



APLICACIONES INDUSTRIALES

Parámetros equivalentes de fase y secuencia de hasta ocho líneas de transmisión conectadas en cascada

Equivalent parameters of phase and sequence of until eight transmission lines connected in cascade

Hector Silvio - Llamo Laborí

Centro de Investigaciones y Pruebas electro energética CIPEL, Facultad de Eléctrica, Instituto Tecnológico de La Habana, Cujae, Cuba.

RESUMEN/ABSTRACT

En el Sistema Electro Energético Nacional (SEN) existen líneas de transporte de energía eléctrica conectadas en serie que, por tramos, poseen diferentes datos. Su representación en los programas para calcular flujos de carga, cortocircuitos y estabilidad obligaría a definir tantos nodos ficticios adicionales como el número de líneas en cascada menos uno dificultando el trabajo y aumentando el número de nodos de la red eléctrica analizada. En este trabajo se presentan las características 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 Globales (CGMG), a partir de ellas, las matrices impedancia (Z) y admitancia (Y) y, finalmente, los parámetros de secuencia cero y positiva de la línea equivalente de hasta ocho líneas diferentes conectadas en cascada.

Palabras clave: líneas de transmisión, cascada, cuadripolos, constantes generalizadas matriciales

In the National Electro Energetic System (NES) there is electric energy transportation lines connected 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 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, 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 Global Matrix Generalized Constants (GMGC), from it, the impedance (Z) and admittance (Y) matrices and finally, the zero and positive sequence parameters equivalents to N different lines connected in cascade.

Key words: transmission lines, cascade, cuadripolos, matrix generalized constants.

INTRODUCCIÓN

En las redes de transmisión, subtransmisión y distribución primaria de energía eléctrica hay líneas, alimentadores y ramas con estructuras, conductores y cables protectores o neutros que son diferentes para distintos tramos de la línea conectados en cascada.

En un estudio realizado a la región occidental del SEN, de treinta dos líneas estudiadas, trece, que representan un 40 % del total, estaban formadas por dos, tres, cuatro y cinco tramos diferentes detectándose que se utilizaban estructuras, conductores y cables protectores diferentes. Estas desigualdades implican flechas diferentes y su conjunto, parámetros diferentes por tramo. De aquí, la necesidad de un algoritmo que calcule los parámetros de fase y de secuencia de una línea equivalente.

En las redes de transmisión, los parámetros inductivos y capacitivos, de fase y secuencia de las líneas de transmisión se calculan considerando la existencia de un solo tipo de estructura para toda la línea, una sola flecha

para los conductores y otra para los cables protectores, 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. [1, 2] Su efecto se incluye en las matrices (Z) y (Y) mediante una reducción de Kron. [3]

Aunque los parámetros de las líneas de transmisión pueden medirse [4] en Cuba no hay recursos para hacerlo y lo que se hizo fue modificar el paquete de programas PARLINC¹ para que modelara en cantidades de fase, mediante sus Constantes Generalizadas Matriciales (CGM) [5], de forma rápida y con una buena exactitud las líneas de transporte de energía eléctrica con la única limitación de que tienen que ser trifásicas pero con hasta siete circuitos en la misma torre o en torres diferentes en el mismo derecho de vía, cualquier número de conductores por fase y cualquier nivel de tensión. Las líneas, con hasta ocho tramos diferentes, se modelan mediante las CGM (A), (B), (C) y (D), de un orden igual a tres por el número de circuitos de la línea y se calcula el cuadripolo global de las N líneas mediante su producto matricial consecutivo en el mismo orden en que aparecen los tramos. Al cuadripolo global 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 y si hay más de un circuito, los parámetros mutuos de secuencia cero entre ellos. Este nuevo algoritmo permite mejorar la calidad de los resultados de los cálculos de flujos de carga, cortocircuitos estabilidad y los resultados del Estimador de Estado [6] mediante una representación matemática más exacta de las líneas de transporte de energía eléctrica con las características antes mencionadas.

DESARROLLO

Modelo matemático de N líneas conectadas en cascada

Para simplificar la explicación se supondrá el caso particular de una línea de transmisión dividida en tres tramos, que tienen longitud y otras características que los hacen diferentes entre si conectados en cascada (figura 1).

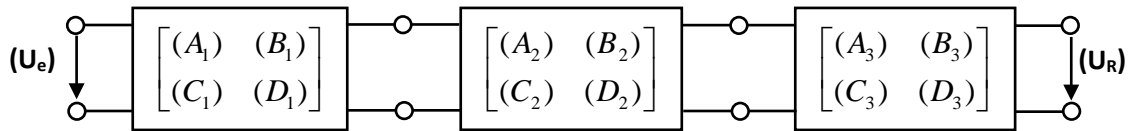


Fig. 1. Línea con tres tramos diferentes conectados en cascada.

El cuadripolo equivalente que representa los tres (o N) tramos de una línea de transmisión conectados en cascada se obtiene mediante el producto matricial [5], vea la ecuación (1):

$$\begin{bmatrix} (A_{Eq}) & (B_{Eq}) \\ (C_{Eq}) & (D_{Eq}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A_1) & (B_1) \\ (C_1) & (D_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (A_2) & (B_2) \\ (C_2) & (D_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (A_3) & (B_3) \\ (C_3) & (D_3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

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. La matriz impedancia ya se tiene pues como es conocido, vea la ecuación (2):

$$(Z_{Eq}) = (B_{Eq}) \quad (2)$$

La matriz admitancia se obtiene a partir de las CGM (A_{Eq}) y (C_{Eq}) mediante la ecuación (3):

$$(Y_{Eq}) = (0) + j(B_{Eq}) = (C_{Eq}) \left\{ \frac{1}{2} [(1) + (A_{Eq})] \right\}^{-1} \quad (3)$$

¹ El programa PARLINC se ha utilizado para calcular los parámetros de secuencias de las líneas a 110 y 220 kV, del sistema eléctricoenergético nacional cubano. Se encuentra en la intranet de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de La Habana, Cujae y en el departamento de Desarrollo de la Unión Eléctrica de Cuba.

Si la línea tiene más de un circuito, por ejemplo, dos, las matrices impedancia y admitancia tienen la forma de la ecuación (4):

$$(Z_{Eq})_{DC} = \begin{bmatrix} (Z_{Eq})_{11} & (Z_{Eq})_{12} \\ (Z_{Eq})_{21} & (Z_{Eq})_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

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. (ecuaciones (5) y (6).

$$(Z_{S_{Eq}})_i = (S)^{-1} (Z_{Eq}) (S) = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{00} & \underline{Z}_{01} & \underline{Z}_{02} \\ \underline{Z}_{10} & \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{20} & \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$(Y_{S_{Eq}})_i = (S)^{-1} (Y_{Eq}) (S) = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{00} & \underline{Y}_{01} & \underline{Y}_{02} \\ \underline{Y}_{10} & \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{20} & \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Siendo i el índice del circuito considerado ($i = 1$ ó $i = 2$) 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:

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

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 I y II (ecuaciones (7) y (8):

$$Z_{m0} = R_{m0} + jX_{m0} \text{ohm y} \quad (7)$$

$$Y_{m0} = jB_{m0} \text{siemen} \quad (8)$$

Características de los algoritmos desarrollados

El algoritmo desarrollado para calcular los parámetros equivalentes de las líneas de transporte de energía eléctrica con hasta ocho tramos diferentes conectados en serie está formado por tres programas enlazados mediante el organigrama de la figura 2, son DATSERIE.EXE, CGMEQUIV.EXE y PARSERIE.EXE. Dichos programas realizan las siguientes funciones;

- DATSERIE: Lee, organiza y almacena los datos de hasta ocho tramos conectados en cascada y calcula y almacena las CCGMM de cada tramo.
- CGMEQUIV: Calcula y almacena las CCGMM Globales y las matrices de los parámetros de fase Impedancia (Z) y admitancia (Y) para los N tramos conectados en serie.
- PARSERIE: Calcula y muestra, para la línea equivalente, los resultados siguientes:
 1. Los parámetros de secuencia de los circuitos Π Equivalente y Π Nominal mostrando el error máximo en porcentaje que se comete si se utiliza un circuito Π Nominal en lugar de un Π Equivalente.

2. Las impedancias característica y a impulso.
3. Las constantes de atenuación y de ángulo de fase.
4. Los desbalances a las secuencias cero y positiva que introduce la línea en el sistema eléctrico con el recibo en cortocircuito que es la peor condición.
5. Los parámetros mutuos de secuencia cero entre los NCL circuitos de la línea equivalente.
6. La potencia natural y la SIL (*Surge Impedance Loading*) de la línea equivalente.
7. La potencia reactiva generada por la línea para una tensión dada.
8. Las matrices Impedancia (Z) y admitancia (Y) de los parámetros de fase de un orden tres por el número de circuitos de la línea ($3 \cdot NCL$).
9. Permite analizar la cargabilidad de la línea con tres resultados:
 - a) Transferencia y pérdidas de potencia activa y reactiva para una caída de tensión y un factor de potencia prefijados por el usuario.
 - b) Caída de tensión y pérdidas de potencia activa y reactiva para una transferencia de potencia y un factor de potencia prefijados por el usuario.
 - c) Límite de estabilidad estática de la línea aislada del sistema eléctrico de potencia del cual forma parte a partir de los mega watt máximos para un ángulo de potencia máximo δ .
10. Es posible cambiar los resultados de ohm y siemen a por unidad y viceversa.

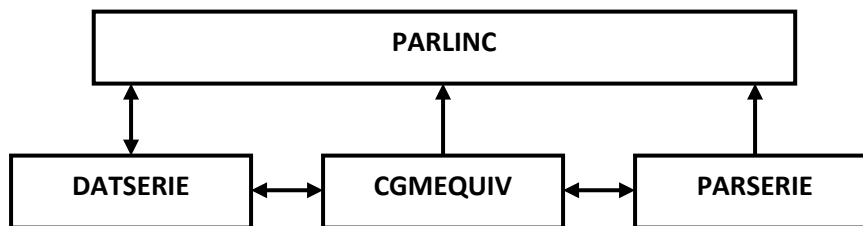


Fig. 2. Organigrama que muestra los enlaces entre los tres programas desarrollados y el programa principal PARLINC del paquete homónimo.

RESULTADOS PRÁCTICOS

Una línea de transmisión a 220 kV del SEN cubano está formada por cuatro tramos diferentes con los datos mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Datos de una línea, a 220 kV con cuatro tramos de datos diferentes

Tramo:	1	2	3	4
Conductor en las fases	AC400/51	AC400/51	AC400/51	AC400/51
Número de conductores/fase	1	1	1	2
Cable Protector	AC70/72	3/8"10A	AC70/72	AC70/72
Flecha de los conductores	11,0 m			
Flecha de los C. Protectores	8,8 m			
Los C. Protectores están:	Conectados a tierra.			
Longitud del tramo.	26,7 km	52,5 km	89,3 km	26,5 km
Longitud total	195 km			
Resistividad del terreno	500 Ω m	1 000 Ω m	100 Ω m	200 Ω m
Tipo de torre en el tramo	CP26K	CP23C	CP26K_Esp	P235

Los conductores de fase son iguales para los cuatro tramos, pero el tramo cuatro tiene dos en lugar de un conductor por fase. Los cables protectores de los tramos 1, 3 y 4 son iguales, de aluminio reforzado con acero con una resistencia eléctrica de $0,502 \Omega/\text{km}$, un Radio Medio Geométrico (RMG) de $3,068 \text{ mm}$ y un diámetro de $15,4 \text{ mm}$, pero el tramo 2 tiene cables protectores de acero con una resistencia de $3,040 \Omega/\text{km}$, un diámetro de $9,52 \text{ mm}$ y un RMG de $0,00305 \text{ mm}$. Esta diferencia en los datos debe tenerse en cuenta, porque modifica los parámetros de secuencia cero de la línea [7].

El valor de la resistividad del terreno varía ampliamente tomando valores entre 50 y $10\,000 \Omega\text{m}$ puntualizando la importancia de conocer que su valor incrementa asintóticamente la resistencia de secuencia cero de las líneas de transmisión. Es usual tomar un valor homogéneo de $100 \Omega\text{m}$, normalizado, cuando se desconoce su valor exacto [8-9]. Para determinar el efecto de no considerar los datos reales de una línea de transmisión se compararon los resultados para dos casos diferentes. En el primero, la línea se modeló con los cuatro tramos y los datos dados en la tabla 1. En el segundo, teniendo en cuenta que el tramo No. 3 es el más largo, con $89,3 \text{ km}$ que representan el $45,79 \%$ de la longitud total, se modeló una línea de 195 km , con los datos del tramo No. 3 (tabla 1). La tabla 2, muestra los resultados de las dos líneas, calculados con el paquete PARLINC y la comparación porcentual entre ellos.

Tabla 2. Resultados y comparación de la línea con 4 y con 1 tramo

Modelo de la línea	Parámetros de secuencia cero en por unidad. 100 MVA y 230 kV bases.					
	Resistencia	Diferencia.	Reactancia	Diferencia.	Susceptancia.	Diferencia.
4 tramos	0,11320	—	0,47220	—	0,21290	—
1 tramo	0,10130	-10,51 %	0,42930	-9,09 %	0,21260	-0,14%
Modelo de la línea	Parámetros de secuencia positiva en por unidad. 100 MVA y 230 kV bases.					
	Resistencia	Diferencia.	Reactancia	Diferencia.	Susceptancia	Diferencia
4 tramos	0,02918	—	0,16640	—	0,3978	—
1 tramo	0,03195	9,49%	0,18020	8,29 %	0,3476	-12,62 %

Análisis de los resultados de la tabla 2

La tabla 2, muestra que los parámetros inductivos más afectados son los de secuencia cero [10]. La resistencia y la reactancia calculadas con un solo tramo, son menores en un $10,51 \%$ y mayores en un $9,49 \%$ respectivamente. Los de secuencia positiva son afectados también de forma notable, aunque en ellos no tienen efecto ni la resistividad del terreno ni el tipo de cable protector utilizado. [11]. La resistencia y la reactancia se incrementaron en un $9,49 \%$ y un $8,29 \%$ respectivamente. Con los parámetros capacitivos, la influencia es casi imperceptible en la secuencia cero, pero la reducción de la susceptancia de secuencia positiva es notable (un $12,62 \%$). En [6], se afirma que los incrementos de la impedancia inductiva de secuencia positiva y la reducción de la susceptancia capacitiva de la misma secuencia pueden provocar errores no permisibles en los resultados de un estimador de estado porque modifican las tensiones y las transferencias de potencia activa y reactiva en las cabezas de las líneas de transmisión.

Influencia del modelo utilizado en la cargabilidad de las líneas de transmisión

Otro de los análisis realizados, para comprobar los resultados de [6], consistió en determinar la cargabilidad de la línea con los dos modelos utilizados. La tabla 3, muestra los resultados alcanzados.

Análisis de los resultados de la tabla 3

Los cálculos mostrados se calcularon suponiendo la línea con un circuito Π , por ende solo se utilizaron los parámetros de secuencia positiva. Cuando se modela la línea con un solo tramo de 195 km con los datos del tramo

más largo, vea la tabla 1, la potencia natural se reduce en un 10,23 % por lo que la cargabilidad de la línea se supone por debajo de la real. Esta condición queda corroborada en el resto de los indicadores analizados.

Tabla 3. Cargabilidad de los dos modelos comparados

Modelo	P. Natural	Diferencia	Pérdidas	Diferencia	Pérdidas	Diferencia
4 tramos	153,50 MW	—	2,60 MW	—	14,80 Mvar	
1 tramo	137,80 MW	-10,23%	2,98 MW	14,62%	16,79 Mvar	13,45%
Tensión del recibo en kilo volt de línea					Potencia en mega watt	
Modelo	Módulo	Diferencia	Ángulo	Diferencia	Envío	Diferencia
4 tramos	227,3	—	-7,79°	—	92,60	—
1 tramo	224,0	-1,32 %	-8,51°	9,24 %	92,98	0,41%
Potencia en mega volt ampere reactivos.						
Modelo	Envío	Diferencia	Recibo	Diferencia		
4 tramos	38,97	—	24,17	—		
1 tramo	43,90	12,65%	27,11	12,16%		

Para una carga constante en el recibo de 100 MW, factor de potencia 0,90 en atraso y una tensión en el envío de 245 kV aparentemente:

- Las pérdidas de potencia activa se incrementan en un 14,62 %.
- Las pérdidas de potencia reactiva se incrementan en un 13,45 %.
- La tensión del recibo es menor en un 1,32 %.
- El ángulo se incrementa en un 9,24 %, estando más cerca del límite de estabilidad estática.
- Las potencias activas del envío son prácticamente iguales (diferencia de solo un 0,41 %).
- Las potencias reactivas del envío y el recibo tienen diferencias importantes pues están en 12,65 y el 12,16 % respectivamente. Estas diferencias pueden hacer que el Estimador de Estado indique errores no permisibles debidos a errores en los parámetros de la línea [6] y a las mediciones.

CONCLUSIONES

Se mostraron las características de un algoritmo que, integrado al paquete de programas PARLINC, modela las líneas de transporte de energía eléctrica trifásicas en cantidades de fase de hasta ocho (8) tramos con datos diferentes, calcula sus parámetros equivalentes, inductivos y capacitivos de fase y secuencia y permite analizar su comportamiento eléctrico en estado estacionario incrementando la calidad de los resultados de los programas de computación, de los cuales, dichos parámetros son datos.

RECONOCIMIENTO

El autor desea agradecer al MSc. Ing. Ariel Santos Fuentesfría por su colaboración en la búsqueda de las referencias bibliográficas que han hecho posible la presentación de este trabajo, para su publicación.

REFERENCIAS

- [1] CDEC-SING. “Memoria de cálculos de parámetros eléctricos líneas de transmisión centrales termoeléctricas Tocopilla, diesel Tamaya y SS/EE Salar y A.” [en línea]. Informe Técnico, 2013. [Consultado: enero 2016].
Disponible en http://www.cdcsing.cl/pls/portal/cdec.pck_pag_web_pub.get_file?p_file=REL_CSF_ECL_ENE14_IFT_003.pdf&p_tipo=A.RELE - Reliable Energy Ingeniería Limitada
- [2] Zapata Centeno, J. C.; “Análisis de las líneas de transmisión en estado permanente”. Tesina de maestría. Facultad de Ingeniería Mecánica eléctrica. Universidad Veracruzana. 2012. [Consultado: enero de 2016].
Disponible en: web: <http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/32535>

- [3] Traphöner Jonas, B.E.; "Evaluation of Impedance Parameters in Transmission Lines." Thesis Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Engineering. 2014. [Consultado: enero 2016]. Disponible en web: <http://textlab.io/doc/1020731/master-document-template---the-university-of-texas-at-austin>.
- [4] Zhongzhu, Xu, et al. "Live line measuring the parameters of 220 kV transmission lines with mutual inductance in Hainan Power Grid." [online]. *Engineering*, 2013, vol. 5, n. 1, p. 146-151. [Consultado: enero 2016]. Disponible en web: <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=26650>. DOI: 10.4236/eng.2013.51B027.
- [5] Halley H. et al. "Untransposed EHV line computations". *IEEE Transactions on PAS*. p 291-296. 1964.
- [6] Bradley S. L.; "A new Method of Determining the Transmission Line Parameters of an Untransposed Line Using Synchrophasor Measurements". Thesis submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Electrical Engineering. Blacksburg, Virginia. August 28, 2015.
- [7] Kurokawa, et al. "Behavior of Overhead Transmission Line Parameters on the Presence of Ground Wires", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, vol. 20, n. 2, p. 1669-1676, ISSN0885 – 8977.
- [8] Sanjay Bajadoorsingh et al. "A Re-engineered Transmission Line parameter Calculator". Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, the University of the West Indies, St. Augustine, The West Indian Journal of Engineering. 2015, vol. 38, n.1, p. 52-60, ISSN 0511-5728.
- [9] MCD Geosciences and Engineering, "sinkhole-expert.com,". [Online]. Disponible: <http://sinkhole-expert.com/wp-content/uploads/photo-5a.jpg>. 2011.
- [10] RABAH, D., "Evaluation of the zero sequence impedance of overhead high voltage lines". *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2013, vol. 78, [Consultado: enero 2016], Disponible en: <http://waset.org/Publications/evaluation-of-the-zero-sequence-impedance-of-overhead-high-voltage-lines/8395>, ISSN 2010-376X, 2010-3778.
- [11] AC Transmission Line Model Parameter Validation. A report to the Line Protection Subcommittee of the Power System Relay Committee of the IEEE Power & Energy Society Prepared by working group D6.2014.[Consultado: enero 2016]. Disponible en web: <http://www.pes-psrc.org/Reports/AC%20Transmission%20Line%20Model%20Parameter%20Validation.pdf>

AUTOR

Hector Silvio Llamó Laborí

Ingeniero electricista, Doctor en Ciencias, Profesor Titular, Centro de Investigaciones y Pruebas electro energética CIPEL, Facultad de Eléctrica, Instituto Tecnológico de La Habana, Cujae, Cuba.

E-mail: hllamo@electrica.cujae.edu.cu