

PREDICCIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICAS EN VENTANAS DE CARGA RESIDENCIALES, MEDIANTE MODELOS NEURONALES ARTIFICIALES

VÍCTOR AUGUSTO BARRERA NÚÑEZ

*Estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica UIS
Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
vicbarrera@hotmail.com*

JORGE ANDRÉS CORMANE ANGARITA

*Estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica UIS
Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
jorgecomane@hotmail.com*

GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA

*Profeso Titular Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
gaby@uis.edu.co*

RESUMEN

En la actualidad, la mayoría de las cargas residenciales conectadas a los sistemas de distribución de energía eléctrica son no lineales, es decir, la corriente contiene componentes armónicas al igual que la onda de tensión. Estos equipos inyectan armónicos a la red de alimentación eléctrica en el punto de conexión común. Para el análisis de la no linealidad presente en estas cargas, es necesario predecir las corrientes armónicas generadas por este tipo de equipos o grupos de carga. En este artículo se presentan modelos del comportamiento armónico de equipos eléctricos residenciales no lineales utilizando redes neuronales artificiales. Los equipos analizados tienen como característica principal que su sistema de suministro de energía eléctrica está basado en rectificadores monofásicos de onda completa con filtro capacitivo.

PALABRAS CLAVE: *Armónicos, ventana de carga, predicción, redes neuronales, inteligencia artificial, Calidad de onda.*

La utilización de la energía eléctrica en los diferentes equipos de tipo residencial, requiere de un suministro con frecuencia y niveles de tensión adecuados para su correcta operación. Sin embargo, las cargas residenciales que se conectan al sistema en su mayoría tienen características no lineales que es conveniente modelar para predecir el comportamiento del sistema. Los circuitos de estas cargas residenciales están constituidos por semiconductores, que debido a su naturaleza y característica (conexión o desconexión a la red, variación de su régimen de carga y

consumo desequilibrado) no lineal, distorsionan la onda de corriente, generando armónicos de corriente que son inyectados a la red pudiendo afectar a otras cargas (usuarios) conectadas [1].

El comportamiento de las redes con variaciones topológicas frecuentes, no puede ser analizado mediante la teoría fasorial de frecuencia única, en estos casos, el estado estacionario es una sucesión de estados transitorios, cuyo estudio requiere un modelo dinámico. Por otra parte, cuando

un sistema dinámico alcanza el estado estacionario, las ondas resultantes pueden analizarse mediante técnicas de Fourier. Por lo tanto, se plantea la necesidad de predecir las corrientes armónicas generadas por equipos no lineales en ventanas de carga residenciales, mediante el diseño y construcción de modelos neuronales, que representen el comportamiento armónico de los equipos no lineales en operación normal. El modelo neuronal adquiere su importancia debido a que la conexión de las cargas al sistema no se puede establecer previamente y dependen de las costumbres de los usuarios. Así, como las cargas no lineales se pueden considerar estáticas, en la ventana de carga las variaciones en el tiempo cobran vigencia; la ventana de carga, conformada por las cargas residenciales conectadas al sistema.

La propuesta que se presenta en este trabajo para satisfacer esta necesidad, es el desarrollo de una plataforma de simulación que permita predecir y visualizar las componentes armónicas de corriente generadas por distintos grupos de electrodomésticos en un entorno estático y dinámico (ventana de carga) del sistema eléctrico, originado por las variaciones a las cuales está sometido el sistema durante las 24 horas del día tal como se muestra en la Figura 1.

El comportamiento armónico de los diferentes electrodomésticos lineales y no lineales dentro de los límites de distorsión armónica individual de tensión, se simuló empleando modelos matemáticos y modelos estáticos de simulación respectivamente. A partir de los modelos de cargas no lineales se pueden generar patrones entrada-salida para el

entrenamiento supervisado de una red neuronal [2], con los cuales se trató de suplir la insuficiencia de información del comportamiento (tensión y corriente) de los equipos a modelar. Este hecho permite medir el alcance del modelo neuronal en la predicción de parámetros de una manera directa, dejando el camino abierto para validar el diseño empleando datos reales.

VENTANA DE CARGA

Una forma de obtener un modelo de la carga total de un sistema de alimentación, es clasificando las cargas conectadas al mismo, ya que esto permite agrupar usuarios con características de consumo similares o conformar grupos de artefactos eléctricos de uso doméstico, en los que se presente un principio de funcionamiento similar.

