

## Modelación de Regímenes de Redes Eléctricas en Presencia de Distorsión Armónica

I. González<sup>1</sup> S. Marrero<sup>1</sup> A. Legra<sup>2</sup> A. León<sup>1</sup> X. Proaño<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Técnica de Cotopaxi.

E-mail: [iliana.gonzalez@utc.edu.ec](mailto:iliana.gonzalez@utc.edu.ec); [secundino.marrero@utc.edu.ec](mailto:secundino.marrero@utc.edu.ec);  
[manuel.leon@utc.edu.ec](mailto:manuel.leon@utc.edu.ec); [xavier.proaño@utc.edu.ec](mailto:xavier.proaño@utc.edu.ec)

<sup>2</sup>Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, ISMMM, Cuba

E-mail: [alegra@ismm.edu.cu](mailto:alegra@ismm.edu.cu)

### Resumen

En el artículo se presentan la comparación de la modelación de los elementos en las redes eléctricas en presencia de armónicos superiores de corriente y tensión. Se muestra que en el cálculo de los regímenes de trabajo de la red, resulta necesario considerar el efecto piel (Skin Effect) y las corrientes de Eddy. Al tener en cuenta estos elementos, el error en los cálculos del consumo de energía eléctrica se reduce en gran medida. Se programó una herramienta computacional (DYCSE) para determinar el flujo armónico por el método de Gauss-Seidel que fue comparado con el cálculo realizado por el software Easy Power que utiliza la técnica de inyección de corriente y así demostrar la factibilidad de uso del DYCSE a partir del grado de coincidencia en los resultados obtenidos por ambos métodos en un esquema patrón.

**Palabras clave**— redes eléctricas, armónicos, factor de potencia, voltaje, flujo de potencia

### Abstract

This article shows comparison compares different methods of modeling elements of the electrical network in the presence of harmonics in voltage and current, but also studied and compared. It is shown that when calculating the power network should be considered a surface effect and the effect on the occurrence of eddy currents. When accounting for these factors, the calculation error mode power consumption is significantly reduced. A computational tool (DYCSE) is designed to determine the harmonic flow by the Gauss-Seidel method to be compared with the calculation performed with Easy Power software that uses the technique of current injection and demonstrate the feasibility of using the DYCSE to from the degree of agreement in the results for both method in a pattern scheme.

**Index Terms**— electrical network, harmonics, power factor, voltage, power flow.

Recibido: 04-07-2016, Aprobado tras revisión: 09-12-2016

Forma sugerida de citación: González, P. I.; Marrero, R. S.; Legra, L. A.; León, S. A.; Proaño, M. X. (2017). "Modelación de regímenes de redes eléctricas en presencia de distorsión armónica". Revista Técnica "energía".

No. 13, Pp. 97-105

ISSN 1390-5074

## 1. INTRODUCCIÓN

El mejoramiento de la eficiencia en las redes eléctricas, en la actualidad ha adquirido una nueva dimensión, debido al incremento de cargas no lineales en el sector industrial. Uno de los problemas a resolver es la elección de los métodos de cálculo de los flujos de potencia, para evaluar el funcionamiento de la red y obtener las diferentes variables eléctricas con valores cercanos a los indicadores del sistema analizado. Obviamente, antes de seleccionar el método de cálculo, es necesario definir los modelos para los diferentes elementos que componen la red teniendo en cuenta cada uno de los parámetros a considerar para el análisis de los flujos de potencia armónicos. Es por eso que el planteamiento de la tarea en este trabajo, se divide en dos partes: el modelado de la red eléctrica y la selección adecuada del método de cálculo.

En el sector residencial, existen numerosos aparatos eléctricos que generan armónicos de voltaje y de corriente e incrementan las pérdidas de potencia, contaminan las líneas de suministro eléctrico, y ocasionan daños tanto a las propias redes de energía como a otras cargas vecinas. Un estudio de este fenómeno y su impacto aparece en el trabajo [1] donde se realiza un análisis matemático del contenido armónico de corriente en un circuito residencial con cargas no lineales, mostrando la contaminación armónica que éstas introducen a la red, además se propone el modelo que para este tipo de carga generadora de armónico se debe considerar.

Por otro lado en la actualidad también se requiere dar respuesta a necesidades surgidas con la tecnología FACTS (Flexible AC Transmission Systems), basada en la electrónica de potencia, y el desarrollo de herramientas de flujo de carga que modelan y simulan la red, donde se emplean métodos como por ejemplo el de la carga equivalente de rápida convergencia, variables de estado con algoritmos de Newton-Raphson (NR) y la inyección de potencia en las barras que tiene como ventaja que solo modifica los  $\Delta P$  y  $\Delta Q$  de las barras entre las cuales se encuentra instalado el dispositivo, este último método si bien resulta más robusto que los anteriores, presenta el inconveniente de requerir muchas interacciones para la convergencia sin el uso de un vector de arranque [2].

Otro aspecto a considerar, es el incremento de las unidades de generación distribuida integradas en las redes de distribución. La red de distribución deja de comportarse como una red pasiva y por lo tanto, los métodos tradicionales para flujo de carga en sistemas de distribución deben ser modificados. En este sentido el trabajo [4] propone un algoritmo de flujo de potencia trifásico desbalanceado con generación

distribuida que opera de forma satisfactoria, aunque no se tuvo en cuenta la presencia de componentes armónicas en la red.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los principales elementos de la red de suministro eléctrico industrial se definen como: líneas de transmisión, transformadores, motores, reactores, y generadores fundamentalmente.

Tabla 1: Valores de  $R_{exp}$  y FCT para diferentes elementos de la red

Elementos	Resistencia	
	$R_{exp}$	FCT
Transformador	0,5-1,0	1,0-3,0
Sistema	0,0-0,8	-
Generador	0,3-0,6	-
Línea/cable	0,5	-
Reactor	0,5-1,0	0,8-3,0
Motor	0,2-0,4	-

Cuando se considera solo la primera armónica, la resistencia activa  $R_{1L}$  y la reactancia  $X_{1L}$  de la línea de transmisión son magnitudes constantes. Sin embargo en presencia de armónicos superiores la resistencia real, según diferentes estudios [5, 6], puede representarse en las siguientes formas.

$$R_{Ln} = R_{1L}(1 + An^B) \quad (1)$$

$$X_{Ln} = X_{1L} \cdot n$$

donde A, B son coeficientes que tienen valores entre 0.5 y 1.5 respectivamente y n es el número de armónico

$$R_{Ln} = R_{1L} * n^{Re_{xp}} \quad (2)$$

$$X_{Ln} = X_{1L} * n$$

donde  $R_{exp}$  es un coeficiente que se determina experimentalmente y es igual a 0.5

$$R_{Ln} = R_{1L} * \left( \frac{1 + FCT * n^2}{1 + FCT} \right) \quad (3)$$

donde FCT – factor de las corrientes de Eddy

De la misma manera se debe proceder con el resto de los elementos, cabe señalar que las expresiones mostradas para la resistencia han sido obtenidas de forma experimentalmente [6].

Autores como [7, 8, 9] señalan que la detección y la predicción de armónicos constituyen los dos campos principales del análisis digital de armónicos y que permiten hacer una evaluación efectiva de la

calidad de la energía. En primer lugar se determina y procesa en tiempo real la información del contenido armónico monitoreado en el sistema, mientras que por último se predice la distorsión armónica en la red mediante modelos analíticos implementados para simulación digital.

Entre las metodologías para el análisis de armónicos se destacan las propuestas por [7, 8], donde se señala el método de dominio Armónico, que linealiza el sistema alrededor de un punto particular de operación de componentes no lineales y variantes en el tiempo para obtener así una relación lineal entre voltajes y corrientes armónicas, lo que resulta solo válido en la proximidad al punto de operación. Obteniéndose como resultado un equivalente Norton armónico, en donde explícitamente está representado el efecto de acoplamiento entre armónicos y desbalance entre fases.

También el método del Dominio del tiempo, utilizado para describir elementos no lineales y variantes en el tiempo a través de una ecuación diferencial ( $\dot{x} = f(x, t)$ ) con el uso de un vector de estado de  $m$  elementos, ha confrontado limitaciones por el uso de la integración numérica Runge - Kutta. Esto ha dado lugar a la aparición de métodos como la convergencia al Ciclo Limite, utilizando técnicas de aceleración de la convergencia de las variables de estado mediante el método NR en el dominio del tiempo, que han sido desarrolladas para incrementar la eficiencia y eliminar la limitante en la aplicación de los métodos convencionales

Entre los métodos más utilizados para el análisis de armónico se encuentra el dominio de la frecuencia, que utiliza el marco de referencia de las componentes de secuencia para determinar la propagación de corrientes armónicas, características mediante inyección de fuentes de corriente ideales en la red eléctrica. Este método unido a diferentes modelos de elementos de la red fue utilizado por [10] para evaluar cuáles de los elementos de una red industrial tienen un mayor nivel de afectación por la presencia de armónicos en función del % de cargas lineales y no líneas existentes en una nodo.

