



## TRABAJOS TEORICOEXPERIMENTALES

### Parámetros inductivos y capacitivos equivalentes de fase y de secuencia de las líneas de transmisión conectadas en cascada

#### *Inductive and capacitive equivalent parameters of phase and sequence of transmission lines connected in cascade*

Héctor Silvio Llamo - Laborí

Recibido: octubre del 2009

Aprobado: noviembre del 2009

#### Resumen/ Abstract

En el Sistema Electro Energético Nacional (SEN) existen líneas de transmisión a 110 y 220 kV conectadas en cascada o en serie que, por tramos que poseen diferentes estructuras, conductores, flechas, resistividades del terreno, etcétera. Su representación en los programas para calcular flujos de carga, cortocircuitos y estabilidad, utilizados en el Despacho Nacional de Carga Eléctrica (DNC) de la Unión Eléctrica (UNE), obligaría a definir tantos nodos ficticios adicionales como el número de líneas en cascada menos uno dificultando el trabajo con dichos programas y aumentando, de forma innecesaria, el número de nodos de la red eléctrica analizada. En este trabajo se presentan las características y los resultados de un algoritmo que modela las líneas de transporte de energía eléctrica trifásicas de cualquier configuración y número de circuitos en cantidades de fase mediante sus Constantes Generalizadas Matriciales (CGM) (A), (B), (C) y (D), de un orden igual a tres por el número de circuitos de la línea, se utiliza la propiedad de los cuadripolos conectados en cascada que obtiene el cuadripolo equivalente de "N" cuadripolos conectados en cascada y, a partir de él, las matrices impedancia (Z) y admitancia (Y). A estas matrices se le aplica la Ecuación de Transformación de las Componentes Simétricas (ETCS) y se obtienen los parámetros de secuencia cero, positiva y negativa de la línea equivalente a "N" líneas diferentes conectadas en cascada.

**Palabras claves:** cascada, cuadripolos, constantes generalizadas matriciales.

*In the National Electro Energetic System (NES) there is transmission lines at 110 and 220 kV connected in cascade or in series that possess trams with different structures, conductors, arrows, ground resistivity etc. Its representation in the programs that calculate load flow, short circuit and stability problems, used in the Electric Load Dispatch (ELD) of the Electric Union, make necessary to define so many additional fictitious nodes like the number of lines connected in cascade less one making difficult the work with these programs and increasing, unnecessarily, the number of nodes of the electric network analyzed. In these work are presented the characteristics and the results of an algorithm that model the three phase electric energy transportation lines of any configuration and circuits numbers in phase quantity by mean of its Matrix Generalized Constants (MGC) (A), (B) (C) and (D), with an order of three by the line circuits number and utilizes the cuadripolos property connected in cascade for obtaining the equivalent cuadripolo of "N" cuadripolos connected in cascade and, from it, the impedance (Z) and admittance (Y) matrices. From these matrices, using the Symmetrical Components Transformation Equation (SCTE), are calculated the zero, positive and negative sequence parameters equivalents to "N" different lines connected in cascade.*

**Key words:** cascade, cuadripolos, matrix generalized constants.

#### INTRODUCCIÓN

La dinámica de la construcción de las redes de transmisión, subtransmisión y distribución hace que a veces se construyan líneas, alimentadores o ramales con estructuras, conductores y cables protectores o neutros que son diferentes para distintos tramos de la misma línea conectados en serie o en cascada como también se le llama. En las redes de distribución primaria esta característica está contemplada en los programas que se utilizan para calcular

flujos de cargas y cortocircuitos. No sucede así en las redes de transmisión donde, los parámetros inductivos y capacitivos, de fase y secuencia de las líneas de transmisión se calculan tomando un solo tipo de estructura, la predominante, una sola flecha para los conductores y otra para los cables protectores, la del tramo promedio, un solo tipo de conductor para las fases y otro para los cables protectores, una resistividad del terreno promedio para toda la longitud de la línea y una condición única para los cables protectores, conectados a o desconectados de la tierra.

Si se modelan las líneas en cantidades de fase mediante sus Constantes Generalizadas Matriciales (CGM) (A), (B), (C) y (D), de un orden igual a tres por el número de circuitos de la línea y se utiliza la propiedad de los cuadripolos conectados en cascada que dice que el cuadripolo global de "N" cuadripolos conectados en cascada es igual a su producto matricial, es posible obtener el modelo matemático de una línea equivalente en cantidades de fase y, a partir de él, aplicándole la Ecuación de Transformación de las Componentes Simétricas (ETCS) obtener los parámetros de secuencia cero, positiva y negativa de la línea equivalente a "N" líneas diferentes conectadas en cascada. Con esto, se logra mejorar la calidad de los resultados de los cálculos de flujos de carga, cortocircuitos y estabilidad mediante una representación matemática más exacta de las líneas de transmisión con las características antes mencionadas.

### MODELO MATEMÁTICO DE UN TRAMO DE LÍNEA MEDIANTE LAS CGM DE SUS PARÁMETROS DE FASE

La figura 1 muestra un tramo "i" de los "N" tramos que forman una línea de transmisión conectados en cascada.

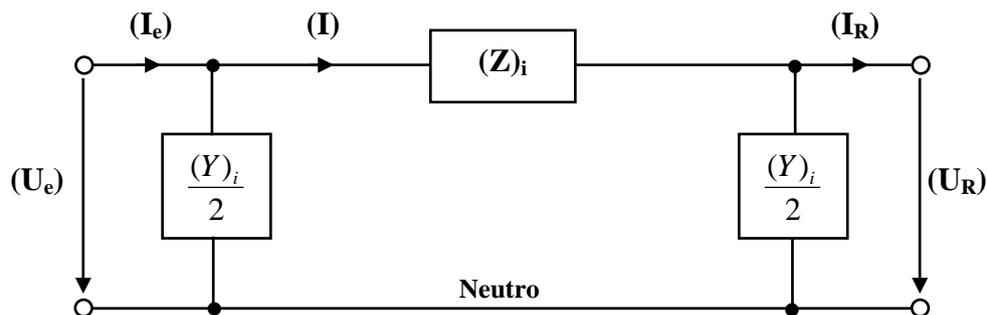


Fig. 1. Circuito  $\Pi$  nominal en cantidades de fase del tramo "i" de una línea de transmisión dividida en "N" tramos con características diferentes.

El modelo matemático de un tramo "i" de los "N" tramos que forman una línea de transmisión utiliza circuitos equivalentes acoplados en cantidades de fase para los parámetros inductivos, matriz impedancia (Z), y para los parámetros capacitivos, matriz admitancia (Y). Dichas matrices tienen incorporado el efecto de la circulación de las corrientes por la tierra y el de los cables protectores <sup>[1]</sup>. Con dichas matrices se formó un circuito equivalente en cantidades de fase al que se le concentró la matriz impedancia en la mitad de la longitud del alimentador y la mitad de la matriz admitancia en ambos extremos formándose un circuito  $\Pi$  Nominal Matricial <sup>[2]</sup> porque la longitud de las líneas involucradas lo justifica al ser menores que 250 km. El orden las matrices involucradas es igual a tres por el número de circuitos de la línea (3·NCL) para poder aplicarle la ETCS.

**Ingeniería energética Vol. XXXII, No. 1/2011 p1 – 10 Enero – Marzo. ISSN 1815- 5901**

Las ecuaciones que representan un alimentador en cantidades de fase en función de las constantes generalizadas matriciales son, según se parta del recibo, o del envío:

$$(U_e) = (A_i)(U_R) + (B_i)(I_R) \quad (1)$$

$$(I_e) = (C_i)(U_R) + (D_i)(I_R) \quad (2)$$

$$(U_R) = (D_i)(U_e) - (B_i)(I_e) \quad (3)$$

$$(I_R) = -(C_i)(U_e) + (A_i)(I_e) \quad (4)$$

Donde:

$(U_e)$ : Vector de las tensiones al neutro del envío en volt de orden 3·NCL.

$(U_R)$ : Vector de las tensiones al neutro del recibo en volt de orden 3·NCL.

$(I_e)$ : Vector de las corrientes de línea del envío en ampere de orden 3·NCL.