Los usuarios residenciales pueden ser clasificados de acuerdo con la reglamentación existente propuesta por los operadores de red (estratos socio-económicos). El efecto combinado y acumulativo de las cargas durante las 24 horas del día es causado por la variabilidad en el consumo de energía debido a las costumbres, determinadas por la cultura y clima de cada región. Una forma de representar y analizar los cambios de las corrientes armónicas en presencia de este tipo de variaciones, es reunir los electrodomésticos de mayor uso en los hogares en un ambiente gráfico en el cual sea posible conformar una ventana de carga personalizada que represente los equipos conectados al sistema durante un determinado lapso de tiempo.

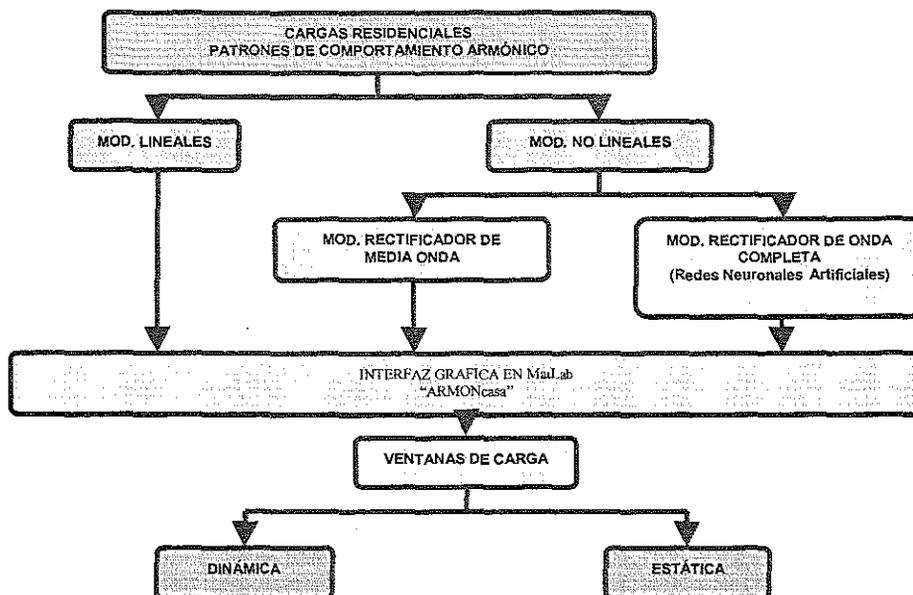


Figura 1. Diagrama de bloques del procedimiento utilizado en el planteamiento del problema.

OBTENCIÓN DE MODELOS ESTÁTICOS DE LAS CARGAS RESIDENCIALES

La obtención de los patrones de comportamiento armónico característicos de las cargas residenciales no lineales, se realizó con base en simulaciones efectuadas a los equivalentes eléctricos construidos a partir de los parámetros obtenidos en mediciones realizadas en trabajos anteriores [3], [4].

Los parámetros de entrada al circuito equivalente en el dominio del tiempo corresponden a: la tensión eficaz (V_{rms}), la potencia activa (W), la potencia no activa (VAR) y en el dominio de la frecuencia a la magnitud del primer al noveno armónico de tensión. Las variables de salida corresponden a la magnitud y ángulo de fase de la corriente de los armónicos impares hasta el noveno.

Parámetros de la fuente y la carga

La fuente de alimentación para el circuito equivalente se modeló mediante la disposición en serie de cinco fuentes de tensión alterna a frecuencias de 60, 180, 300, 420 y 540Hz. El valor eficaz de la magnitud de la tensión a frecuencia fundamental es de 120Vrms (valor nominal de la tensión), mientras que las magnitudes de las componentes armónicas es un porcentaje con respecto a la fundamental, dichos porcentajes no exceden los límites establecidos en la tabla 1. Con el fin de acotar las variables de entrada a la red neuronal cada una de las componentes armónicas de tensión se encuentra en fase con respecto a la componente fundamental la cual se encuentra a cero grados. A partir de este modelo de fuente de alimentación se obtienen las aproximaciones de las señales de tensión observadas en medidas realizadas.

Los parámetros P y Q son los valores de potencia, que determinan las características de cada equipo, es decir, diferencian un equipo de otro. A partir de la potencia de dimensionamiento (S) estipulada como el producto de los valores de tensión y corriente eficaz (medidos), y la potencia activa tomada de los datos de placa proporcionados por el fabricante, se determina la potencia no activa (ecuación 1).