Por lo tanto, a partir de los resultados de los estudios anteriores [8, 10] realizados para la modelación de la red eléctrica, y de acuerdo con el contenido armónico de la tensión y la corriente, existen diferentes métodos para realizar este análisis. Si consideramos los resultados de la comparación de los diferentes estudios realizados, podemos deducir que la expresión (3) da los resultados más precisos, y ante las dificultades técnicas para determinar FCT,

entonces se asume con frecuencia la expresión que utiliza la resistencia  $R_{exp}$  en la expresión (2).

## 2.1. Cálculo de flujo de potencia

Entre los métodos más conocidos para el cálculo de las redes eléctricas se destacan principalmente los métodos Gauss-Seidel (GS), NR, NR modificado, inyección de corriente y potencia [11, 12, 13, 14] entre otros. Todos estos métodos en su mayoría implican la solución del sistema de ecuación:

$$[Y][V] = [I] \quad (4)$$

Donde  $[Y]$ ,  $[V]$ ,  $[I]$  son las matrices de admitancia, tensión y corriente respectivamente en las ramas y nodos del esquema equivalente de la red en forma compleja.

El método de GS se caracteriza por el hecho de que su solución se logra, incluso cuando los valores iniciales de  $U$  y  $I$ , están lejos de los valores reales. Por lo tanto, como consecuencia, el proceso de cálculo y convergencia resulta lento. En este caso, es posible utilizar un factor de aceleración, lo que resulta su principal ventaja.

El método NR es ampliamente conocido por su fiabilidad y rápida convergencia. Sin embargo, algunos expertos, como Sainz [15] argumentan que en este caso, la solución puede no converger, si los valores de las condiciones iniciales no están lo suficientemente cerca del valor real.

Autores como [7, 16] y los diseñadores del software Easy Power (aplicación informática que permite el cálculo de flujos de potencia en redes industriales), plantean el uso de la técnica de inyección de corriente (Fig.1) que presentan un mejor rendimiento en comparación con los métodos anteriores al utilizar un algoritmo más robusto y preciso con técnicas únicas de algoritmos de dispersión para encontrar las condiciones de estado estable del flujo de potencia de un sistema en operación, lo que ha tenido poca utilización y no ha sido muy difundida la información al respecto.

En el algoritmo de la Fig.1 se ejecuta en dos pasos, primeramente se hace un barrido desde los nodos terminales hasta el nodo fuente aplicando la primera ley de Kirchhoff ( $I_m$  - balance de corriente en los nodos  $m$ ,  $I_{km}$  - corriente de los elementos  $k$ ) y luego se hace el barrido desde la fuente hasta los nodos terminales aplicando la segunda ley de Kirchhoff ( $V_m$  tensión de nodos). La convergencia ocurre cuando la diferencia de las pérdidas de potencia de dos iteraciones consecutivas  $\Delta P$ , alcanza una tolerancia preestablecida.

También en publicaciones como [11] se muestra una herramienta computacional APSd (Analizador de sistemas de potencia y distribución) que permite la evaluación de régimen permanente de sistemas potencia con el método NR combinado con el método propuesto por D. Shimohammadi [12] para resolver un sistema de ecuaciones no lineales que expresan la potencia real y reactiva en términos de los voltajes de barra a frecuencia fundamental, cuyos resultados fueron satisfactorios al ser validados con otras herramientas de corridas de flujo, pero solo para el armónico fundamental.