$(I_R)$ : Vector de las corrientes de línea del recibo en ampere de orden 3·NCL.

$(Z)$ : Matriz impedancia de los parámetros de fase de un tramo "i" cualquiera.

$(Y)$ : Matriz admitancia de los parámetros de fase de un tramo "i" cualquiera.

$(A_i)$ ,  $(B_i)$ ,  $(C_i)$  y  $(D_i)$  son las Constantes Generalizadas Matriciales (CGM) del tramo "i" de orden 3·NCL. Para calcularlas, se utilizaron las propiedades de los cuádrupolos conectados en cascada cumpliendo con las propiedades de las operaciones con matrices. Así, con las definiciones hechas, para formar el circuito  $\Pi$  Nominal Matricial, los cuádrupolos de los parámetros serie,  $(Z)$ , y paralelos del envío y el recibo,  $(Y)$  quedan conectados en cascada y el cuádrupolo resultante se obtiene como el producto de los cuádrupolos componentes.

$$\begin{bmatrix} (U_e) \\ (I_e) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1) & (0) \\ \frac{(Y_i)}{2} & (1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1) & (Z_i) \\ (0) & (1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1) & (0) \\ \frac{(Y_i)}{2} & (1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (U_R) \\ (I_R) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde:

Los cuádrupolos de los extremos, representan a la mitad de la matriz admitancia  $(Y_i)$  del tramo.

El cuádrupolo intermedio representa a la matriz impedancia  $(Z_i)$  del tramo.

$(1)$ : Es la matriz unidad o identidad.

$(0)$ : Es la matriz nula.

Desarrollando el triple producto matricial mostrado en la ecuación 5 se obtiene la ecuación:

$$\begin{bmatrix} (U_e) \\ (I_e) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A_i) & (B_i) \\ (C_i) & (D_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (U_R) \\ (I_R) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde:

$(A_i) = (1) + \frac{1}{2}(Z)(Y)$  es la CGM (A) sin dimensiones,

$(B_i) = (Z)$  es la CGM (B) con dimensiones de impedancia,

$(C_i) = (Y)[(1) + \frac{1}{4}(Z)(Y)]$  es la CGM (C) con dimensiones de admitancia y

$(D_i) = (1) + (Y)(Z)$  es la CGM (D) sin dimensiones.

Todas de un orden igual a tres por el número de circuitos de la línea; 3, 6, 9, etc. para líneas de uno, dos o tres circuitos.

## MODELO MATEMÁTICO DE “N” LÍNEAS CONECTADAS EN CASCADA

La figura 2 muestra el caso particular de una línea de transmisión dividida en tres tramos, cada uno de los cuales tiene una longitud y otras características que lo hace diferente de los demás tramos conectados en cascada.

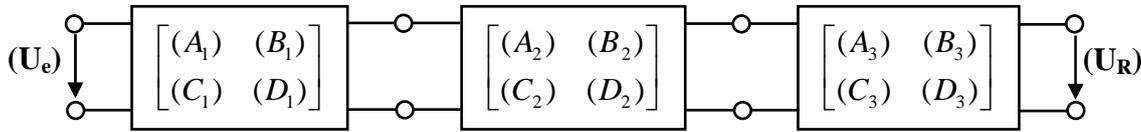


Fig. 2- Línea con tres tramos diferentes conectados en cascada.

El cuadripolo equivalente que representa a los tres (o “N”) tramos de una línea de transmisión conectados en cascada se obtiene mediante el producto matricial:

$$\begin{bmatrix} A_{Eq} & B_{Eq} \\ C_{Eq} & D_{Eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para calcular los parámetros inductivos y capacitivos de secuencia positiva, negativa y cero se necesitan las matrices impedancia (Z) y admitancia (Y) de la línea equivalente. Se tiene la matriz impedancia pues como es sabido:

$$(Z_{Eq}) = (B_{Eq}) \quad (8)$$

La matriz admitancia se obtiene a partir de las CGM ( $A_{Eq}$ ) y ( $C_{Eq}$ ) mediante la expresión:

$$(Y_{Eq}) = (0) + j(B_{Eq}) = (C_{Eq}) \left\{ \frac{1}{2} [(1) + (A_{Eq})] \right\}^{-1} \quad (9)$$

Si la línea tiene más de un circuito, por ejemplo, dos, las matrices impedancia y admitancia tienen la forma:

$$(Z_{Eq})_{DC} = \begin{bmatrix} (Z_{Eq})_{11} & (Z_{Eq})_{12} \\ (Z_{Eq})_{21} & (Z_{Eq})_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Donde  $(Z_{Eq})_{11}$  y  $(Z_{Eq})_{22}$  son las matrices con las impedancias propias y mutuas de los circuitos I y II, mientras que  $(Z_{Eq})_{12}$  y  $(Z_{Eq})_{21}$  son las matrices con los elementos mutuos entre los circuitos I y II.

Si se le aplica la ecuación de transformación de las componentes simétricas a las matrices  $(Z_{Eq})_{ii}$  y  $(Y_{Eq})_{ii}$  se obtienen las matrices de los parámetros de secuencia de cada uno de los circuitos la línea equivalente:

$$(Z_{Seq})_i = (S)^{-1} (Z_{Eq}) (S) = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{00} & \underline{Z}_{01} & \underline{Z}_{02} \\ \underline{Z}_{10} & \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{20} & \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$(Y_{Seq})_i = (S)^{-1} (Y_{Eq}) (S) = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{00} & \underline{Y}_{01} & \underline{Y}_{02} \\ \underline{Y}_{10} & \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{20} & \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

**Ingeniería energética Vol. XXXII, No. 1/2011 p1 – 10 Enero – Marzo. ISSN 1815- 5901**

Siendo “i” el índice del circuito considerado (1 ó 2) y los elementos de la diagonal principal representan los parámetros de secuencia cero, positiva y negativa de los parámetros inductivos y capacitivos respectivamente y los elementos fuera de la diagonal principal, el acoplamiento mutuo entre las secuencias cero, positiva y negativa. También:

$$(S) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \text{ y } (S)^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix}$$

Son las matrices de transformación directa e inversa de las componentes simétricas respectivamente y  $\underline{a}$ , es el operador de las componentes simétricas.

Si se le aplica la ecuación de transformación de las componentes simétricas a las matrices fuera de la diagonal principal ( $Z_{Eq,ik}$ ) y ( $Y_{Eq,ik}$ ), se obtienen los parámetros mutuos de secuencia cero entre los circuitos:

$$\underline{Z}_{m0} = R_{m0} + jX_{m0} \text{ ohm y} \quad (13)$$

$$\underline{Y}_{m0} = j\underline{B}'_{m0} \text{ siemen.} \quad (14)$$

**RESULTADOS**

Para calcular los parámetros de secuencia de las líneas equivalentes a “N” tramos conectados en cascada se desarrolló un algoritmo que calcula los parámetros de fase y secuencia de líneas de transmisión trifásicas de cualquier configuración y número de circuitos con hasta ocho (8) tramos diferentes conectados en serie <sup>[3]</sup> y se compararon los resultados de dos casos de prueba hipotéticos.

**Primer caso**

Se supuso una línea doble circuito con las estructuras de la línea CTE Habana Cotorro que es doble circuito, con dos conductores por fase y dos cables protectores a 220 kV y se modeló con el algoritmo de la referencia (3) para las dos variantes cuyos datos se muestran en la tabla 1 para conocer la magnitud del error que se comete si se trabaja con un solo tramo de 24 km en lugar de con los tres que serían, hipotéticamente, los datos reales de la línea.

