

Revista de Ingeniería

ISSN: 0121-4993

reingeri@uniandes.edu.co

Universidad de Los Andes

Colombia

Garcés Ruiz, Alejandro; Galvis Manso, Juan Carlos; Gallego Rendón, Ramón Alfonso

Análisis de sistemas de distribución radiales bajo condiciones de polución armónica

Revista de Ingeniería, núm. 22, noviembre, 2005, pp. 26-35

Universidad de Los Andes

Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=121014219002>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

 redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Análisis de sistemas de distribución radiales bajo condiciones de polución armónica.

Alejandro Garcés Ruiz.

Ingeniero Electricista. Estudiante Maestría en Ingeniería Eléctrica. