796,3	208,7	209,2	1,08	-797,3
2	210	212,9	1,31	-807,8	210	211,8	1,34	-806,9
3	212,9	218,8	2	-825,5	212,9	216,8	1,7	-830,1
4	210,6	214,2	1,54	-809,4	210,6	212,9	1,5	-809,4
5	210,6	214,7	1,65	-808,7	210,6	213,1	1,57	-809,2
6	211,8	217,9	2,33	-808,4	211,8	215,2	1,91	-814,2
7	213,3	220,6	2,93	-810,1	213,3	217,7	2,36	-820,1
8	214	223,3	3,91	-798,4	214	219,1	2,73	-820
9	215	229,7	14,41	-555,1	215	224,2	12,58	-616,3
10	216,3	235	17,59	-500,5	216,3	225,5	12,45	-630
11	220,2	240,8	20,19	-474,5	220,2	233,1	15,59	-606
12	220,7	241,5	20,35	-475,8	220,7	233,7	15,56	-611,5



Figura 3 Modelo físico a escala de la línea de transmisión

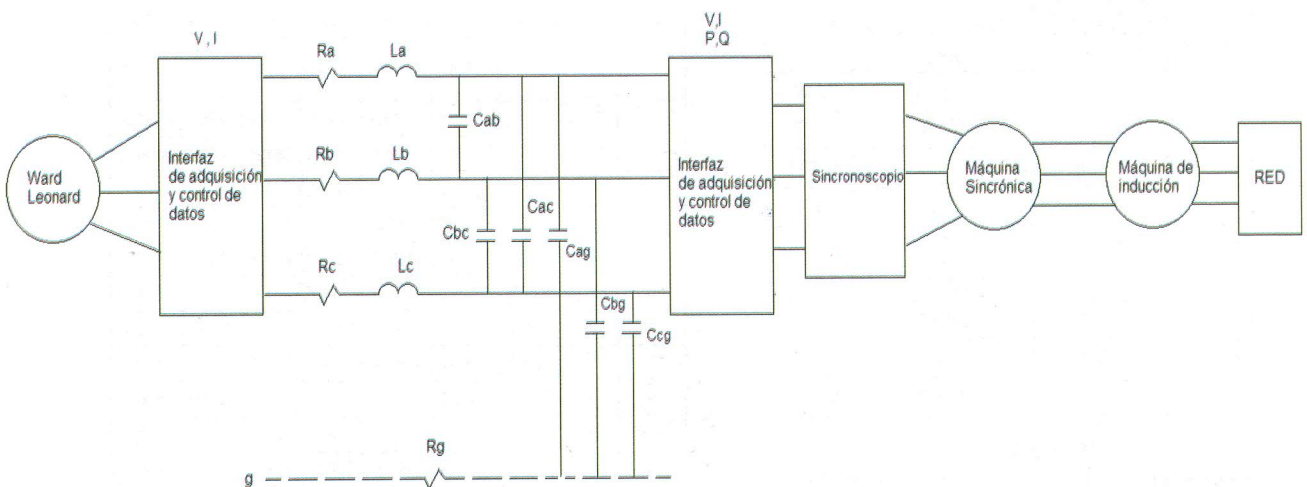


Figura 4 Esquema para el estudio de flujos de potencia

Para comparar los valores presentes en el modelo y aquellos simulados en Power Factory, se toma como ejemplo el caso 5, notándose que los valores de voltaje de recepción registrados en el modelo y simulación es de 214,65 V y de 213,13 V, respectivamente.

Para el mismo caso, en cuanto a las pérdidas de potencia se observa que en el modelo se tiene 1,65 W y -808,66 VAR y en la simulación 1,57 W y -809,16 VAR, por lo que se confirma que el modelo se comporta satisfactoriamente.

VI. CONCLUSIONES

El diseño y construcción de los modelos electromagnético y electrostático de una línea de transmisión de 500 kV, permite disponer de una representación física trifásica a escala, con parámetros serie, paralelo, mutuos y comunes, para realizar investigación de fenómenos electromagnéticos, esquemas de protecciones de líneas de transmisión, con y sin generación intermedia, y simulaciones en estado estable y transitorio, así como de pérdidas incrementales de potencia.

Los valores de potencia aparente 5 kVA y voltaje 220 V, tomados como bases para el diseño y construcción, facilitan la incorporación de la línea de transmisión a un modelo a escala de un sistema eléctrico de potencia de laboratorio.

La representación de los acoplamientos magnéticos mutuos entre los conductores de las fases A, B y C, así como con el conductor de tierra se consigue mediante bobinas de núcleo de aire. El diseño de las bobinas permite obtener el número de vueltas, radio, posicionamiento entre ejes y entre planos para la respectiva construcción. Las impedancias de estas bobinas se suman a aquellas de las bobinas de núcleo de hierro, a fin de conseguir el valor de las impedancias propias.

Los parámetros del modelo electromagnético, representado por las inductancias propias y mutuas, obtenidos mediante pruebas de cortocircuito, tienen valores de inductancias con porcentajes de error menores a 2,76%, respecto a los valores dados en la matriz de impedancias de la línea de transmisión real, escalada a las bases del laboratorio.

Los parámetros del modelo electrostático, dados por las capacitancias entre fases y fase-tierra, obtenidos de los arreglos serie y paralelo de capacitores, tienen porcentajes de error menores al 14,13%, respecto a los valores dados en la matriz de admitancias de la línea de transmisión real, escalada a las bases del laboratorio. Estas mayores diferencias se dan debido a que en el mercado hay únicamente capacitores estandarizados que dificultan llegar a valores más cercanos a los requeridos.

Con los arreglos de capacitores concentrados en los extremos de cada uno de los dos módulos, se tiene un aumento del voltaje de hasta un 2,3% en el extremo receptor respecto al voltaje del extremo emisor.

En el estudio de fallas, los errores en las corrientes rms de cortocircuitos simétricos y asimétricos son menores a 2,66% y 9,21%, a la mitad y al final del modelo de la línea, respectivamente, respecto a los valores dados por la simulación en Power Factory. Los errores mayores se tienen en la falla fase-fase, en razón de que los errores de las capacitancias están involucrados en su cálculo; en tanto que, en las fallas que involucran tierra, parte de su efecto es cancelado por la conexión a tierra.

Los flujos de potencia bajo diferentes condiciones de carga, realizadas en el modelo a escala de la línea de transmisión, son de hasta 3112 VA, valores menores al SIL del modelo de línea, que es de 5324 W, con pérdidas de potencia activa de 0,41% y potencia reactiva de -9,52%. Es decir que, la línea tiene excedentes de potencia reactiva, producidos en sus arreglos de capacitores; en consecuencia, para todos los casos, hay incrementos de voltaje en el extremo de recepción de hasta un 9,35%.

REFERENCIAS

- [1] CELEC EP - TRANSELECTRIC, "Sistema de Transmisión de Extra Alta Tensión y Sistemas Asociados", Quito, 2013.
- [2] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Sistema de transmisión 500 kV: <http://www.energia.gob.ec/sistema-de-transmision-500-kv/>. [Último acceso: 15 03 2018].
- [3] CELEC EP - TRANSELECTRIC, "Especificación técnica del tipo de torre y conductores de la Línea de Transmisión de 500 kV", Quito, 2013.
- [4] C. W. Aguirre Cárdenas, "Estudios Eléctricos de Sistemas de Potencia para la Carrera de Ingeniería Eléctrica utilizando el Software Power Factory 13.1 de DIgSILENT", Quito: EPN, 2008, pp. 47-49.
- [5] A. Domijan, "Overall Conceptual Development, Planning, and Design Aspects of an Electric Power System Laboratory with an Energy Management System Control Center", Arlington, University of Texas at Arlington, 1986, pp. 114-124.
- [6] J. C. Enríquez Quelal, "Conceptualización de la Red de Transmisión de 230 kV para un Modelo a Escala del Sistema Nacional Interconectado Reducido", Quito, EPN, Proyecto de titulación, 2014.
- [7] M. C. Ramos Chavez y S. R. Tupiza Tupiza, "Diseño y Construcción de un Modelo a Escala de la Línea de Transmisión de 500 kV Coca Codo Sinclair – El Inga para el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia", Quito, EPN, Proyecto de titulación, 2018.

BIOGRAFÍAS



María Carolina Ramos Chávez: Nació el 17 de julio de 1992, graduada de Ingeniera Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son Sistemas Eléctricos de Potencia y Máquinas Eléctricas.



Sara Raquel Tupiza Tupiza: Nació el 25 de febrero de 1992, graduada de Ingeniera Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son Distribución de Energía Eléctrica, Centrales de Generación y Máquinas Eléctricas.



Jesús Játiva Ibarra: Ingeniero Eléctrico (1981) de la Escuela Politécnica Nacional; Master of Science in Electrical Engineering (1988) y Doctor of Philosophy Ph.D. (1991) de la Universidad de Texas en Arlington Estados Unidos de América. Cursos de postgrado en Energy Conservation in Industry realizado en Suecia en 1995 y en Development Planning Techniques

with Computer Applications efectuado en los Países Bajos en 1998. Cuenta con más de treinta años de experiencia en actividades de Planificación, Operación, Administración y Economía de sistemas eléctricos de potencia. Actualmente es Profesor Principal de la EPN.