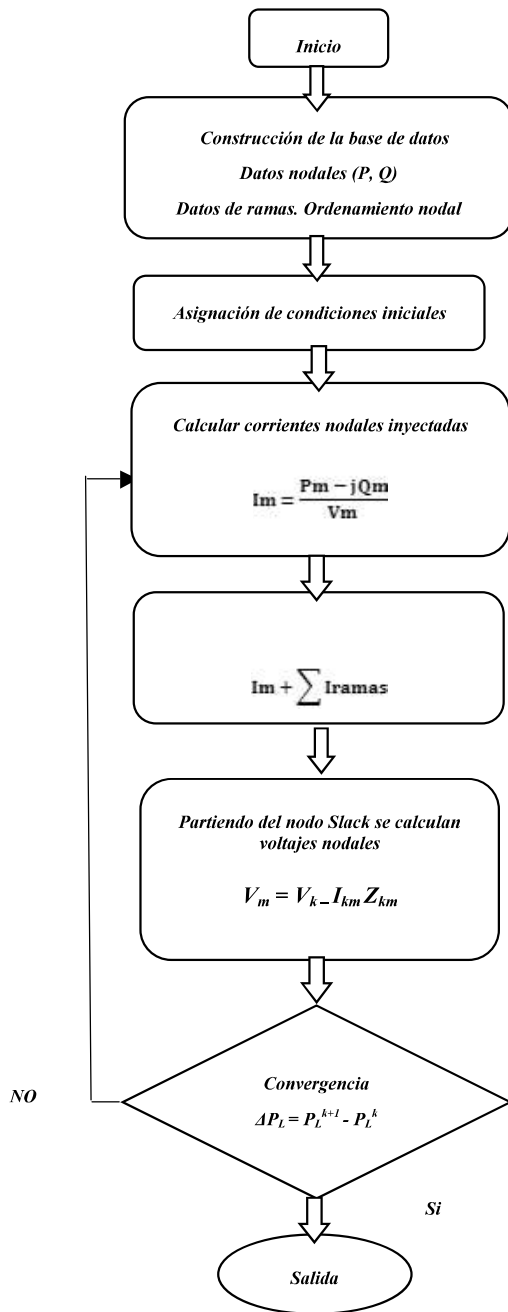


Figura 1: Algoritmo del método de inyección de corriente

También resulta necesario señalar como desventaja de GS, que posee una convergencia lineal, lo que resulta lento en comparación con NR que tiene una convergencia cuadrática

Soria S. L., 2003, [17] en un análisis comparativo realizado entre los métodos NR y GS señala que mientras la formulación en formato rectangular en GS trabaja bien, en el caso NR se requiere más memoria por utilizar un formato polar. Además GS requiere menos operaciones aritméticas por interacción, lo que constituye una ventaja en relación a NR que requiere más tiempo al necesitar calcular los elementos de la matriz Jacobiana en cada interacción. Esto hace que una iteración en NR equivalga a 7 iteraciones de GS aproximadamente para un sistema de gran dimensión.

Otra desventaja de GS es que el número de iteraciones se incrementa con el aumento de los nodos de la red, mientras que en NR esto no sucede, pues permanece constante.

Villa W. Metal, 2016 [18] ha propuesto el uso de algoritmos genéticos con una función de adaptación tradicional para lograr un flujo de potencia reactivo óptimo y reducir las pérdidas. En la actualidad también se han desarrollado métodos para el análisis de flujo armónico de cargas, que permiten obtener la tensión fundamental y armónica en todos los nodos de la red, así como los parámetros que caracterizan el comportamiento de los dispositivos no lineales para un estado de carga dado. Con base en lo anteriormente expuesto, se seleccionó el método GS atendiendo a sus ventajas de fácil programación, el uso eficiente de la memoria y su factibilidad de rápida convergencia en sistemas de dimensiones no elevadas, al utilizar un coeficiente de ajuste. Para el estudio del flujo de carga armónico en un sistema eléctrico, se confeccionó la herramienta informática DYCSSE con el algoritmo mostrado en la Fig. 2, de n nodos considerando los siguientes parámetros primarios:

- La matriz de admitancia del sistema [Y] (compleja, cuadrada y de orden n). Se obtiene a partir de los valores de resistencia y reactancia  $R_{EXP}$  en las ramas del sistema eléctrico;
- EL vector de orden n de potencias (P + j Q) donde P es la potencia activa y Q es la potencia reactiva (cada elemento del vector representa los valores de estas potencias en el nodo);
- El vector de orden n de voltajes (UR + j UI) donde UR es la componente real de la tensión y UI es la componente imaginaria (cada elemento del vector representa los valores

de la tensión nominal en un nodo y pueden expresarse también por sus magnitudes de tensión  $|U|$  y el ángulo  $\theta U$ .

Preliminarmente, se deben realizar las siguientes tareas antes de calcular los flujos de cargas:

- 1) La determinación de la matriz  $[Y]$  que se expresa en valores por unidad (PU).
- 2) La determinación de los vectores  $(P + j Q)$  y  $(U) = (U_R + j U_I)$  que permiten expresar el vector de corrientes  $(I)$  donde  $P + j Q$  están expresados en PU.
- 3) Establecer las matrices del sistema de ecuaciones  $[Y] (U) = (I)$  considerando que:

$$U_p = \frac{1}{Y_{pp}} \left( \frac{P_p - jQ_p}{U_{Rp} - jU_{Ip}} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (U_q Y_{pq}) \right) \quad (5)$$

Para  $p = 1, 2, \dots, n$ ; donde  $n$ - cantidad de nodos;  $P_p$  y  $Q_p$  - potencia activa y reactiva de las ramas  $p$  respectivamente;  $U_{Rp}$  y  $U_{Ip}$  - potencia activa y reactiva de los nodos respectivamente;  $Y_{pp}$  y  $Y_{pq}$  - Matriz admitancia propia y mutua compleja de las rama  $p$  y  $q$ ;  $U_p$  tensión en los nodos.

