

## Modelación y Validación en ATP de los Cables Subterráneo y Submarino del Sistema de Subtransmisión Baltra - Santa Cruz

L. Dután

CELEC EP TRANSELECTRIC  
luis.dutan@celec.gob.ec

### Resumen

En este trabajo, basados en el estado del arte, se presentan los criterios usados para la modelación y validación de los cables tripolares subterráneo y submarino del sistema de subtransmisión Baltra – Santa Cruz. Para modelar los cables en rutinas Cable Parameters incluida en programas del tipo EMTP, se realizó un tratamiento previo de los datos de diseño y constructivos de los cables; además, para analizar el cable tripolar subterráneo fue necesario agregar a su modelo una armadura ficticia de tal manera que se pueda modelar como un cable tipo “tubo” (Pipe). El estudio de transitorios electromagnéticos de energización de la línea se realizó usando el software ATP, pero debido a que el estado del arte indica limitaciones en el modelo de cables y líneas aéreas no simétricas cuando se usa Bergeron o JMarti, incorporados en ATP, se realizó un análisis que permitió determinar hasta qué punto es válido el modelo JMarti mediante una comparación de sus respuestas transitorias de voltaje con las ofrecidas por el modelo WideBand, incorporado en EMTP-RV el cual es considerado el modelo más preciso de líneas y cables en la actualidad. Para este propósito los modelos JMarti de cable submarino y subterráneo fueron ajustados con un valor de frecuencia de acuerdo a lo sugerido por CIGRÉ. Los resultados indican que el modelo JMarti ofrece señales de voltaje aceptables únicamente para el conductor energizado, mientras que para voltajes inducidos en otros conductores de fase y pantallas y armaduras metálicas el modelo falla.

**Palabras clave**— Cables tripolares, Modelamiento, ATP, EMTP-RV, JMarti, WideBand, sobrevoltajes.

### Abstract

In this paper, the criteria used for modeling and validation of underground and submarine tripolar cables of Baltra Santa Cruz power system are presented. To model cables with Cable Parameters routines, inserted in EMTP type programs, pretreatment of design data and construction of the cables was performed. Also, to analyze the underground cable was necessary to add to your model a fictional armor so that can be modeled as type “Pipe”. The study of electromagnetic transients line energization was performed using the ATP software, but because the state of the art indicates limitations on cable and not symmetrical aerial transmission lines when Bergeron or JMarti models, incorporated into ATP, an analysis was carried out that allowed to determine to what extent is valid the JMarti model by comparing its transient response voltage with those offered by the WideBand model, built in EMTP-RV, which is considered the most accurate line and cable model today. For this purpose, the JMarti models for submarine and underground cable were adjusted with a frequency value according to suggested by CIGRÉ. The results indicate that the JMarti model provides acceptable voltage signals only to the energized conductor, while for other voltages induced in phase conductors and screens and metal armatures model fails.

**Index Terms**— Tripolar Cable, Modeling, ATP, EMTP-RV, JMarti, WideBand, overvoltage.

Recibido: Colocar fecha de envío: 11-09-2016 Aprobado tras revisión: 09-12-2016

Forma sugerida de citación: Dután, L. (2017). “Modelación y Validación en ATP de los Cables Subterráneo y Submarino del Sistema de Subtransmisión Baltra - Santa Cruz”. Revista Técnica “energía”. No. 13, Pp. 106-116 ISSN 1390-5074.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una línea de transmisión eléctrica (línea aérea o cable) está formada por elementos (parámetros) resistivos ( $R$ ), capacitivos ( $C$ ) e inductivos ( $L$ ) cuyos valores no son constantes sino que varían con la frecuencia de acuerdo al tipo de transitorio desarrollado. Los estudios de transitorios electromagnéticos de frente lento y rápido que involucren la conexión de líneas aéreas y/o cables subterráneos son importantes debido a que pueden sugerir la presencia de altos valores de voltajes en el extremo abierto y en puntos de variación de impedancia debido a cambios de línea aérea a cable subterráneo y viceversa; los resultados obtenidos de simulaciones deben basarse en un correcto modelamiento de los elementos del circuito bajo estudio y en el conocimiento de las bondades y limitaciones de los modelos usados en programas del tipo ElectroMagnetic Transients Program (EMTP). El software Alternative Transients Program (ATP) es uno de ellos y usa el modelo Frequency Dependance (FD), conocido también como modelo JMarti (JM), para modelar líneas y cables, mismo que debe ser ajustado de una manera especial para que presente resultados confiables; aun así, para cierto tipo de estudios, únicamente algunos valores de los resultados son ciertos mientras que otros no son confiables o, incluso, erróneos. El modelo WideBand (WB) es el más avanzado en la actualidad y no necesita de un ajuste especial, su formulación y solución de las ecuaciones se realizan en cantidades de fase; viene incorporado en el software EMTP-RV.

En general, las líneas aéreas y cables tienen un comportamiento fuertemente dependiente de la frecuencia. En programas del tipo EMTP, que solucionan las ecuaciones de línea y/o cable en el dominio modal (como por ejemplo ATP), esta dependencia es tomada en cuenta mediante una función de transferencia matricial (matriz  $Q$  cuyos elementos son dependientes de la frecuencia) que sirve para pasar el modelo de línea/cable del dominio de fase al dominio modal, solucionar las ecuaciones en ese marco de referencia y las soluciones a pasar al dominio de fase. Este proceso es matemáticamente muy complejo y difícil de implementar por lo que en modelos tipo Bergeron o JM, presentes en ATP,  $Q$  usa un valor fijo de frecuencia que es ingresado por el usuario (para líneas aéreas simétricas este valor es de 5000 Hz [2] con muy buenos resultados); si este valor no es adecuado los resultados se alejarán de lo real, incluso puede provocar la no convergencia del modelo. El reporte técnico WG C4.502 de CIGRÉ [1] sugiere un método de cálculo, usado en este trabajo, que estima este valor de frecuencia para modelar cables en modelos Bergeron o JM; esta es

una solución aproximada por lo que resulta necesario conocer sus límites analizando la respuesta transitoria del modelo. Una manera de validar consiste en comparar la respuesta de señales de voltajes de núcleos y pantallas en el extremo abierto de la línea/cable con la respuesta (señales de voltaje) obtenidos con un modelo avanzado como el WB. Para generar las señales de salida se aplica una fuente de voltaje continuo en el núcleo de una sola fase, mientras las otras fases y pantallas están puestas a tierra en un extremo. Entonces, las respuestas de JM y WB son comparadas.

El caso de estudio corresponde a la línea de subtransmisión Baltra – Santa Cruz, a 34.5 kV, formada por dos tramos aéreos, un submarino y un subterráneo. De acuerdo al estado del arte, se aplica una metodología para preparar los datos de los cables ofrecidos por el fabricante de tal manera que puedan ser ingresados en cualquier programa del tipo EMTP. El cable tripolar subterráneo no puede ser modelado directamente por lo que resulta necesario modificar su diseño mediante la inclusión de una armadura ficticia para usar el modelo “tubo” (Pipe en inglés).

Basados en el documento de CIGRÉ [1] se seleccionan los valores de la frecuencia mínima y máxima para el modelo JM con el objeto de determinar el rango de frecuencia con el cual este modelo ofrecerá ciertos resultados válidos, mientras que otros serán irreales debido a la capacidad computacional y, sobretodo, al algoritmo de solución de las ecuaciones de línea que toman en cuenta la dependencia de la frecuencia.

Este trabajo tiene importancia ya que actualmente CELEC EP Transelectric ha sido delegado para realizar el diseño, construcción y puesta en operación del sistema eléctrico petrolero a 138 kV que incluye, de manera preliminar, decenas de kilómetros de cable subterráneo, por lo que resulta necesario conocer a profundidad la modelación de cables para fines de diseño y operación en una red eléctrica.

El documento inicia presentando al sistema de subtransmisión Baltra – Santa Cruz, a 34.5 kV, con especial interés en los datos de diseño del cable subterráneo y submarino. Se realiza una revisión de los modelos de cables dependientes de la frecuencia que vienen incorporados en programas del tipo EMTP poniendo de manifiesto las limitaciones del modelo JM. Luego se realiza un tratamiento de datos eléctricos y constructivos de los cables para poder implementarlos en los programas ATP y EMTP-RV. Se muestra la adaptación realizada al cable subterráneo con la inclusión de una armadura ficticia para simularlo con el modelo Pipe. Para las

simulaciones, en ATP se usa el modelo JM ajustando la frecuencia de cálculo de la matriz  $Q$  de acuerdo a CIGRÉ y en EMTP-RV se usa el modelo WB en el cual no es necesario ingresar un valor de frecuencia de cálculo. Las respuestas de ambos modelos son comparadas para validar y establecer las limitaciones del modelo JM. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones.

## 2. SISTEMA DE SUBTRANSMISIÓN BALTRA – SANTA CRUZ

En las islas Galápagos están en operación varios proyectos de generación eléctrica a partir de fuentes renovables de energía para disminuir el consumo de combustibles fósiles. En las islas Baltra y Santa Cruz se han construido dos centrales de generación eléctrica que usan, como fuente primaria, energía renovable eólica y fotovoltaica. La central fotovoltaica está cercana a la ciudad de Puerto Ayora con una capacidad de 1.5 MW y la central eólica está ubicada en la isla de Baltra, a una distancia aproximada de 50 km de Puerto Ayora, con una capacidad inicial de 2.25 MW. Para transmitir la energía de esta última central se delegó a CELEC EP Transelectric el diseño, construcción y puesta en servicio de un sistema de subtransmisión que enlace la central eólica con la subestación de generación y distribución ubicada en Puerto Ayora. Este sistema se energizó en el año 2014. En la Fig. 1 se presenta su diagrama unifilar para el año 2014.

Mediante estudios, se determinó que la evacuación de la generación eólica sea realizada a nivel de 13.8 kV a través de una línea aérea hasta la subestación Baltra en donde se eleva el voltaje de 13.8 kV a 34.5 kV. Desde esta subestación la subtransmisión se la realiza a nivel de 34.5 kV hasta la subestación Santa Cruz donde se reduce el voltaje a 13.8 kV y, entonces, se conecta con la subestación Puerto Ayora (generación térmica y fotovoltaica y demanda de Elecgalápagos).

La línea de subtransmisión está formada por dos tramos aéreos de 20 km y 8 km, un tramo submarino de 1 km y un tramo subterráneo de 22 km. El tramo submarino es necesario para realizar el cruce del canal de Itabaca, mientras que, para provocar un mínimo impacto en el ecosistema del Parque Nacional Galápagos, es necesario usar el cable subterráneo en esa zona. El cable subterráneo y el submarino son tripolares, el cable submarino tiene una armadura de acero mientras que el cable subterráneo solamente tiene una envoltura de Policloruro de Vinilo (PVC).

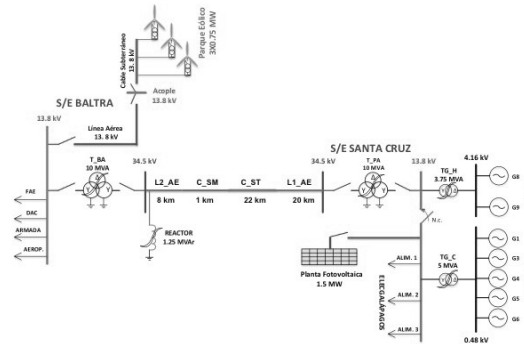


Figura 1: Diagrama unifilar del sistema Baltra – Santa Cruz, año 2014

Debido a que el interés de este trabajo se enfoca en el modelamiento de los cables, en la Fig. 2 y Fig.3 se detalla la geometría y composición del cable subterráneo y submarino según los datos ofrecidos por el fabricante.

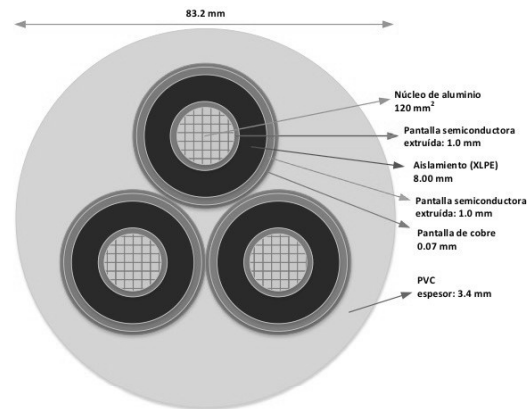


Figura 2: Geometría y datos del cable subterráneo

## 3. MODELACIÓN DE CABLES EN PROGRAMAS DEL TIPO EMTP

Los modelos de línea/cable disponibles en programas del tipo EMTP poseen una rutina común denominada Cable Parameters (CP), que simula el comportamiento eléctrico de la línea/cable a partir de la geometría y de las propiedades eléctricas de los conductores, medio aislante y retorno por tierra o agua [1]. En general, existen dos grupos de modelos que pueden ser usados de acuerdo al tipo de estudio. Estos son:

### 1) Modelos de parámetros concentrados:

- $\pi$ -nominal
- $\pi$  con transposición uniforme (cross-bonded)

- $\pi$ -exacto
- 2) **Modelos dependientes de la frecuencia:**
- **Parámetros constantes distribuidos (CP)**
  - **Modelo de línea dependiente de la frecuencia (FD)**

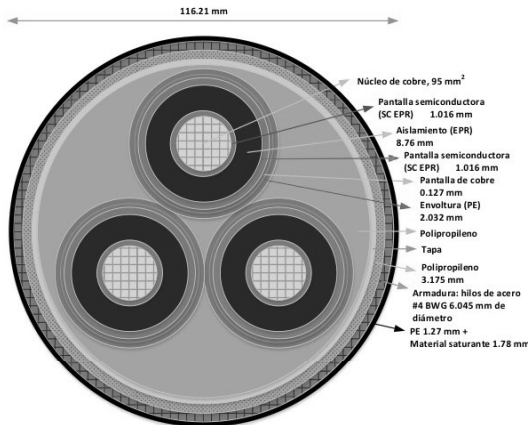


Figura 3: Geometría y datos del cable submarino

### 3.1. Modelos de parámetros concentrados

Consiste de circuitos polifásicos  $\pi$ -acoplados, donde los parámetros  $R$ ,  $L$  y  $C$  son calculados a una frecuencia dada (normalmente la frecuencia de estado estable). La principal desventaja de este modelo es que presenta una pobre respuesta de la frecuencia más allá de la frecuencia a la cual fueron evaluados los parámetros. Para estudios de frente lento y rápido estos modelos no son aplicables; su utilidad se enfoca a estudios de estado estable, armónicos, resonancias, entre otros. Una revisión detallada se encuentra en [1].

### 3.2. Modelos de parámetros distribuidos

Toman en cuenta la naturaleza distribuida de los parámetros del cable, basado en la teoría de las ondas viajeras. En programas del tipo EMTP, las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de una línea aérea o un cable con  $n$  conductores en cantidades de fase tienen un primer tratamiento que consiste en desacoplar estas cantidades de fase en  $n$  ecuaciones diferenciales sin acoplamientos en el dominio modal por medio de una matriz de transformación lineal (cambio de referencia)  $Q$  de componentes real e imaginaria, tal como se muestra en (1) y (2) [11]. El sistema de ecuaciones es solucionado en el dominio modal. Luego, la misma transformación lineal es usada para convertir la solución modal a cantidades de fase y esta transformación es la

que mayor complejidad matemática presenta en su implementación debido a que  $Q$  es dependiente de la frecuencia, por lo que resulta necesario, para disminuir la carga computacional, calcular  $Q$  con un solo valor de frecuencia (en programas este valor es ingresado por el usuario) y usar únicamente su parte real, (las columnas de  $Q$  son rotadas para minimizar las partes imaginarias de sus elementos y los términos imaginarios resultantes son descartados)[5], lo que implica que  $Q$  se vuelve constante ( $Q$ ); esto reduce el tiempo de cálculo, pero sus resultados son exactos únicamente en líneas aéreas simétricas. En la Fig. 4 se esquematiza este proceso.

$$V_{\text{modal}} = Q^{-1} \cdot V_{\text{fase}} \quad (1)$$

$$I_{\text{modal}} = Q^{-1} \cdot I_{\text{fase}} \quad (2)$$

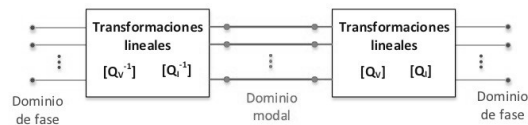


Figura 4: Esquema de solución de ecuaciones de línea en el dominio modal. [5]

#### 3.2.1 Modelo de parámetros constantes distribuidos (CP)

Los parámetros  $R$ ,  $L$  y  $C$  se asumen constantes y la conductancia  $G$  en paralelo es ignorada. La matriz  $Q$  se asume constante y real. Como el modelo está basado en una representación de la línea sin pérdidas, únicamente  $L$  y  $C$  son distribuidos y  $R$  está concentrada en las tres fases. Debido a que  $Q$  se asume constante y real, no es posible obtener una respuesta precisa en altas y bajas frecuencias. Este modelo puede ser suficiente para simular cables secundarios.

#### 3.2.2 Modelo de línea dependiente de la frecuencia (FD line)

La dependencia de la frecuencia y la naturaleza distribuida de los parámetros tienen una buena aproximación siempre que  $Q$  pueda ser asumida constante y real [2, 3]. El modelo necesita que el usuario ingrese el valor de una frecuencia (Frec. matrix en ATP) con el cual la matriz de transformación es calculada. Si bien este modelo es muy preciso para simular líneas aéreas simétricas, este modelo puede presentar problemas en el caso de cables, debido a que los elementos de  $Q$  pueden cambiar muy drásticamente con la frecuencia.

### 3.3 Modelos Avanzados

Existen modelos avanzados de cable que toman en cuenta la dependencia de la frecuencia y que vienen implementados en el software EMTP-RV, estos son:



### 3.3.1 Modelo $Q$ dependiente de la frecuencia (FDQ)

Toma en cuenta la dependencia de la frecuencia de los parámetros del cable y de la matriz de transformación modal  $Q$ . Este modelo tiene una gran precisión incluso representando el comportamiento del cable en altas y bajas frecuencias en la misma simulación [11].

### 3.3.2 Modelo de línea de ancho de banda Wideband (WB)

Es el modelo más avanzado que existe en la actualidad. Está basado en el *Modelo Universal de Línea* propuesto por Gustavsen et. al. [4]. A diferencia de los modelos anteriores que resolvían las ecuaciones en el dominio modal, este resuelve las ecuaciones directamente en el dominio de fases, por lo que ningún cambio de referencia es necesario. El comportamiento de la línea/cable es descrito por dos matrices dependientes de la frecuencia:  $Y_C$  y  $H$  [5]. Los valores de cada elemento de las matrices son obtenidos mediante el proceso matemático Vector Fitting [6]. Este proceso requiere más tiempo de simulación y demanda mayor trabajo computacional por lo que los investigadores se han esforzado en mejorar este método, para que los tiempos de cálculo y recursos computacionales sean menores [7] y [8].

### 3.4 Modelación de cables tripolares en software tipo EMTP

Los cables tripolares, esencialmente, consisten de tres cables monopoles contenidos dentro de una envoltura común. El diseño de la mayoría de los cables tripolares se apegan a una de las dos formas siguientes [5]:

- 1) Una pantalla metálica (sheath en inglés) para cada cable monopolar, los cables monopoles están encerrados dentro de un tubo o armadura metálica (pipe en inglés) tal como se presenta en la Fig. 5. Este diseño puede ser modelado usando la representación tipo "Pipe" presente en las rutinas CP.

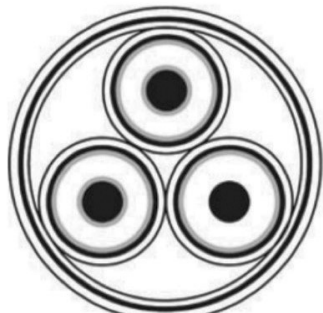


Figura 5: Cables tripolares encerrados en un tubo metálico [5]

- 2) Una pantalla metálica (sheath) por cada cable monopolar; a su vez, los cables monopoles están encerrados dentro de una tubería de material aislante, tal como se presenta en la Fig. 6. Hasta la actualidad, ninguna de las rutinas CP pueden modelar directamente este tipo de diseño de cables debido al aislamiento común que encierra a cada cable.

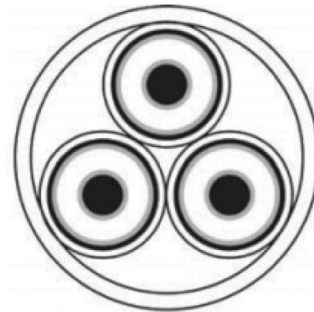


Figura 6: Cables tripolares encerrados en un tubo aislante [5]

Esta limitación puede ser resuelta mediante dos aproximaciones [5]:

- i. Colocar un material conductor muy delgado en el interior de la tubería aislante que no presente ferromagnetismo. Entonces, el cable puede ser representado como tipo Pipe en una rutina CP.
- ii. Asumir que los tres cables monopoles están directamente en la tierra, es decir, se ignora la tubería aislante.

### 4. TRATAMIENTO DE DATOS PARA MODELAMIENTO DE CABLES

Las rutinas CP simulan los cables aislados a partir de los datos geométricos y propiedades de los materiales del cable que son ofrecidos por el fabricante; sin embargo, estos datos no pueden ser ingresados de manera directa en las rutinas CP, por lo que un tratamiento es necesario. Según [9], esto se debe, principalmente, a:

- 1) Los datos pueden ser diferentes a los requeridos en los modelos de las rutinas CP.
- 2) Las rutinas CP no consideran ciertas características del cable como pantallas semiconductoras o pantallas formadas por hilos conductores, tal como se muestra en la Fig. 7.

Además, los datos de construcción del cable pueden ser diferentes a los datos de diseño.

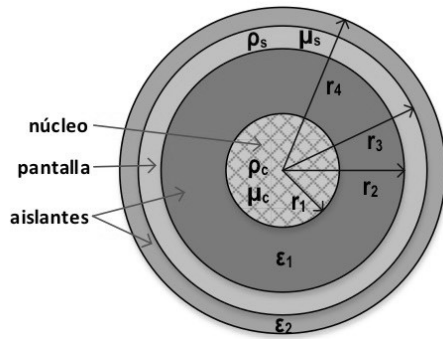


Figura 7: Modelo de cable monopolar en rutinas CP de programas del tipo EMTP

Con base en [9], a continuación se presenta un breve resumen de los elementos cuyos datos necesitan tratados.

#### 4.1. Núcleo

Las rutinas CP asumen un conductor homogéneo (sólido o cilíndrico). Para modelar el conductor del núcleo, las rutinas necesitan el radio y la resistividad del conductor; sin embargo, normalmente el núcleo es formado por hilos conductores. Por lo tanto, es necesario incrementar la resistividad  $\rho'_c$  del material del núcleo para tomar en cuenta el espaciamiento entre los hilos conductores, según (3).

$$\rho_c = \rho'_c \frac{\pi r_1^2}{A_c} \quad (3)$$

donde  $A_c$  es la sección transversal eficiente (nominal) del núcleo y  $r_1$  es el radio del conductor del núcleo. En la Tabla 1 se presenta las resistividades  $\rho$  de algunos materiales usados en cables.

Tabla 1: Resistividad de Materiales que Componen el Núcleo, Pantallas Metálicas y Armadura de Cables

Resistividad de materiales conductivos				
Material	Cobre	Aluminio	Plomo	Acero
$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	1.72 E-8	2.83 E-8	22 E-8	18 E-8

Si el fabricante proporciona la resistencia dc para el núcleo, la resistividad deseada puede calcularse de acuerdo a (4).

$$\rho_c = R_{DC} \frac{\pi r_1^2}{l} \quad (4)$$

#### 4.2 Aislamiento y pantallas semiconductoras

Las pantallas semiconductoras pueden tener un efecto apreciable en las características de propagación de un cable en términos de la velocidad de la onda, impedancia de la onda y la atenuación de la onda. Las

rutinas CP no permiten una representación explícita de las pantallas semiconductoras por lo que, para tener en cuenta su efecto, es necesario un procedimiento (aproximado) de conversión de datos según (5) y (6), que consiste en:

##### 1) Cálculo de $r_2$ :

$$r_2 = r_1 + d_{PS} + d_{AP} \quad (5)$$

donde  $r_1$  es el radio del conductor del núcleo,  $d_{PS}$  es el espesor de la pantalla semiconductora y  $d_{AP}$  es el espesor del aislante principal.

##### 2) Cálculo de la permitividad relativa:

$$\epsilon_{r1} = \frac{C \ln(r_2/r_1)}{2\pi\epsilon_0} \quad (6)$$

donde  $C$  es el valor de la capacitancia del cable dado por el fabricante y  $\epsilon_0 = 8.854E-12$ .

Si  $C$  es desconocida,  $\epsilon_{r1}$  puede ser calculada usando la permitividad relativa,  $\epsilon_{rins}$ , del aislamiento principal, según (7).

$$\epsilon_{r1} = \epsilon_{rins} \frac{\ln(r_2/r_1)}{\ln(b/a)} \quad (7)$$

donde  $a$  y  $b$  son el radio interno y el radio externo, respectivamente, del aislamiento principal. Para el XLPE,  $\epsilon_{rins}$  es igual a 2,3.

#### 4.3. Pantalla de conductores

Cuando la pantalla está formada por hilos conductores, el procedimiento consiste en reemplazarlos mediante un conductor tubular que tenga su área de sección transversal igual al área total de los conductores que forman la pantalla  $A_s$ . Con un radio interno de pantalla de  $r_2$ , el radio externo se obtiene según (8).

$$r_3 = \sqrt{\frac{A_s}{\pi} + r_2^2} \quad (8)$$

#### 4.4. Imprecisión en datos ofrecidos por el fabricante

Las normas sobre cables (IEC 840 e IEC 60502) ofrecen valor límites al mínimo espesor de cada capa del cable con respecto al espesor nominal, pero no el máximo espesor. Por este motivo, el fabricante es

libre de usar capas más gruesas que las nominales (por ejemplo, para tomar en cuenta la variación de las medidas por efectos mismos de la producción y para contrarrestar el efecto del envejecimiento). Esta situación está presente en el aislamiento principal, en el aislamiento por encima de la pantalla y en las pantallas semiconductoras. Para obtener datos reales, es necesario realizar mediciones de campo.

## 5. MODELACIÓN DE LOS CABLES SUBMARINO Y SUBTERRÁNEO DEL SISTEMA BALTRA – SANTA CRUZ

Los estudios de transitorios electromagnéticos del sistema Baltra – Santa Cruz son desarrollados en ATP, por lo que se debe realizar una adecuación del cable subterráneo y la validación de los modelos de cables.

### 5.1. Adaptación del cable subterráneo a modelos incorporados en programas del tipo EMT

Como se indicó anteriormente, las rutinas CP de programas del tipo EMT no poseen modelos específicos para simular el cable subterráneo del sistema de transmisión Baltra – Santa Cruz. Por lo tanto, de las soluciones presentadas en 3.4 y en base a consultas realizadas a investigadores dedicados al modelamiento de cables, se agregó a su modelo una armadura ficticia delgada cercana a la superficie del aislante PVC. Según los expertos, las características de este elemento deben tomar en cuenta lo siguiente:

- 1) El espesor tiene que ser el mínimo posible que permita el programa sin que se produzcan errores de simulación (oscilaciones numéricas). En el caso del cable subterráneo del sistema Baltra – Santa Cruz, este valor fue de 0.8 mm.
- 2) La resistividad del material es la del aluminio con una permeabilidad igual a la del aire, lo que implica que el material no presenta ferromagnetismo.

En la Fig. 8 se presenta la sección transversal del cable subterráneo simulado en ATP.

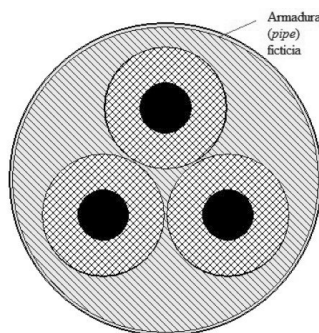


Figura 8: Modelo de cable subterráneo con inclusión de armadura ficticia

### 5.2 Ajuste de frecuencia para matriz Q

Para obtener el valor de frecuencia con la que será calculada **Q** en el modelo JM, CIGRÉ [1] sugiere ajustar el modelo de cables con valores bajos de frecuencia lo que permitiría obtener resultados conservativos. Existen dos valores de frecuencia que deben ser calculados: frecuencia característica  $f_s$  (9) y la frecuencia crítica  $f_c$  (10). Entonces, el valor de la frecuencia objetivo  $f_o$  con la que debe ser calculada **Q** se selecciona de acuerdo a los siguientes aspectos:

- Debido a que la frecuencia de interés está entre la frecuencia característica y la frecuencia crítica en la mayoría de los casos de cables largos, la frecuencia con que se calcula **Q** debe ser seleccionada entre las dos frecuencias.
- La  $f_o$  debe ser seleccionada como el valor más bajo de  $f_s$  o  $f_c$  para producir resultados conservativos con bajo amortiguamiento.

$$f_s = \frac{\rho_s^{3/4}}{10\pi\mu_s d S} \quad (9)$$

$$f_c = \frac{\rho_s}{\pi\mu_s d^2} \quad (10)$$

donde  $\rho_s$  es la resistividad de la pantalla metálica en  $\Omega/m$ ,  $\mu_s$  es la permeabilidad de la pantalla metálica en H/m,  $d$  es el espesor de la pantalla metálica en metros y  $S$  es la separación entre cables en metros.

En este trabajo usando (9) y (10) se tienen los siguientes resultados:

- **Cable subterráneo:**

$$- f_s = 16252 \text{ Hz}$$

$$- f_c = 891264 \text{ Hz}$$

por lo tanto  $f_o = 16260 \text{ Hz}$

- **Cable submarino:**

$$- f_s = 8133 \text{ Hz}$$

$$- f_c = 270766 \text{ Hz}$$

por lo tanto  $f_o = 8135 \text{ Hz}$

Una vez seleccionado el valor de la  $f_o$ , se debe confirmar, mediante simulaciones, que no conduce a una situación irreal en estado estable y transitorio.

### 5.3. Intervalo de frecuencia

De acuerdo a CIGRÉ [1] cuando se usan modelos de líneas y/o cables dependientes de la frecuencia pueden ocurrir simulaciones inestables causadas, a menudo, por violaciones pasivas del modelo del cable. Las soluciones a estos problemas contemplan reducir el límite inferior de la curva de ajuste de frecuencia, incrementar el límite superior de la curva del ajuste de frecuencia, entre otros que se exponen de una manera detallada en la Tabla 4-3 del documento de CIGRÉ [1]. Esta información es presentada en este trabajo mediante la Tabla 2.

Basados en la sugerencia de CIGRÉ, la frecuencia mínima con la que se ajustaron los modelos de cables submarino y subterráneo en el modelo JM es de 0.001 Hz, mientras que para la frecuencia superior se ingresó un valor de 9 décadas con 10 puntos por década. Valores inferiores a 0.001 Hz y superiores a 9 décadas provocaron oscilaciones numéricas en el modelo de cables. Estos valores también fueron ingresados en el modelo WB.

### 6. RESPUESTA DE LOS CABLES

Para validar y determinar las limitaciones del modelo JM se compara su respuesta de voltaje con la del modelo WB.

#### 6.1. Método de evaluación de respuesta transitoria de cables

Los modelos de cables subterráneo y submarino son probados mediante la aplicación de una señal de voltaje continuo de magnitud 1 V en una fase, mientras que las restantes y los conductores de pantalla se encuentran aterrados en un extremo (donde se realiza la conexión) y abiertos en el otro. En la Fig. 9 se presenta un diagrama de esta prueba y en la Fig. 10 se presenta la implementación del cable subterráneo en ATP, mientras que en la Fig. 11 se muestra la implementación en EMTP-RV. Para el cable submarino se usan los mismos circuitos de prueba tanto en ATP como en EMTP-RV.

Tabla 2: Guía de CIGRÉ para Selección del Rango de Frecuencia en Modelos Frequency Dependence. [1]

Table 4-3: Guideline to Select Proper Fitting Parameters

Parameter	Typical Values	Possible consequences as a result of significant deviation from the typical values	
		An increase	A decrease
Curve fitting frequency – lower limit	1 Hz 0.5 Hz 0.1 Hz 0.01 Hz	(e.g. 10 Hz) - Fitting may be only accurate between 10 Hz to the upper limit - Possibility of unstable simulation (due to under-fitting)	(e.g. 0.01 or 0.001 Hz) - May improve stability of the simulation (A very low value, e.g. 1e-4 Hz) - May result in unstable simulation (due to over-fitting) - Simulation may be slow (require a higher order function for accurate fitting at low frequency)
Curve fitting frequency – upper limit (it is recommended to keep the default value, 1 MHz, see Section 4.8...)	1 MHz	(e.g. 10MHz) - Transmission line models are only accurate and tested up to 1 MHz - Possibility of unstable simulation	(e.g. 10kHz) - inaccurate simulation at high frequencies - possibility of unstable simulation (due to inaccuracy outside the fitting range)
Total number of frequency increments (total number of samples for curve-fitting)	100	(e.g. 500) - increase accuracy (Usually do not need to change this value)	
Maximum order of fitting for propagation function (Ap and Q) (It is sometimes required to increase this value to obtain accurate solution)	20-30	When plotted as a function of frequency, the angle of the propagation function shows an oscillatory behaviour (due to the transportation delay of the transmission line). Hence a higher order approximated function may be required to obtain an accurate fitting (compared with Ysurge).	
Maximum order of fitting for Ysurge (In many instances, the maximum order, 20 is sufficient for accurate results)	20-30	Compared with propagation function, curve-fitting of Yc is relatively easy and hence accurate fitting may be achieved less than 20 poles for many transmission line configurations. These values may be increased based on fitting results.	

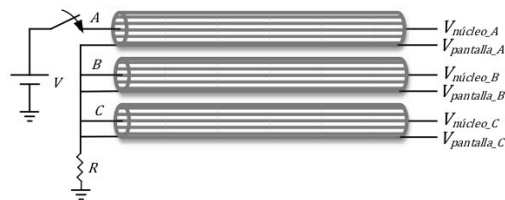


Figura 9: Diagrama para evaluar respuestas de modelos de cable

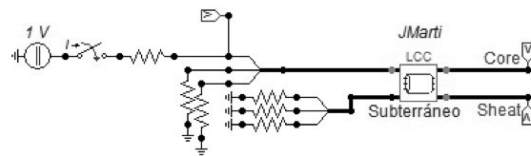


Figura 10: Implementación en ATP para evaluar respuesta del cable subterráneo

La longitud de cada cable se ajustó en 1 km. De acuerdo a CIGRÉ, todas las resistencias del circuito de prueba tienen un valor de 1 Ω. El objetivo es obtener el voltaje en el extremo abierto de la fase donde se aplica la señal y los voltajes inducidos en las fases restantes y conductores de pantalla de los extremos abiertos.



Los resultados de voltajes en núcleo y pantallas para el cable subterráneo usando ATP y EMTP RV se presentan en la Fig. 12 y Fig. 13, respectivamente. Las señales en las fases B y C, y en las pantallas A, B y C son voltajes inducidos y es en estos elementos donde, según [10], el ATP ofrece resultados erróneos debido a que  $Q$  se calcula con un valor fijo de frecuencia. Para la fase energizada el resultado es aceptable.

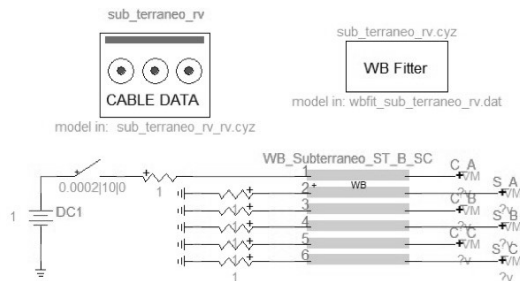


Figura 11: Implementación en EMTP-RV para evaluar respuesta del cable subterráneo

Esta prueba es considerada adecuada para evaluar, no solamente el cable que se ha modelado, sino el mismo algoritmo que cada software posee para modelamiento de línea/cable. Pruebas adicionales [1] pueden ser realizadas conectando a tierra las pantallas y armaduras, con lo que el algoritmo “eliminará” estos conductores con la consecuencia que no se podrá evaluar los sobrevoltajes inducidos en pantallas y armadura.

Según [5], los voltajes inducidos en elementos conductores por encima de las pantallas son mínimos y no son de importancia en estudios de energización, por lo que la armadura ficticia en el modelo del cable subterráneo y la armadura del cable submarino se conectan a tierra sin que esto influya a los voltajes del núcleo y pantallas.

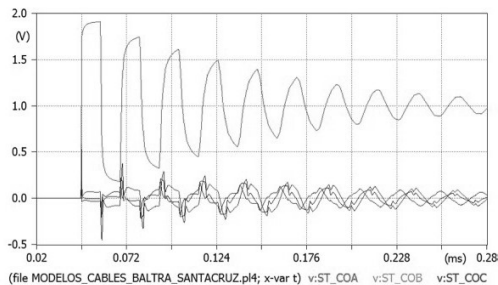


Figura 12: Respuesta del cable subterráneo usando ATP

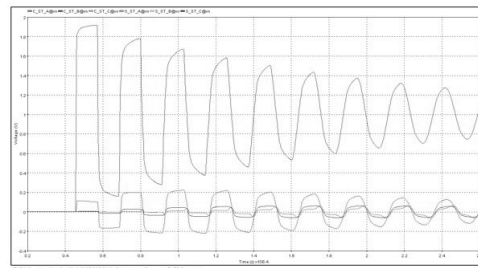


Figura 13: Respuesta del cable subterráneo usando EMTP-RV

## 6.2 Comparación de respuestas para cable subterráneo y submarino

Para una adecuada interpretación de las gráficas siguientes, la leyenda de las figuras hacen referencia primeramente al software utilizado (EMTP-RV o ATP), luego se indica el conductor donde se mide la señal (núcleo C o pantalla S), a continuación se indica el tipo de cable (subterráneo ST o submarino SM), finalmente se indica la fase en la que se mide (A o B) considerando que por el arreglo de las fases en triángulo equilátero en ambos cables los voltajes en los núcleos B y C en pantallas B y C son los mismos.

En la Fig. 14 y Fig 15 se presentan los resultados del voltaje en el extremo abierto del núcleo de la fase A. Se observa que el modelo JMarti ofrece resultados similares al modelo WB para el primer pico lo que permite asegurar que el modelo JMarti es adecuado para evaluar el primer pico transitorio. En la Fig. 16, Fig 17 y Fig. 18 se observan los voltajes inducidos en fases restantes y pantallas del cable subterráneo donde se puede afirmar que el modelo JMarti falla.

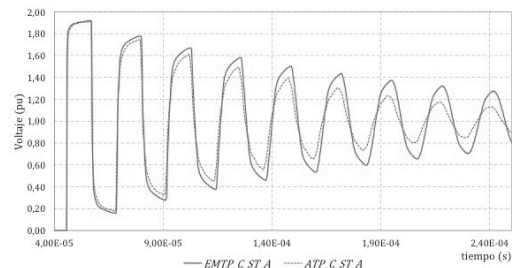


Figura 14: Respuestas de cable subterráneo en fase A usando ATP y EMTP-RV

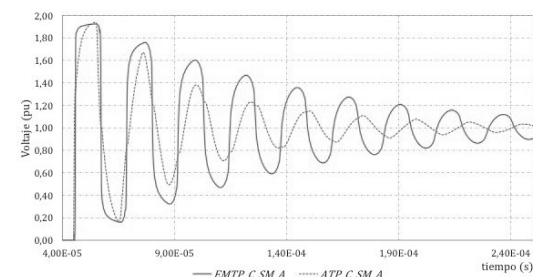
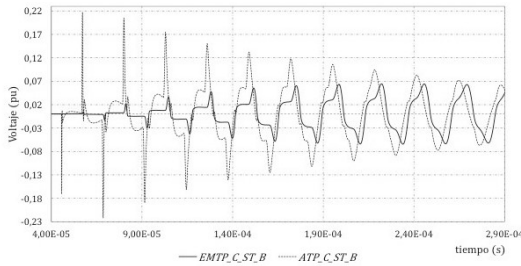
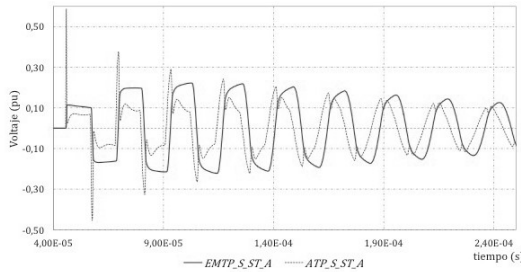


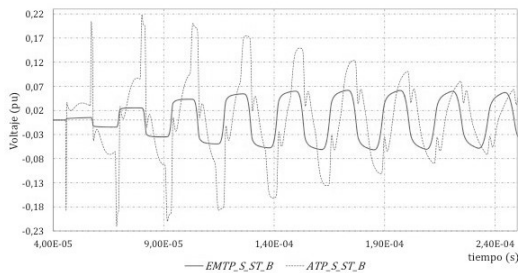
Figura 15: Respuestas de cable submarino en fase A usando ATP y EMTP-RV



**Figura 16: Respuestas (voltajes inducidos) de cable subterráneo en fase B y C usando ATP y EMTP-RV**

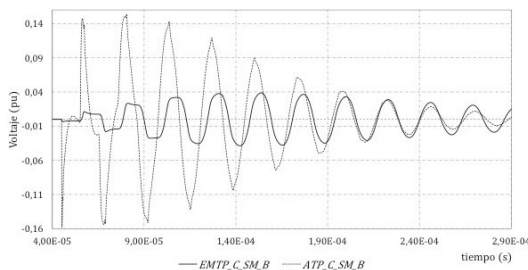


**Figura 17: Respuestas (voltajes inducidos) de cable subterráneo en pantallas de fase A usando ATP y EMTP-RV.**

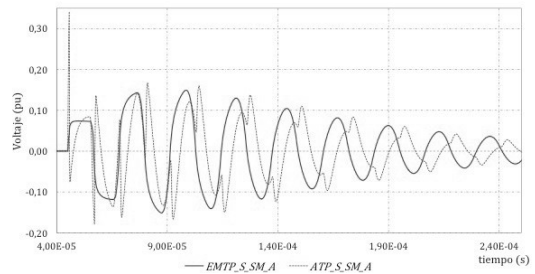


**Figura 18: Respuestas (voltajes inducidos) de cable subterráneo en pantallas de fase B y C usando ATP y EMTP-RV.**

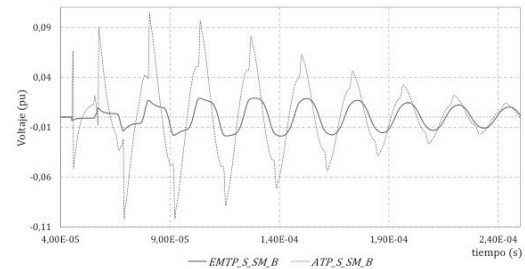
Comportamientos similares se observan en las respuestas del cable submarino y que se presentan en la Fig. 19, Fig. 20 y Fig. 21.



**Figura 19: Respuestas (voltajes inducidos) de cable submarino en fase B y C usando ATP y EMTP-RV**



**Figura 20: Respuestas (voltajes inducidos) de cable submarino en pantallas de fase A usando ATP y EMTP-RV**



**Figura 21: Respuestas (voltajes inducidos) de cable submarino en pantallas de fase B y C usando ATP y EMTP-RV**

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelamiento de cables en programas del tipo ETMP requiere de un procesamiento de los datos geométricos y eléctricos del cable ofrecidos por el fabricante antes de ser ingresados en la rutina CP. Esto permite tomar en cuenta el núcleo y pantallas metálicas que están formados por hilos conductores y tomar en cuenta el efecto de las pantallas semiconductoras.

El diseño del cable subterráneo del sistema de subtransmisión Baltra – Santa Cruz no corresponde a ningún modelo presente en rutinas CP por lo que resultó necesario agregarle una pantalla ficticia para usar el modelo Pipe. Los resultados de este trabajo se basan en este artificio el cual, si bien es sugerido por el estado del arte e investigadores, aún no tiene pruebas publicadas que lo respalden. Este artificio no es válido para evaluar corrientes de cortocircuito a tierra debido a que la corriente encontrará un camino a través de la armadura lo cual afectará la valoración de la corriente de falla.

Las validaciones realizadas en este trabajo se obtuvieron para sobrevoltajes de frente lento. Es necesario realizar validaciones para sobrevoltajes de frente rápido donde se ven involucradas frecuencias más altas. En el sistema Baltra – Santa Cruz no fue

necesario analizar sobrevoltajes de frente rápido debido a que en las islas la presencia de descargas atmosféricas es casi nula.

Para simular sobrevoltajes de maniobra en líneas de transmisión eléctrica que contengan cables, el modelo JMarti debe ser ajustado con una frecuencia con la cual la matriz  $Q$  permita obtener resultados aceptables. Esta frecuencia debe ser seleccionada del menor valor de la frecuencia característica y frecuencia crítica del cable, según CIGRÉ. Los resultados muestran que el modelo JMarti da valores confiables para voltajes transitorios de fases, mientras que para valorar voltajes transitorios inducidos en fases, pantallas y armaduras el modelo falla. Por tal motivo, no es posible usar ATP para estudios que permitan incluir descargadores (pararrayos) en pantallas como medio de control de sobrevoltajes.

Ante la incertidumbre de los resultados de las simulaciones, en el cable subterráneo del sistema de subtransmisión Baltra – Santa Cruz, se optó por colocar a tierra las pantallas cada tres kilómetros como un medio para controlar los sobrevoltajes inducidos. Normalmente, una buena práctica exige, a lo mucho, colocar de dos a tres puestas de tierra en cables largos.

Los resultados de este trabajo, especialmente para el cable subterráneo, no deberían ser tomados como concluyentes debido a las simplificaciones y criterios asumidos. Para una mejor validación del modelo de cables, se recomienda que en las especificaciones técnicas se solicite al fabricante la respuesta de un cable de 1 kilómetro ante un voltaje continuo para comparar y validar los modelos usados en los estudios.

#### REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] CIGRÉ, “Power System Technical Performance Issues Related to the Application of Long HVAC Cables”, WG C4.502, 2013.

[2] H. Dommel, “EMTP Theory Book”, Canadian/American EMTP User Group, July 1995.

[3] F. Alvarado, “Electromagnetic Transients Program (EMTP): Workbook II”, Electric Power Research Institute, June 1989.

[4] A. Morched, B. Gustavsen and M. Tartibi, “A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables”, IEEE Trans. on Power

Delivery, vol. 14, no. 3, pp 1032-1038, July 1999.

[5] J. Martínez-Velasco et. al., “Power System Transients – Parameter Determination”, CRC Press, 2010.

[6] B. Gustavsen and A. Semlyen, “Simulation of Transmission Line Transients Using Vector Fitting and Modal Decomposition”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 13, no. 2, April 1998.

[7] O. Ramos-Leaños et. al., “A Wideband Line/Cable Model for Real-Time Simulations of Power System Transients”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 27, no. 4, October 2012.

[8] O. Ramos-Leaños, “A Wideband Line/Cable Model for Real-Time and Off-Line Simulations of Electromagnetic Transients”, École Polytechnique de Montréal, Avril 2013.

[9] B. Gustavsen, “Panel Session on Data for Modeling System Transients Insulated Cable”, SINTEF Energy Research - Trondheim, Norway.

[10] H. K. Hoidalen and A. Soloot, “Cable Modelling in ATP – from Noda to TYPE 94”, Norwegian University of Technology Trondheim, Norway.

[11] L. Marti, R.H. Brierley and T.E. Grainger, “Analysis of Electromagnetic Transients in Cross-Bonded Cable Systems Using Frequency Dependent Cable Models”, International Conference on Power System Transients, IPST 95, Lisbon, September 1995.



#### Luis Manuel Dután Amay.-

Nació en la parroquia Guapán de la ciudad de Azogues, provincia de Cañar. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional donde también ha cursado estudios de Maestría en Ingeniería Eléctrica. Desde

el 2009 es colaborador de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP - Unidad de Negocio Transelectric en el departamento de Planificación y desde 2014 en la Subgerencia de Proyectos de Expansión – Área de Diseño de Subestaciones. Su campo de investigación se encuentra relacionado con transitorios electromagnéticos, equipo primario de subestaciones y coordinación de aislamiento de líneas de transmisión y subestaciones.