Tabla 1- Datos de las líneas para el primer caso de prueba analizado.				
Datos de cada tramo.	Línea CTE Habana Cotorro a 220 kV con:			
	Un tramo de 24 km.	Tres tramos de 8, 10 y 6 km.		
Resistividad del terreno.	100 Ω-m	80 Ω-m	200 Ω-m	150 Ω-m
Conductores en las fases.	AC400/51	AC400/51	AC400/51	AC400/51
Conductores en los Cables Protectores.	TK70	TK70	TK70	TK70
Flecha de los conductores.	10,0 m	10,0 m	8,0 m	12,0 m
Flecha de los Cables Protectores.	8,0 m	8,0 m	6,4 m	9,6 m

La tabla 2 muestra los resultados y las diferencias en porcentaje alcanzados. Para los parámetros de secuencia positiva, los errores son despreciables, menores que el 1 %, siendo importante la diferencia en la reactancia mutua de secuencia cero entre ambos circuitos con un valor del 8,85 %. Debe aclararse que este caso solo debe tomarse como una indicación de que hay diferencias, pero no considerando que siempre dará errores del mismo orden. Se recomienda modelar las líneas con los datos reales de cada tramo para obtener los resultados verídicos. Los parámetros fueron idénticos para los circuitos I y II por lo que se muestra un solo valor.

**Tabla 2- Comparación entre los resultados de modelar una línea similar a la CTE Habana Cotorro, a 220 kV con un tramo de 24 km o con tres de 8, 10 y 6 km.**

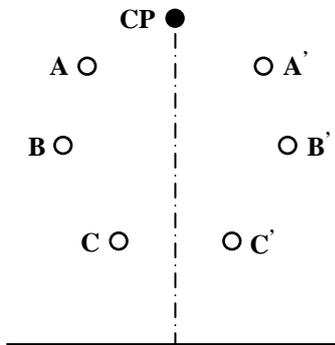
Parámetro	Un tramo de 24 kilómetros	Tres tramos de 8, 10 y 6 kilómetros.	Diferencias en porcentaje.
Resistencia de secuencia cero.	7,033 Ω	6,690 Ω	-4,880
Reactancia de secuencia cero.	30,243 Ω	31,900Ω	5,480
Susceptancia de secuencia cero.	0,631·10 <sup>-4</sup> S	0,625·10 <sup>-4</sup> S	-0,950
Resistencia de secuencia positiva.	1,065 Ω	1,062 Ω	-0,280
Reactancia de secuencia positiva.	8,555 Ω	8,555 Ω	0,000
Susceptancia de secuencia positiva.	0,111·10 <sup>-3</sup> S	0,111·10 <sup>-4</sup> S	0,000
Resistencia mutua de secuencia cero.	5,973 Ω	5,631Ω	-5,730
Reactancia mutua de secuencia cero.	18,724 Ω	20,381 Ω	<b>8,850</b>
Susceptancia mutua de secuencia cero.	-19,042·10 <sup>-6</sup> S	-19,668·10 <sup>-6</sup> S	3,290

**Segundo caso**

En el segundo caso se modeló una línea de 90 km de ocho (8) tramos con diferencias apreciables entre sí para demostrar las posibilidades del algoritmo utilizado <sup>(3)</sup>. Las tablas y las figuras de la 3 a la 9 muestran las características de las estructuras a 110 kV utilizadas, la tabla 10, los datos de cada tramo y, la tabla 11 los resultados para las dos variantes analizadas.

**Tabla 3- Disposición de las fases en la torre española de acero IBERIABA**

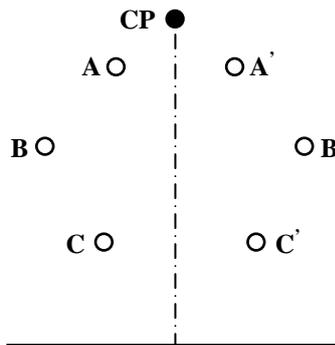
No./Fase	Abscisa	Ordenada
1/A	-3,2 m	21,6
2/B	-3,3 m	18,3
3/C	-2,2 m	15,0
4/A	3,2 m	21,6
5/B	3,3 m	18,3
6/C	2,2 m	15,0
7/CP	0,0	25,6



**Fig. 3. Estructura de acero IBERIABA.**

**Tabla 4- Disposición de las fases en la torre española de acero IBERIABE.**

No./Fase	Abscisa	Ordenada
1/A	-2,5 m	18,6
2/B	-4,0 m	15,3
3/C	-3,0 m	12,0
4/A	-2,5 m	18,6
5/B	-4,0 m	15,3
6/C	-3,0 m	12,0
7/CP	0,0	21,6



Ingeniería energética Vol. XXXII, No. 1/2011 p1 – 10 Enero – Marzo. ISSN 1815- 5901  
 Fig.4.Estructura de acero IBERIABE

**Tabla 5- Disposición de las fases en la torre española de acero IBERIAFE**

No./Fase	Abscisa	Ordenada
1/A	-2,500 m	19,850
2/B	-3,250 m	16,550
3/C	-2,875 m	13,250
4/A	-2,500 m	19,850
5/B	-3,250 m	16,550
6/C	-2,875 m	13,250
7/CP	0,0	23,850

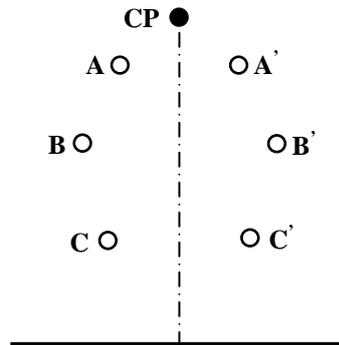


Fig. 5. Estructura de acero IBERIAFE.

**Tabla 6- Disposición de las fases en la torre cubana de hormigón BENETIDC**

No./Fase	Abscisa	Ordenada
1/A	-5,75 m	12,33 m
2/B	-2,56 m	16,23 m
3/C	-2,62 m	12,33 m
4/A	-5,75 m	12,33 m
5/B	-2,56 m	16,23 m
6/C	-2,62 m	12,33 m
7/CP	-2,60 m	18,50 m
8/CP	2,60 m	18,50 m

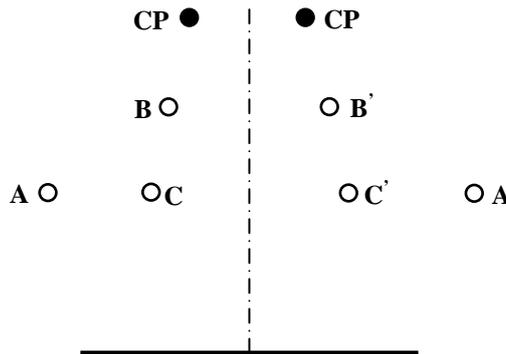


Fig.6. Estructura de hormigón BENETIDC.

**Tabla 7- Disposición de las fases en la torre de acero VERTICAL**

No./Fase	Abscisa	Ordenada
1/A	-3,60 m	20,13 m
2/B	-3,60 m	16,53 m
3/C	-3,60 m	12,93 m
4/A	3,60 m	12,93 m
5/B	3,60 m	16,53 m
6/C	3,60 m	20,13 m
7/CP	-2,00 m	26,00 m
8/CP	2,00 m	26,00 m

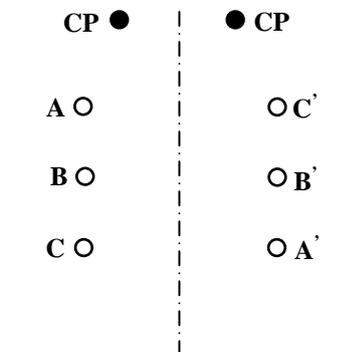
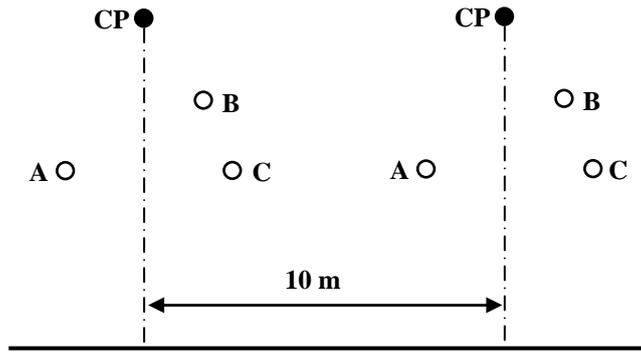


Fig. 7. Estructura de acero VERTICAL.

**Tabla 8- Disposición de las fases en la torre de hormigón BENETISC**

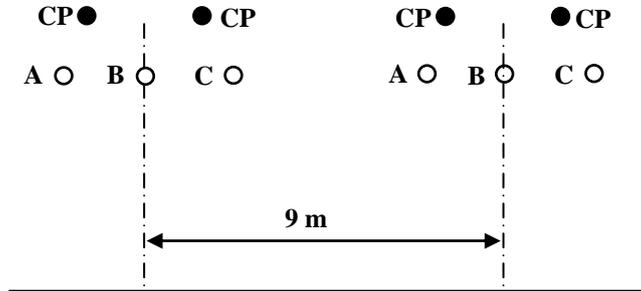
No./Fase	Abscisa	Ordenada
1/A	-2,60 m	13,53 m
2/B	2,50 m	16,83 m
3/C	2,60 m	13,53 m
4/cp	0,00 m	20,70 m



**Fig. 8. Dos estructuras de hormigón BENETISC separadas 10 m.**

**Tabla 9- Disposición de las fases en la torre de madera HORIZONT.**

No./Fase	Abscisa	Ordenada
1/A	-4,575 m	14,50 m
2/B	0,000 m	14,50 m
3/C	4,575 m	14,50 m
4/cp	-4,00 m	15,50 m
5/CP	4,00	15,50 m



**Fig. 9. Dos estructuras de madera HORIZONT separadas 9 m.**

**Tabla 10- Datos de cada uno de los ocho tramos que forman la línea ficticia de 90 km.**

Tramo No.	Longitud del tramo.	Conductores en:		Flechas en:		Resistividad del terreno.	Torre en el tramo.
		Las fases.	Los C. Prot.	Las fases.	Los C. Prot.		
1	10 km	M240	B95	8,0 m	6,4 m	80 Ω-m	IBERIABA
2	12 km	AC240/39	3/8 40 A	7,0 m	5,6 m	80 Ω-m	IBERIABE
3	8 km	AC300/39	TK70	10,0 m	8,0 m	100 Ω-m	IBERIAFE
4	9 km	AC300MCM	AC70/72	9,0 m	7,2 m	200 Ω-m	BENETIDC
5	11 km	AC500MCM	5/16 20 A	8,0 m	6,4 m	200 Ω-m	VERTICAL
6	20 km	AC240/32	3/8 10 A	11,0 m	8,8 m	120 Ω-m	BENETISC
7	12 km	CU500MCM	B95	7,0 m	5.6 m	80 Ω-m	HORIZONT
8	8 km	CU600MCM	B95	8,0 m	6,4 m	80 Ω-m	BENETIDC
Único	90 km	M240	B95	8,0 m	6,4 m	100 Ω-m	IBERIABA

Para la línea modelada con 90 km, los parámetros de cada circuito fueron iguales entre sí, No sucedió lo mismo con la línea modelada con ocho tramos y por eso aparecen dos valores. La diferencia máxima para los parámetros de cada circuito fue del 2,87 % para la resistencia de secuencia positiva.

La tabla 11 muestra que las diferencias encontradas son importantes con un menor valor del 0,59 % en la reactancia de secuencia positiva, parámetro de gran importancia pues se relaciona con la caída de tensión, las pérdidas de potencia reactiva, los valores de las corrientes de cortocircuito y la estabilidad estática y transitoria y la máxima, del 32,73 % en la resistencia de secuencia positiva debido a la gran diversidad de conductores supuestos. Otra diferencia importante se encontró en la susceptancia mutua de secuencia cero con un 27,12 %.