Es necesario precisar que los nodos del sistema eléctrico se van a clasificar en tres grupos: de balance (normalmente existe uno solo, mientras son conocidas la tensión y ángulo), de tensión controlada, que son aquellos donde se especifica el módulo, el valor de potencia activa y reactiva ( $P, Q$ ) y el ángulo de tensión y de carga, aquí se conocen las potencias activa  $P$  y reactiva  $Q$ , y las incógnitas son las tensiones y el ángulo. Para modelar los elementos del sistema fueron analizados los modelos propuestos por la IEEE Std 399-1997 [19], Anderson EEH 2003 [20], Fiodorov A.A. 1986 [21], Electrical Systems Analysis, Ins .Ltd 1991-2006 [22] y Ríos P.C. 2003 [23]. Donde se observa que existen diferentes tendencias para la determinación de la resistencia ( $R_h$ ) y la reactancia ( $X_h$ ) armónica evalúan por las expresiones (2) y (3) mientras que Fiodorov A. A, 1986 [21] considera el siguiente modelo aproximado:

$$R_h = R I \quad (6)$$

$$X_h = X I * h * K \quad (7)$$

donde  $R_h$  y  $R I$  son las resistencias armónica superiores y del armónico fundamental respectivamente,  $X_h$  la reactancia armónica y  $k$  representa un coeficiente que depende del tipo de elemento, estos modelos fueron experimentados por los autores en [10].

Teniendo en cuenta que en la literatura consultada se explican diferentes modelos para el análisis de flujo armónico, en el programa DYCSSE se ha implementado la posibilidad de usar los modelos propuestos en [19, 21].

### 3. ESTUDIO DE CASO

Para validar los resultados de la modelación en los flujos de potencia se realizaron dos pruebas con diferentes esquemas, la primera fue una comparación con los resultados de las corridas de flujo efectuadas con los modelos propuestos por ESA (Electrical Systems Analysis, Ins de EEUU) en [22] en el software Easy Power que presupone el cálculo de la reactancia armónica para las líneas y motores mediante las expresiones (2) y (3). Para esta comparación se procedió a resolver el sistema de cinco nodos (mostrado en la Fig.8.8 del Capítulo 8) del Stagg El Abiad [24] que se muestra en la Fig. 3. (ver resultados en la tabla 2).

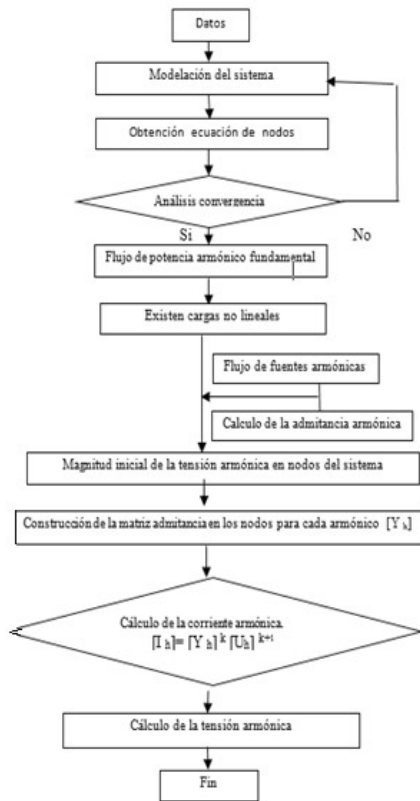


Figura 2: Algoritmo utilizado para el cálculo de flujo de potencia

Fuente: El autor

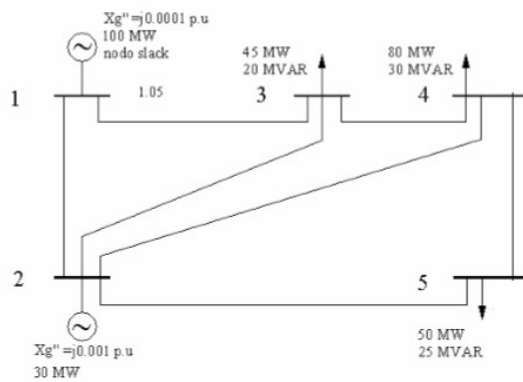


Figura 3: Red de prueba de Stagg & Abiad

Tabla 2: Comparación de resultados de cálculo

Desde un nodo a otro	Resultado		Resultado		% error	
	Stagg & Abiad		DYCSE			
	P	Q	P	Q	MW	MVA <sub>r</sub>
	MW	MVA <sub>r</sub>	MW	MVA <sub>r</sub>	%	%
1 - 2	88.800	8.600	88.856	8.579	0.063	0.243
1 - 3	40.700	1.100	40.719	1.155	0.022	0.640
2 - 1	-87.400	6.200	-87.446	6.157	0.052	0.500
2 - 3	24.700	3.500	24.692	3.545	0.009	0.523
2 - 4	27.900	3.000	27.935	2.962	0.040	0.445
2 - 5	54.800	7.400	54.822	7.343	0.025	0.663
3 - 1	-39.500	-3.000	-39.528	-3.011	0.031	0.131
3 - 2	-24.300	-6.800	-24.340	-6.783	0.045	0.195
3 - 4	18.800	-5.100	18.882	-5.198	0.092	1.142
4 - 2	-27.500	-5.900	-27.494	-5.927	0.007	0.316
4 - 3	-18.800	-3.200	-18.847	-3.208	0.053	0.098
4 - 5	6.300	-2.300	6.333	-2.284	0.037	0.186
5 - 2	-53.700	-7.200	-53.697	-7.169	0.003	0.359
5 - 4	6.300	-2.800	6.303	-2.833	0.003	0.384

Fuente: El autor

En la segunda prueba para la validación del flujo armónico se utilizó el esquema de la Fig. 4. En la tabla 3 se muestran los flujos de potencia a frecuencia fundamental por ambos softwares y en las tablas 4 y 5 las tensiones armónicas. Se pudo observar la cercanía de los resultados con un error admisible.

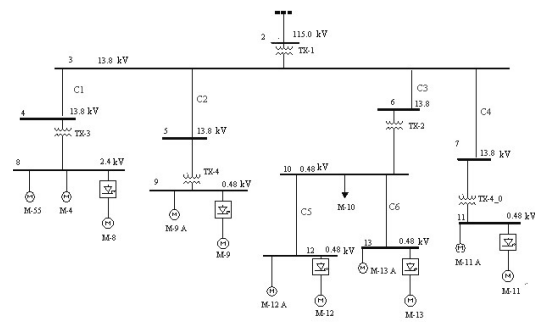


Figura 4: Esquema para validación de las tensiones armónicas calculadas con ambos software

Tabla 3: Comparación resultados de la comparación de los valores de P y Q obtenidos en el software DYCSE y Easy Power

Nodo	Easy Power P (MW)	DYCSE P (MW)	% error	Easy Power Q (MVA <sub>r</sub> )	DYCSE Q (MVA <sub>r</sub> )	% error
	01	-2,66	-2,66	0,00	0,64	0,64
2,66		2,66	0,00	-0,64	-0,64	0,03
02	5,57	5,57	0,01	-0,36	-0,36	0,04
	-5,57	-5,57	0,01	0,36	0,36	0,04
03	2,66	2,66	0,00	-0,60	-0,60	0,03
	2,21	2,21	0,00	1,34	1,34	0,00
	3,01	3,01	0,02	1,85	1,85	0,00
	1,82	1,83	0,01	1,19	1,19	0,01
	0,76	0,77	0,00	0,50	0,50	0,00
04	-1,50	-10,50	0,00	-4,27	-4,28	0,04
	8,00	8,00	0,00	5,13	5,13	0,04
	-5,56	-5,56	0,01	0,53	0,52	0,04
	2,08	2,08	0,02	1,42	1,42	0,01
	6,36	6,36	0,00	0,00	0,00	0,00
05	2,66	2,66	0,00	1,64	1,64	0,00
	2,44	2,44	0,01	1,53	1,53	0,01
	-2,21	-2,21	0,00	-1,34	-1,34	0,00
06	1,24	1,24	0,00	0,77	0,77	0,00
	0,97	0,97	0,00	0,56	0,56	0,00
07	-3,01	-3,01	0,01	-1,85	-1,85	0,00
	0,35	0,35	0,00	0,20	0,20	0,00
	2,66	2,66	0,00	1,64	1,64	0,00
08	-2,08	-2,08	0,03	-1,42	-1,42	0,03
	0,42	0,42	0,00	0,30	0,30	0,00
	1,66	1,65	0,02	1,11	1,11	0,01
08	-6,36	-6,36	0,01	0,00	0,00	0,00

Fuente: El autor

**Tabla 4: Tensiones obtenidas en el cálculo realizado con el Easy Power**

Tensiones (kV) para los diferentes armónicos obtenidos en el Easy Power						
Armónico	3	5	7	9	11	13
1	13,80	13,80	13,80	0,48	0,48	0,48
5	0,08	0,08	0,08	0,005	0,005	0,011
7	0,061	0,062	0,062	0,004	0,004	0,008
11	0,026	0,026	0,027	0,002	0,002	0,004
13	0,031	0,031	0,031	0,002	0,002	0,004
17	0,027	0,027	0,027	0,002	0,002	0,004
19	0,026	0,026	0,026	0,002	0,002	0,003
THD %	0,832	0,836	0,836	1,505	1,505	3,226

Fuente: El autor

**Tabla 5: Tensiones obtenidas en el cálculo con el DYCE**

Tensiones (kV) para los diferentes armónicos obtenidos en el DYCE						
Armónico	3	5	7	9	11	13
1	13.80	13.80	13.80	0.480	0.480	0.480
5	0.080	0.081	0.081	0.005	0.005	0.010
7	0.061	0.062	0.062	0.003	0.003	0.007
11	0.026	0.026	0.026	0.001	0.001	0.003
13	0.031	0.061	0.061	0.001	0.001	0.004
17	0.027	0.027	0.027	0.001	0.001	0.003
19	0.025	0.025	0.025	0.001	0.001	0.003
THD %	0.830	0.850	0.85	1.53	1.53	3.080

Fuente: El autor

El mayor error observado en la comparación de los cálculos es, en las tensiones (tabla 4 y 5) con ambos software siendo de 2,8%. Sin embargo, hay que señalar que los resultados de los cálculos con el DYCE se hicieron con una precisión hasta las centésimas, a pesar de esto, se puede observar que el método de GS utilizado en el DYCE con un factor de aceleración, puede calcular el flujo satisfactoriamente para red considerando el armónico fundamental o en presencia de distorsión armónica, donde se hace necesario aplicar la corrección con los factores que tienen en cuenta la influencia de los armónicos en todos los elementos de la red eléctrica, incluyendo transformadores y cargas.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La comparación de los resultados de los cálculos obtenidos por los dos métodos se presenta en las tablas desde 2 a 5, donde se observa un error absoluto máximo de 1,142% en los cálculos, comparando el circuito original con el mostrado en el Stagg El Abiad, lo que confirma la buena convergencia y la factibilidad del uso de GS.

#### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el trabajo se dan los fundamentos teóricos para desarrollar una herramienta computacional en el software Easy Power para redes radiales. Se han mostrado los algoritmos de cálculos de ambos métodos. Los procedimientos matemáticos utilizados han mostrado que son adecuadas y se adaptan correctamente a los cálculos efectuados por el nivel de error obtenido.

Como continuidad de la investigación es necesario adecuar los procedimientos y herramientas de cálculo para los casos de regímenes de carga asimétricos y dinámicos. La veracidad de los resultados ha sido comprobada con los cálculos de la red de pruebas de Stagg & Abiad de 5 nodos, donde se pudo observar que el error obtenido está en entorno de los rangos admisibles y esto permite validar la herramienta diseñada y asegurar que sus resultados son satisfactorios.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mora B. M. Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos. Revista Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol. XI. Núm.2. 2010 pp.189-198.
- [2] Centeno A., Lagoa D. Optimización metaheurística aplicada al cálculo del flujo de carga óptimo en redes eléctricas de potencia con variables de control asociadas de tipo mixto. Revista Ingeniería UC, Vol. 20, No. 3, Diciembre 2013, pp. 71 - 78
- [3] INELEC I. L. Comparación de flujos de carga probabilísticos empleados en sistemas de distribución levemente enmallados. Scientia et Technica Año XIX, Vol. 19, No. 2, junio 2014, pp. 153-162. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [4] Gallego L. A. López L. J. Mejías G. D. Flujo de potencia trifásico desbalanceado en sistemas de distribución con generación distribuida. Scientia et Technica. Año XV, No 43, Diciembre de 2009.
- [5] IEEE. Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis. USA. 1997. pp. 118.
- [6] INELEC I. L. The graphical solution for power system analysis. USA.2006. pp 230.
- [7] Carvajal W., Ordóñez G., Moreno A., Duarte C. Simulación de sistemas eléctricos con cargas no lineales y variantes en el tiempo. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 19 N° 1, 2011, pp. 76-92

- [8] Martín D., “Implementación de Técnicas de estimación de estado armónico en sistemas eléctricos de distribución”, Tesis de maestría, Universidad Nacional de río cuarto, Argentina, 2014.
- [9] Valencia D., Quispe E., Sousa V. “Estudio del efecto de la distorsión armónica de tensión sobre la operación del motor trifásico de inducción en estado estacionario. Revista Energética. No. 43, pp. 67-77. junio, 2014. Universidad Nacional de Colombia.
- [10] González P.I., Marrero R.S., Legra L.A., Mendiola E. D. Metaheuristics Based on the Variables Integration Method Applied to Reactive Power Compensation in Multi-Objective Optimization. Proceedings of the International Conference on Applied Mathematics, Computational Science & Engineering (AMCSE 2015) pp. 207-212. Grete. October 2015.
- [11] González F, Palencia E. Desarrollo de un programa para el cálculo de flujos de potencia en sistema de distribución. 3er Congreso Iberoamericano de estudiante de ingeniería eléctrica (III CIBELEC 2008).
- [12] Juan D. Gallego J., Cano J., Muñoz N. Análisis de Flujos de Potencias Ineficientes Producidos por Convertidores de Potencia. Revista Información Tecnológica, Análisis de Flujos, Vol. 25, No 3, pp. 93-102, 2014.
- [13] Centeno A. et al. Algoritmo de búsqueda armónica modificado aplicado al cálculo del flujo óptimo de potencia. Revista Ingeniería UC, Vol. 17, No. 3, Diciembre, 2010, Pp 7 – 18, ISSN 1316-6832.
- [14] López V. G. Flujo de Potencia Óptimo multiobjetivo para el análisis de sistemas potencia con generación eólica. Energética. No 44. Diciembre 2014. Pp. 41 – 47, ISSN 0120-9833.
- [15] Sainz S. L. Formulation of the Harmonic Load Current.// IEEE Transaction on Power Systems Vol 13 N011995. p. 123–135.
- [16] Hernández A. L. “Identificación de Fuentes armónicas por el método de estimación en sistemas eléctricos de potencia”. Tesis maestría Dpto. Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, Mexico 2012
- [17] Soria C. L. Modelado y operación en líneas de transmisión. ITM-DIE. 2003.
- [18] Villa W. M., Jesús M. López L. J., Velilla E. Flujo óptimo reactivo para minimización de pérdidas: Nueva Propuesta de Función de Adaptación y Manejo de Restricciones. Información Tecnológica. Vol. 27, N0 2, Pp.131-140, 2016.
- [19] IEEE. “Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis”. STD 399-1997.
- [20] Anderson EEH. “Modelling and analysis of Electric Power systems”. Lectures 35-526, ITET ETH Zurich. March 2003.
- [21] Fiodorov, A.A. Catálogo de Suministro Eléctrico y Equipamiento Eléctrico. Energoizdat, Moscú, 1986.
- [22] ESA. “The graphical solution for power system analysis”. User’s Manual. Easy Power. Version 8.0.175. Copyright 1991-2006. , INELEC Intl. Ltd.
- [23] Ríos P. C., Naranjo A. M. y Escobar Z. A. Modelado de sistemas eléctricos en presencia de armónicos. Scientia et Technica Año IX, No 22, Octubre 2003.
- [24] Stagg, G. W. and El-Abiad, A. H. Computer Methods in Power System Analysis. New York: McGraw-Hill, 1968. Pp. 2.



**Iliana González Palau**, graduada de Ing. Electricista del Instituto de Minas de Moscú 1983. Es graduada de PhD. en Ing. Eléctrica en 2011 de la Universidad Estatal de Minas de Sant Petersburgo, Rusia. Actualmente es docente de tiempo completo

de la Carrera de Ing. Eléctrica en la UTC, Ecuador. Su área de interés incluye optimización de sistemas eléctricos, eficiencia energética y calidad de la energía eléctrica.



**Secundino Marrero Ramírez**, graduado de Ing. Electrónica Industrial en 1983 del Instituto Politécnico de Kiev, (Universidad Técnica de Ucrania.), PhD. en automatización en 1989 de la Universidad Estatal de Minas de Sant Petersburgo, Rusia.

Docente de tiempo completo de la Carrera de Ing. Eléctrica en la UTC, Ecuador. Investiga en eficiencia y calidad de la energía eléctrica, optimización y automatización industrial.





**Aristides Legra Lobaina,**  
Licenciado en Matemática.  
Graduado de Ph.D en el  
Instituto Superior Politécnico,  
CUJAE de la Habana - Cuba,  
Profesor de tiempo completo  
del Dpto. de Matemática del  
Instituto Superior Minero  
Metalúrgico de Moa, Cuba.

Investiga en las áreas de matemática aplicada a la modelación, optimización y programación de sistemas informáticos.



**Xavier Proaño Maldonado,**  
Graduado de Ing. Eléctrico  
en la Politécnica Nacional  
de Ecuador en 2010. MSc  
en Gestión de Energía de la  
UTC en 2013. Se desarrolla  
en la temática de las energías  
alternativas, alto voltaje y  
sistemas de potencia. Docente

de planta a tiempo completo de la Carrera de Ing. Eléctrica en la UTC, Ecuador.



**Ángel León Segovia,**  
Graduado de Ingeniero en  
Ejecución en Electrónica e  
Instrumentación en la ESPE  
en el año 1997. Ingeniero  
en Informática y Ciencias  
Computacionales en la UTC,  
en el año 2011. MSc en  
Gestión de Energías en la

UTC en el año 2014. Actualmente es docente de planta a tiempo completo de la Carrera de Ing. Eléctrica en la UTC, Ecuador. Se desarrolla en el campo de las energías alternativas y en programación de sistemas.