

Desempeño del modelo equivalente de Norton en la estimación de la corriente en una CFL usando diferente cantidad de medidas.

Performance of Norton model in estimating the current of a Compact Fluorescent Lamp using different number of measurements.

J. Bello¹, G. Malagon², G. Ordóñez³, C. Duarte⁴

Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica- GISEL, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, UIS - Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Email: jeisson.bello@correo.uis.edu.co, gabriel.malagon@correo.uis.edu.co, gaby@uis.edu.co, cedagua@uis.edu.co

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

RESUMEN

Este artículo analiza el desempeño del modelo equivalente de Norton de una luminaria tipo CFL obtenido con 1200 medidas en laboratorio, distribuidos en dos casos de estudio. En el caso de estudio uno, se genera el modelo con medidas de tensión y corriente tomadas conociendo el contenido armónico de la señal de tensión de alimentación. En el caso de estudio dos, el modelo es obtenido con señales de tensión y corriente tomadas al energizar con una señal de tensión con contenido armónico aleatorio. Finalmente, la diferencia en el contenido armónico de las señales medidas y simuladas, a partir de los modelos equivalentes de Norton, es estimada, así como la correlación de estas en el tiempo. **PALABRAS CLAVE:** Equivalente de Norton, distorsión armónica, CFL.

ABSTRACT

In this paper is study the performance of the Norton equivalent model of a Compact Fluorescent Lamp (CFL), the model is obtained from 1200 laboratory measurements, distributed in two study cases. In the first case, the model is generated with voltage and current measurements when is controlled the harmonic content in the power supply. In the second case, the model is obtained with voltage and current measurements with a random spectrum. Finally, the harmonic content in the measurements and simulations, obtained with Norton equivalent model, is assessed and an error is computed, likewise, the correlation coefficient between these signals is estimated.

KEYWORDS: Norton equivalent, harmonic distortion, CFL.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis del contenido armónico durante la operación de las diferentes cargas conectadas a los sistemas eléctricos ha sido un gran campo de investigación. Debido a la relevancia en la operación, mantenimiento y fallas en las redes de distribución local, de las pequeñas cargas, tipo residencial [1], a menudo se avanza en la búsqueda de modelos que se ajusten adecuadamente a la realidad y al impacto que dichas cargas pueden ocasionar.

El reto en el modelado de cargas tipo residencial se encuentra en el alto uso de tecnologías de tipo no lineal aplicadas a estas [2]. Para hacerle frente a esta problemática se han propuesto diversos modelos, que, de manera general, se pueden clasificar en modelos en el

dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia [3] [4].

Los modelos en el dominio de la frecuencia son ampliamente acogidos por su bajo grado de complejidad en la implementación. Entre ellos se encuentra el modelo de fuente de corriente y el modelo equivalente de Norton. El modelo equivalente de Norton han sido ampliamente estudiado e implementado en el modelado de cargas de tipo no lineal, de manera que en la literatura se pueden encontrar diferentes metodologías para su adquisición [5] [6] [7] [8] [9].

En el trabajo presentado en [9], se realiza una propuesta para el cálculo de la matriz de admitancias necesaria para los modelos equivalentes de Norton. Este trabajo analiza la sensibilidad del modelo equivalente de Norton, con la

metodología planteada en [9], para una CFL, al variar la cantidad de medidas utilizadas para generar el modelo. En la siguiente sección se describen los lineamientos seguidos en [9] para obtener el modelo equivalente de Norton. A continuación, en la Sección 3, se encuentra el proceso para la adquisición de los datos necesarios para implementar los modelos equivalentes de Norton y su respectiva validación. Luego, en las secciones 4 y 5, se encuentran los dos casos de estudio revisados. El primero genera el modelo equivalente de Norton para una luminaria tipo CFL con medidas de tensión con contenido armónico seleccionado y compara las corrientes generadas por el modelo y medidas al aplicarse una señal de tensión tipo flat-top. El segundo compara las corrientes, simulada y medida, cuando se aplica una señal de tensión tipo flat-top, senoidal y una señal con contenido armónico aleatorio. Para este escenario se genera el modelo equivalente de Norton con diferentes señales de tensión y corriente obtenidas al energizar la luminaria tipo CFL con señales de tensión que poseen contenido armónico aleatorio. Al finalizar, en la Sección 6, se presentan las conclusiones encontradas durante el desarrollo de este trabajo y algunos trabajos futuros.

2. MODELO EQUIVALENTE DE NORTON

En general, el modelo equivalente de Norton tiene la forma estándar mostrada en la Ecuación (1), donde $[I]$ es el vector que contiene cada uno de los armónicos de corriente generados por el elemento bajo prueba al energizarse con una señal de tensión que se encuentra caracterizada con cada uno de los armónicos presentes en el vector $[V]$, y $[Y]$ es la matriz de admitancia que relaciona dichos contenidos armónicos.

$$[I] = [Y] [V] \quad (1)$$

El objetivo final de las metodologías propuestas para adquirir el modelo equivalente de Norton, es obtener la matriz de admitancias que relaciona las corrientes con las tensiones, lo cual se hace a partir de medidas. El trabajo presentado por Nassif [9], realiza el despeje de la matriz de admitancias a partir de la Ecuación (2), donde m es la cantidad de armónicos de corriente a estimar, p es la cantidad de armónicos de en la señal de tensión que se tendrán en cuenta para la estimación de la respuesta en corriente e I_b es el vector de que representa la relación entre la componente fundamental de la señal de tensión y los diferentes armónicos de corriente, el cual se considera constante.

$$[I]_{m \times 1} = [Y]_{m \times p} [V]_{p \times 1} + [I_b]_{m \times 1} \quad (2)$$

Para n medidas diferentes de tensión y corriente el arreglo matricial que representa los n sistemas de ecuaciones es el mostrado en la Ecuación (3), y finalmente se obtendrá $[Y]_{m \times p}$ y $[I_b]_{m \times 1}$ con la Ecuación

(4), la cual es el resultado de multiplicar ambos lados de la ecuación (3) por $[A]^T$ y realizar el despeje.

$$[I]_{m \times n} = \{ [I]_{m \times 1} \quad [Y]_{m \times p} \}_{m \times (p+1)} [A] \quad (3)$$

$$\text{Donde, } [A] = \begin{bmatrix} [1]_{1 \times n} \\ [V]_{p \times n} \end{bmatrix}_{(p+1) \times n}$$

$$\{ [I_b] \quad [Y] \} = [I] [A]^T \{ [A] [A]^T \}^{-1} \quad (4)$$

La inversa de $[A] [A]^T$ se realiza utilizando descomposición SVD.

3. ADQUISICIÓN DE DATOS

Para la toma de datos se las señales de tensión de alimentación y corriente consumidas por la luminaria tipo CFL de potencia nominal 27 W, 60 Hz, 120 V, se llevó a cabo el montaje presentado en la Figura 1.

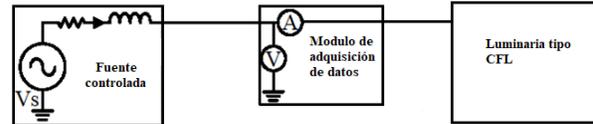


Figura 1. Montaje realizado en laboratorio para la toma datos.

El módulo de adquisición de datos consta de sensor de corriente y tensión, con frecuencia de muestreo constante de 50000 Hz. Se realizaron 1200 medidas de diferentes señales de tensión y corriente para generar y validar los modelos equivalentes de Norton obtenidos. En cada uno de los casos de estudio se presentarán algunas de las medidas realizadas.

4. CASO DE ESTUDIO 1

En este caso de estudio se genera el modelo equivalente de Norton utilizando 8 diferentes medidas de tensión y corriente seleccionadas de la siguiente manera: se energiza la luminaria con señal de tensión senoidal pura, las siguientes 7 medidas se realizan manteniendo la componente fundamental constante e incluyendo un armónico a la vez, de manera excluyente con los demás armónicos. Este procedimiento se realiza 10 veces, variando la magnitud y ángulo de fase de cada uno de los armónicos. Posteriormente se valida el modelo adquirido simulando una señal de alimentación tipo flat-top [10]. En la Figura 2 se muestran las magnitudes de las componentes armónicas que conforman las señales de corriente simuladas por el modelo y las componentes armónicas de los datos de corriente medidos en laboratorio, al energizar la luminaria tipo CFL de potencia nominal 27 W, con una señal senoidal pura. Así mismo, se observan las señales de corriente en el tiempo, tanto la simulada como la medida.

Para cuantificar el error entre las señales simuladas y las señales medidas se proponen dos medias:

Error en frecuencia (Error f) es estimado según la Ecuación (5), donde $\vec{I}_{med,i}$ e $\vec{I}_{sim,i}$ es el fasor que representa la magnitud y el ángulo de fase de cada una de las componentes armónicas que contiene la señal de corriente medidas y simuladas, respectivamente.

Coefficiente de correlación (r[%]) de las señales en el tiempo es estimado según la Ecuación (6), donde $I_{med}(i)$ representa cada uno de los elementos del vector con las muestras de la corriente medida e $I_{sim}(i)$ representa cada uno de los elementos del vector con las muestras de la señal de corriente reconstruida a partir de las componentes armónicas obtenidas al simular el modelo estimado.

$$\text{Error f} = \sqrt{\text{prom} \left(\frac{|\vec{I}_{med,i}| - |\vec{I}_{sim,i}|}{|\vec{I}_{med,i}|} \right)^2} * 100 \% \quad (5)$$

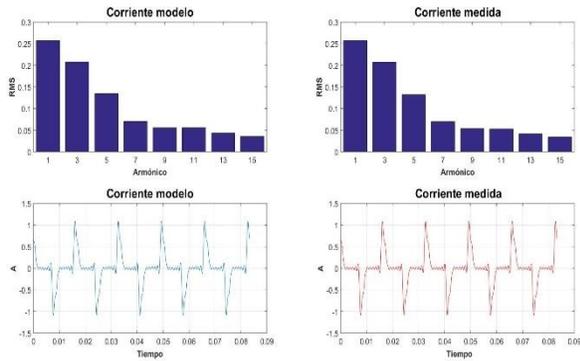


Figura 2. Contenido armónico y señal en el tiempo de la respuesta en corriente simulada por el modelo estimado y datos medidos en laboratorio, al energizar con señal de tensión senoidal pura.

Como muestra la Tabla 1, al evaluar los modelos obtenidos, los errores en las magnitudes de las componentes armónicas analizadas se encuentran en promedio del 6,21%, con valor mínimo de 3,81 y valor máximo de 9,60%, lo cual indica que los contenidos armónicos se encuentran en valores aceptables, tomando tolerancias del 10% en la escala de los mA. Por otra parte, las correlaciones de las señales muestreadas en el tiempo tienen un promedio de 52,7773%, con valor mínimo de 47,2385% y máximo de 57,5682%, lo que indica la posible existencia de errores en los ángulos de

las componentes armónicas, fundamentales en la evaluación de los fenómenos de agregación, atenuación y diversidad [11]. Para todos los análisis y reconstrucción de las señales en el tiempo, se tuvieron en cuenta únicamente las componentes armónicas impares hasta el armónico 15.

Tabla 1. Errores estimados al comparar los resultados del modelo equivalente de Norton y los datos medidos al energizar con una señal de tensión tipo flat-top.

Simulación	r (%)	Error f (%)
1	57,5682	6,3010
2	49,5625	3,8153
3	56,8265	9,6005
4	47,5286	6,3271
5	54,2661	5,5821
6	55,8639	3,9819
7	47,2385	3,8410
8	49,3470	6,1340
9	56,5187	7,6019
10	53,0532	8,9614
Promedio	52,7773	6,2146

Fuente. Elaboración propia.

La Figura 3 muestra la señal en el tiempo y el contenido armónico de las ondas medidas y simuladas con el modelo equivalente de Norton obtenido en el caso 2.

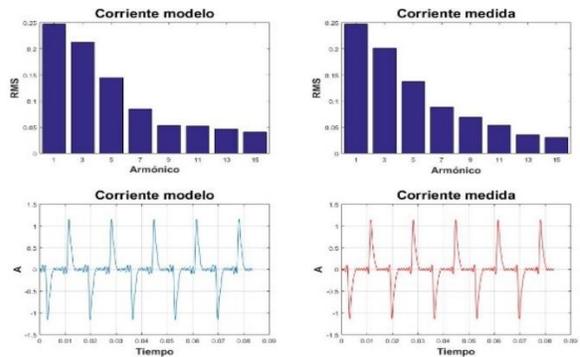


Figura 3. Contenido armónico y señal en el tiempo de la respuesta en corriente generada por el modelo estimado y datos medidos en laboratorio, al energizar con señal de tensión tipo flat-top.

$$r[\%] = \frac{n \sum_{i=1}^n I_{med}(i) I_{sim}(i) - \sum_{i=1}^n I_{med}(i) \sum_{i=1}^n I_{sim}(i)}{\sqrt{\{n \sum_{i=1}^n I_{med}(i)^2 - [\sum_{i=1}^n I_{med}(i)]^2\} \{n \sum_{i=1}^n I_{sim}(i)^2 - [\sum_{i=1}^n I_{sim}(i)]^2\}}} * 100 \% \quad (6)$$

En

este caso de estudio se genera el modelo equivalente de Norton con 8 deferentes señales de tensión y corriente medidas al energizar la luminaria bajo prueba con ondas

5. CASO DE ESTUDIO 2

de tensión que tienen componentes armónicas aleatorias tanto en magnitud como en ángulo de fase hasta el armónico 15. Finalmente se valida el modelo obtenido al comparar la corriente simulada y la corriente medida al energizar con señal de tensión senoidal pura, flat-top y una señal con contenido armónico aleatorio y diferente a los usados para la generación del modelo.

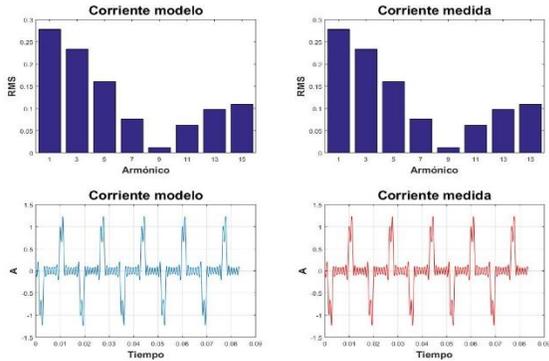


Figura 4. Contenido armónico y señal en el tiempo de la respuesta en corriente generada por el modelo estimado y datos medidos en laboratorio, al energizar con señal de tensión Tabla 2.

Tabla 2. Componentes armónicas de la señal de tensión utilizada para generar la **Figura 4.**

Armónico	Magnitud	Angulo de fase
1	120	0
3	0	0
5	6	30°
7	0	0
9	2,4	10°
11	0	0
13	0	0
15	2,4	30°

Fuente. Elaboración propia.

La Figura 4 muestra el contenido armónico y la forma de onda de una de las corrientes utilizadas para generar el modelo equivalente de Norton y el contenido armónico y forma de onda lograda por el modelo obtenido al ser energizado con la misma señal de tensión utilizada en la toma de datos. En este caso el modelo logra un Error f de $2,7190 \cdot 10^{-13}\%$ y correlación del 100%, lo cual es una reconstrucción casi perfecta.

La Tabla 3 muestra los errores calculados al energizar el modelo obtenido con señales de tensión tipo senoidal pura, flat-top y una señal con contenido armónico aleatorio hasta el armónico 15, estas tres señales no fueron utilizadas como datos de entrada para generar el modelo. Al analizar la información de la Tabla 3, y la Figura 5, Figura 6 y Figura 7 se torna complicado realizar comparaciones, ya que extrañamente a medida que aumenta la correlación aumenta el Error f.

Tabla 3. Error del espectro armónico y correlación de las corrientes simuladas por el modelo al energizarse con señales de tensión diferentes a las utilizadas para generar este.

	Senoidal	Flat-top	Aleatoria
r (%)	18,0964	44,6597	68,3797
Error f (%)	23,2926	144,7728	82,2567

Fuente. Elaboración propia.

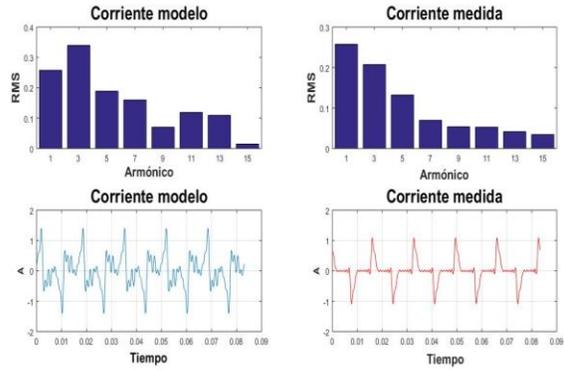


Figura 5. Contenido armónico y señal en el tiempo de la respuesta en corriente simulada por el modelo estimado y datos medidos en laboratorio, al energizar con señal de tensión senoidal pura.

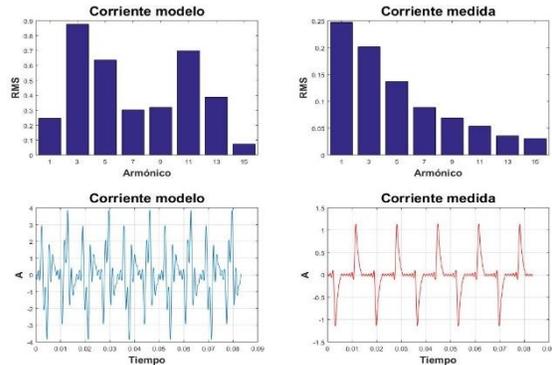


Figura 6. Contenido armónico y señal en el tiempo de la respuesta en corriente simulada por el modelo estimado y datos medidos en laboratorio, al energizar con señal de tensión Flat-top.

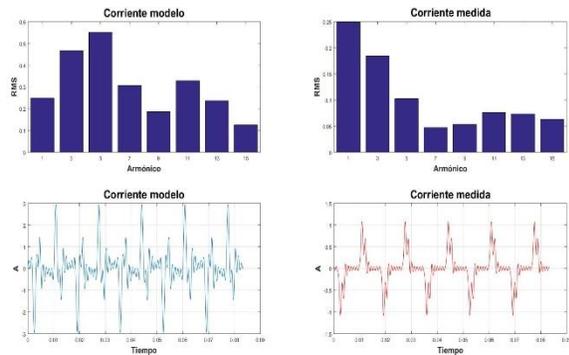


Figura 7. Contenido armónico y señal en el tiempo de la respuesta en corriente simulada por el modelo estimado y datos medidos en laboratorio, al energizar con señal de tensión con contenido armónico aleatorio.

6. CONCLUSIONES

Los modelos equivalentes de Norton planteados por Nassif [9] varían su eficiencia drásticamente al variar las medidas utilizadas para generar estos. Este hecho puede validarse al estimar el número condicional de las matrices de admitancias estimadas en los dos casos de estudio. En el caso uno el número condicional es de 184,4958 y en el caso dos es de 2653,0237. Estos valores respaldan los valores obtenidos en los dos casos de estudio, donde para el caso de estudio uno se tuvieron errores significativamente inferiores al caso de estudio dos.

Los números condicionales de las matrices de admitancias guían el análisis de la siguiente manera, a mayor número condicional, mayor sensibilidad se tiene en el modelo, así que, con pequeñas variaciones en la señal de tensión de alimentación, se obtienen grandes cambios en la respuesta en corriente.

En los dos casos de estudio se muestra que el modelo obtenido está en la capacidad de simular alguna señal de corriente con las que fue generado con errores inferiores al 5%.

Para trabajos futuros se espera lograr medir el impacto del cambio de las señales utilizadas para la generación de los modelos equivalentes de Norton, no solamente con la metodología planteada por Nassif, sino con otras metodologías. Así mismo, encontrar cual es la combinación óptima de señales de tensión a utilizar para obtener modelos con baja sensibilidad a los cambios en la señal de alimentación, ya que esta es la naturaleza observada en las mediciones.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] D. Matvaz y M. Maksic, «Impact of compact fluorescent lamps on the electric power network,»

de *International conference on harmonics and quality of power*, Wollongong, Australia, 2008.

- [2] J. Yong, L. Chen, A. B. Nassif y W. Xu, «A Frequency-Domain Harmonic Model for Compact Fluorescent Lamps,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, n° 2, pp. 1182-1189, 2010.
- [3] A. Medina, J. Segundo-ramirez, P. Ribeiro, W. Xu, L. Lian, G. W. chang, V. Dinavahi y N. r. Watson, «Harmonic analysis in frequency and time domain,» *Power Delivery, IEEE Transactions*, vol. 28, n° 3, pp. 1813-1821, Jul 2013.
- [4] G. Malagon-Carvajal, J. Bello-Peña, G. Ordoñez-Plata y C. Duarte, «A Comparison between Circuit-Based and Harmonic-Current Models for Compact Fluorescent Lamps,» de *International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Belo Horizonte, Brazil, 2016.
- [5] E. Thunberg y L. Soder, «A Norton approach to distribution network modeling for harmonic studies,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, n° 1, pp. 272-277, 1999.
- [6] C. F. M. Almeida y N. Kagan, «Harmonic Couple Norton Equivalent Model for Modeling Harmonic-Producing Loads,» de *International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Bergamo, Italy, 2010.
- [7] M. E. Balci, D. Ozturk, O. Karacasu y M. H. Hocaoglu, «Experimental verification of harmonic load models,» de *Universities Power Engineering Conference*, Padova, 2008.
- [8] S. Muller, J. Meyer, P. Schegner y S. Djokic, «Harmonic Modeling of Electric Vehicle Chargers in frequency Domain,» de *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, La Coruña, Spain, 2015.
- [9] A. Nassif, J. Yong y W. Xu, «Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances,» *IET Generation, transmission and Distribution*, vol. 4, n° 3, pp. 363-375, 2010.
- [10] A. Blanco, R. Stiegler y J. Meyer, «Power quality disturbances caused by modern lighting equipment (CFL and LED),» de *IEEE PowerTech*, Grenoble, 2013.
- [11] A. Mansoor, W. Grady y A. Chowdhury, «An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, n° 1, pp. 467-473, 1995.