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (1)$$

Variables de salida

En la simulación de los modelos estáticos se tuvo presente únicamente como salidas, las magnitudes y ángulos de

fase de las componentes armónicas de corriente de tercer, quinto, séptimo y noveno orden, debido a que estas componentes contienen más del 99% de la energía de la señal [5].

Un criterio razonable y ampliamente utilizado para medir la calidad de la aproximación, es la cuantificación de la energía en la señal de error sobre el intervalo de interés, por medio de la distorsión armónica total de tensión (DAT_V)¹ y de corriente (DAT_C)² para este caso, las cuales son una medida del error en la estimación de la componente fundamental (ecuación 2).

$$DAT_V = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} V_n^2}}{V_1} \quad \text{y} \quad DAT_C = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} I_n^2}}{I_1} \quad (2)$$

Por lo tanto, se puede utilizar el criterio del DAT_C como factor determinante a la hora de reconstruir la señal, debido a que si se logra alcanzar la energía necesaria para representar la señal (mayor al 99%), se alcanzará la mejor aproximación y a su vez el mínimo error en la reconstrucción de la señal (menor al 1%). El error en la estimación de la reconstrucción de la señal se obtiene a partir de la ecuación 3.

$$Error = \left(1 - \frac{\sqrt{100^2 + DAT^2_{C_n}}}{\sqrt{100^2 + DAT^2_{C_{TOTAL}}}} \right) * 100\% \quad (3)$$

El error se verificó en los demás modelos de cargas residenciales no lineales y en todos los casos la señal estimada considerando hasta el armónico de orden nueve se obtiene con un error menor al 1%. La única carga residencial que no tiene este comportamiento son las lámparas fluorescentes compactas con balasto electrónico de alta distorsión armónica. En este caso el error que se presenta considerando hasta el armónico de orden nueve es cercano al 5%. Sin embargo, este tipo de lámparas no cumple con las exigencias de la normativa respecto a la calidad de energía eléctrica, por lo cual es necesario evitar que este tipo de electrodomésticos se conecte al sistema.

¹ Distorsión Armónica Total de Tensión

² Distorsión Armónica Total de Corriente

Comportamiento del modelo a los cambios de tensión

Se realizaron simulaciones para comprobar el efecto que ejercen las variaciones del nivel de tensión sobre el espectro de corriente que arrojan los modelos propuestos. El nivel de tensión eficaz recomendado por las normas NTC 5000 y NTC 1340 es 120Vrms con una variación de $\pm 10\%$ [6], [7]. Finalmente se optó por variar la tensión eficaz de la componente fundamental en $\pm 10\%$, obteniendo de esta manera una variación cercana a $\pm 10.5\%$ de la tensión eficaz (incluyendo los armónicos presentes) recomendada por las normas anteriores.

Como consecuencia de las pruebas realizadas anteriormente se determinó, que es viable entrenar las redes neuronales con el nivel de tensión eficaz nominal de 120Vrms, ya que el efecto debido a las variaciones del nivel de tensión, no afecta la estimación de los parámetros a predecir por parte del modelo neuronal.

MODELADO DE ELECTRODOMÉSTICOS CON RECTIFICACIÓN DE ONDA COMPLETA Y FILTRO CAPACITIVO.

Los modelos de cada equipo varían según la potencia consumida con la cual se diseñaron. Por lo tanto, se agruparon electrodomésticos del mismo tipo por rangos de potencia y se construyeron modelos genéricos que representan el comportamiento de un equipo de este tipo comprendido en dicho rango de consumo.

Los parámetros de potencia se determinaron a partir de la representación del modelo de corrientes ortogonales (Czarnecki) [8],[9] de cada uno de los equipos caracterizados [3],[4],[11]. La información consignada en estos documentos fue obtenida a través del software ARMONlab [11].

La magnitud de *potencia activa total* se distribuyó proporcionalmente entre los dos elementos resistivos del rectificador, mientras que la magnitud de la *potencia reactiva total* se distribuyó a prueba y error entre la potencia reactiva debida al efecto inductivo y la debida al efecto capacitivo, hasta obtener los valores de DATc y corriente eficaz que caracterizan a cada equipo, manteniendo siempre que la diferencia entre la potencia reactiva debida al efecto inductivo y la debida al efecto capacitivo sea igual a la *potencia reactiva total*, ver Figura 2.

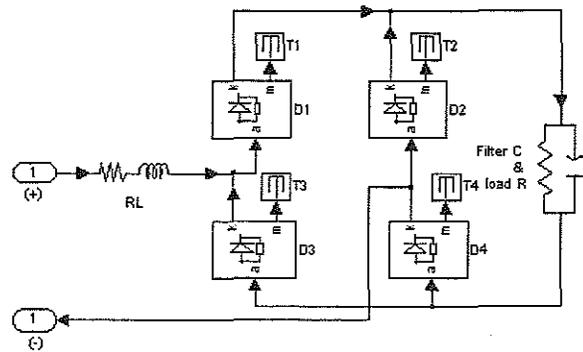


Figura 2 . Modelo de rectificador de onda completa.

MODELADO DE EQUIPOS LINEALES

Para la obtención de los modelos de cargas residenciales lineales se efectuó una clasificación según la configuración del circuito equivalente (RL serie y RL-C paralelo) que describe el comportamiento de la carga y posteriormente se realizaron los modelos matemáticos correspondientes, en función del orden de la frecuencia fundamental.

MODELOS NEURONALES DE CARGAS RESIDENCIALES NO LINEALES

Procedimiento realizado para la obtención de los modelos neuronales.

Inicialmente se establecen los patrones de entrada-salida correspondientes al comportamiento armónico característico de los equipos que componen el grupo de cargas residenciales no lineales. Posteriormente se determina una arquitectura neuronal que permite el modelado de cada uno de los electrodomésticos.

Diseño del modelo neuronal para cargas residenciales no lineales.

El diseño planteado para la predicción de las corrientes armónicas en las cargas no lineales (rectificador de onda completa) esta integrado por dos modelos neuronales, el primero, encargado del modelado de las magnitudes y el segundo, del modelado de los ángulos de fase de las mismas, ver Figura 3. Este diseño permite la especialización en cada parte del problema y la reducción del número de salidas de las redes, obteniendo una mejor solución.

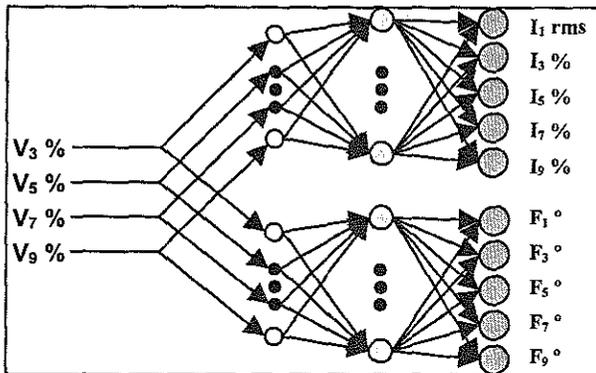


Figura 3. Modelo neuronal propuesto para una carga no lineal.

Selección de los patrones de entrenamiento

Los patrones de entrada a la red neuronal son las magnitudes de las componentes armónicas de tercer, quinto, séptimo y noveno orden de la tensión, presentadas en porcentaje respecto a la componente fundamental y en fase con la misma; mientras que los patrones de salida, son la magnitud de la componente fundamental (expresada en valor eficaz) y las componentes armónicas de corriente de tercer, quinto, séptimo y noveno orden (expresadas como porcentaje de la fundamental), con sus correspondientes fases en grados, para un total de 4 entradas y 10 salidas.

Los límites o valores máximos de distorsión armónica individual de las componentes armónicas de tensión para el punto de acoplamiento común (PCC) que se utilizaron en este estudio son los establecidos en la norma IEC 61000-3-2 [7]. Según la información de la Tabla 1, la señal de tensión generada podrá presentar valores de DATv en un rango de 0 a 9,394%, el cual sobrepasa el límite máximo exigido por la norma establecido en el 8%.

Tabla 1. Límites de las componentes armónicas de tensión IEC 61000-3-2.

Orden del Armónico	Magnitud [%]
3°	5
5°	6
7°	5
9°	1,5

Determinadas las cuatro componentes armónicas de tensión y los diez valores equidistantes para cada componente, el número de entradas posibles está dado por la regla estadística de la multiplicación [12]. Dichas combinaciones fueron almacenadas en una matriz de cuatro columnas y 10 000 filas, donde cada columna corresponde a una componente armónica de tensión y cada fila corresponde a una posible combinación de las mismas.

El modelo se sometió a diez mil simulaciones, que corresponden a las posibles combinaciones de las componentes armónicas de tensión, para obtener las magnitudes de las componentes armónicas de corriente con sus respectivos ángulos de fase. Los resultados son almacenados como una matriz de 10 000 filas por 10 columnas (5 magnitudes de las componentes armónicas de corriente y sus respectivos ángulos de fase).

Finalmente, se seleccionaron como patrones de entrada-salida cuatro puntos de cada 100 simulaciones, tres de entrenamiento y uno de validación. Los 10 000 patrones de entrada y salida se redujeron a 400 patrones no consecutivos (300 para entrenamiento y 100 para validación), con el objetivo de representar todo el rango de las magnitudes y argumentos de las componentes armónicas de corriente de salida.

Resultados del entrenamiento

Los resultados del entrenamiento de los modelos neuronales seleccionados se muestran en las tablas 2 y 3, donde se presenta la configuración de la red neuronal obtenida para cada equipo y sus respectivos errores de entrenamiento, validación y número de épocas. Se observa que la cantidad de neuronas por cada configuración oscila entre 11 y 14 de neuronas distribuidas en tres capas.

Tabla 2. Resultados del entrenamiento de los modelos neuronales seleccionados (magnitudes)

Equipo	Config	mse [1E-5]	Error de validación	épocas
CPU	4 4 5	2,424	1,006E-4	114
MONITOR	3 4 5	5,250	2,297E-4	64
TV55 65 W	3 3 5	3,832	1,431E-4	224
TV65 80 W	3 4 5	19,67	3,322E-4	110
TV100 115 W	3 5 5	15,24	4,390E-4	237
VHS	3 4 5	6,433	1,438E-4	228

Tabla 3. Resultados del entrenamiento de los modelos neuronales seleccionados (ángulos de fase).

Equipo	Config	mse [1E-5]	Error de validación	épocas
CPU	3 6 5	1,297	3,384E-4	96
MONITOR	3 6 5	1,897	4,140E-4	67
TV55 65 W	3 6 5	4,220	3,572E-4	598
TV65 80 W	3 6 5	4,250	3,876E-4	631
TV100 115 W	4 5 5	6,541	16E-4	172
VHS	3 6 5	15,18	1,950E-4	140

Resultados del análisis de regresión lineal

Es necesario medir el desempeño de la red neuronal a partir de la simulación de la misma, con patrones diferentes a los de entrenamiento y validación. Para cada modelo neuronal fue seleccionado un conjunto de patrones desconocidos (100 en total) a lo largo de su rango de operación.

Dicha evaluación se realiza comparando las salidas objetivo de la red, con las obtenidas al simular la red con patrones desconocidos, esta evaluación proporciona una estimación del grado de similitud entre las dos respuestas conseguidas por la red a partir de una regresión lineal.

Con el objeto de observar con más detalle el grado de generalización de los modelos seleccionados, se expone como ejemplo ilustrativo la evaluación del desempeño de cada una de las salidas de los modelos neuronales que representan el comportamiento armónico de un "VHS" (reproductor de video) mediante una regresión lineal, en la tabla 4 se muestran los resultados de la misma junto con los respectivos coeficientes de correlación "R".

Tabla 4. Resultados del análisis de regresión lineal de los modelos neuronales que representan el comportamiento armónico de un VHS

Magnitudes			
Salida	m	b	R
I1	0,6386	-0,3507	0,99911
I3	0,7155	-0,1598	0,99973
I5	0,7119	-0,1741	0,99974
I7	0,6988	-0,1948	0,99976
I9	0,6730	-0,2462	0,99948
Argumentos			
Salida	m	b	R
F1	0,8400	-0,3772	0,99945
F3	0,8463	-0,3875	0,99969
F5	0,8508	-0,4143	0,99989
F7	0,8873	-0,4724	0,99948
F9	0,9380	-0,5557	0,99674

INTERFAZ GRÁFICA DEL PROGRAMA

Ventana de carga estática

Permite realizar simulaciones del comportamiento armónico e interacción con el sistema de los diferentes modelos de electrodomésticos tanto de forma individual como de manera conjunta, en condiciones de normalidad (onda sinusoidal de tensión) y anormalidad (onda no sinusoidal de tensión) del sistema. Adicionalmente esta opción proporciona varios parámetros que definen a las señales de tensión y corriente relacionados con la presencia de componentes armónicas en cada una de ellas respectivamente.

Ventana de carga dinámica

Se realiza un seguimiento a la variación del comportamiento armónico de los parámetros eléctricos, mediante la simulación de una serie de ventanas de carga, bajo condiciones determinadas por el usuario en el transcurso del día.

CONCLUSIONES

Este artículo se centra en el establecimiento de patrones de comportamiento armónico y la realización de modelos neuronales de cargas residenciales no lineales, que puedan ser interconectados con otros modelos para predecir el comportamiento armónico en diferentes tipos de ventanas de carga residenciales propuestas.

Los modelos neuronales desarrollados permiten realizar la predicción de las magnitudes y ángulos de fase de las componentes armónicas de corriente de equipos residenciales no lineales a partir de patrones de entrada característicos de cada uno de ellos.

La rápida convergencia y el buen desempeño del modelo neuronal, depende en gran medida de la escogencia de datos significativos para el entrenamiento y la validación de cada una de las redes que lo conforman.

La predicción del comportamiento armónico de los equipos no lineales, se realizó a partir de dos modelos neuronales independientes, diseñados y entrenados para dar solución de cada parte del problema (magnitud y ángulo de fase de las componentes armónicas de corriente), permitiendo lograr un grado de especialización del modelo final dentro de los límites establecidos.

REFERENCIAS

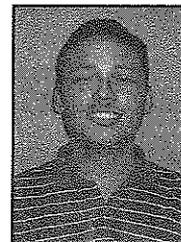
- [1] ARRILLAGA, J., N.R. WATSON, S. CHEN, Power Quality Assessment, Jonh Wiley & Sons Ltda., 2000.
- [2] MARTIN DEL BRIO, B. y SANZ, A. Redes Neuronales y Sistemas difusos. Alfaomega. Segunda edición, 2002.
- [3] ANGULO, J. y MENDÉZ, Y. Armónicos: Caracterización de cargas residenciales [Trabajo de grado] Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1998.
- [4] GRANADOS, E. y TOLOZA, L. Armónicos: caracterización de diferentes tipos de lámparas [Trabajo de grado] Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1997.
- [5] OPPENHEIM, A. Señales y Sistemas. Prentice Hall. Segunda Edición, 1998.
- [6] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Papel: Formatos. Bogotá: ICONTEC, p.9-10, 2001.
- [7] LIMITS FOR HARMONICS CURRENTS EMISSION. IEC 61000-3-2.
- [8] CZARNECKI, L.S. Cosiderations on the reactive power in nonsinusoidal situations. IEEE, transactions and intrumentations and measurements, Vol.IM-34, No 3, 1985.
- [9] CZARNECKI, L.S. Comparations of power definitions for circuits with nonsinusoidal waveform. IEEE, 1990.
- [10] PETIT, J. y USTARIZ, A. Análisis General de Armónicos: Revisión de las Definiciones de Potencia. [Trabajo de pregrado] Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1997
- [11] VEGA, J. y ORTIZ, M. Armónicos: Programa para análisis de sistemas eléctricos monofásicos y trifásicos. [Trabajo de pregrado] Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1998.
- [12] MONTGOMERY, D. y RUNGER, G.. Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería. McGraw-Hill. Interamericana de editores, apéndice B1, 1996.

AUTORES



Víctor Augusto Barrera Núñez.

Ingeniero Electricista UIS, Estudiante de Maestría Ingeniería Eléctrica UIS, Bucaramanga, Colombia. Investigador GISEL. Áreas de Trabajo: Calidad del suministro de energía, Variadores de velocidad, Operación de subestaciones de transmisión eléctrica bajo falla. E-mail: vicbarreras@hotmail.com.



Jorge Andrés Cormane Angarita.

Ingeniero Electricista UIS, Estudiante de Maestría Ingeniería Eléctrica UIS, Bucaramanga, Colombia. Investigador GISEL. Áreas de Trabajo: Calidad del suministro de energía, Inteligencia artificial aplicada a calidad del suministro de energía eléctrica. E-mail: jorgecormane@hotmail.com.



Gabriel Ordóñez Plata.

Ingeniero Electricista, Doctor Ingeniero Industrial UPCO, Madrid, España. Profesor Titular UIS. Director del grupo de investigación en sistemas de energía eléctrica GISEL-UIS. Áreas de trabajo: Calidad del suministro de energía, Procesamiento digital de señales eléctricas. E-mail: gaby@uis.edu.co.