## Ingeniería energética Vol. XXXII, No. 1/2011 p1 – 10 Enero – Marzo. ISSN 1815- 5901

Tabla 11- Comparación entre los resultados de modelar una línea ficticia de 90 km con un tramo de 90 km y ocho tramos de las longitudes indicadas en la tabla 10.			
Parámetro	Un tramo de 90 kilómetros	Ocho tramos (vea la tabla 10)	Diferencias máximas.
Resistencia de secuencia cero.	26,873 $\Omega$	31,848/32,064 $\Omega$	18,51 %
Reactancia de secuencia cero.	117,804 $\Omega$	120,899/120,764 $\Omega$	2,63 %
Susceptancia de secuencia cero.	0,195·10 <sup>-3</sup> S	0,229/0,230·10 <sup>-3</sup> S	17,95 %
Resistencia de secuencia positiva.	8,072 $\Omega$	10,415/10,714 $\Omega$	<b>32,73 %</b>
Reactancia de secuencia positiva.	42,817 $\Omega$	42,515/42,563 $\Omega$	-0,59 %
Susceptancia de secuencia positiva.	0,316·10 <sup>-3</sup> S	0,326/0,326·10 <sup>-3</sup> S	3,16 %
Resistencia mutua de secuencia cero.	18,827 $\Omega$	21,286 $\Omega$	13,06 %
Reactancia mutua de secuencia cero.	65,482 $\Omega$	73,754 $\Omega$	12,63 %
Susceptancia mutua de secuencia cero.	-61,836·10 <sup>-6</sup> S	-78,604·10 <sup>-6</sup> S	27,12 %

## MODIFICACIONES DE LA CARGABILIDAD DE LA LÍNEA

Otro aspecto de gran interés que permite analizar la nueva versión del paquete de programas PARLINC<sup>(3)</sup> es la cargabilidad de la línea analizada: Transferencia máxima para una caída de tensión fijada por el usuario del programa caída de tensión y pérdidas de potencia activa y reactiva para una transferencia prefijada y límite de estabilidad estática. La tabla 12 muestra que, en la mayoría de los casos, despreciar la configuración real de la línea conduj a resultados conservadores.

Tabla 12- Resultados de la cargabilidad de ambas líneas y sus diferencias en porcentaje.						
Para una caída de tensión constante prefijada en un 10 %.						
Línea con:	Caída de tensión en porcentaje	Transferencia y Cos $\phi$		Pérdidas de P en mega watt.	Pérdidas de Q en mega var.	Límite de estabilidad.
Un tramo.	10,12	100 MVA	0,90	3,29	17,50	504,8 $\angle$ 79° MW
Ocho tramos.	10,11	94 MVA		3,79	15,31	471,9 $\angle$ 76° MW
Diferencias	0,10	- 6,00 %	----	-13,19 %	14,30	6,99/3,94 %
Para una transferencia constante.						
Línea con:	Caída de tensión en porcentaje	Transferencia.		Pérdidas de P en mega watt.	Pérdidas de Q en mega var.	
Un tramo.	8,21	90 MVA	0,92	2,55	13,58	
Ocho tramos.	8,97			3,40	13,71	
Diferencias	8,47	----	----	-25,00	-0,95	

## CONCLUSIONES

Se mostraron los resultados y las características matemáticas de un algoritmo que modela las líneas de transporte de energía eléctrica trifásicas de hasta ocho (8) tramos con datos diferentes y calcula sus parámetros equivalentes, inductivos y capacitivos de fase y de secuencia. Se demostró que puede mejorarse la calidad de los resultados de los cálculos de flujo de cargas, corto circuito y estabilidad si las líneas con diferentes estructuras, conductores, resistividad del terreno, etc. se dividen en tramos que tengan en cuenta estas diferencias en los datos. Para los casos mostrados, las diferencias encontradas entre los resultados *exactos* y los *aproximados* fueron apreciables. Debe significarse que estos resultados no deben tomarse como típicos sino como indicadores de que según sea el modelo utilizado para "N" líneas conectadas en cascada, así serán los parámetros de secuencia obtenidos.

## REFERENCIAS

1. LLAMO LABORÍ, H. S. *Cálculo automatizado para el diseño de las líneas de Transporte de energía eléctrica*". Tesis para el grado de Dr. en Ciencias Técnicas, Universidad "José Antonio Echeverría", CUJAE, La Habana. 1995..
2. HALLEY H. et al. *Untransposed EHV line computations*. IEEE Transactions on PAS, Pp 291-296. 1964 p.
3. LLAMO LABORÍ, H. S. *Algoritmos para calcular los parámetros equivalentes de hasta ocho líneas de transmisión conectadas en cascada*", mejora al Paquete de programas PARLINC. Universidad "José Antonio Echeverría, CUJAE, La Habana: 2009,

## AUTOR

### **Héctor Silvio Llamo Laborí**

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba.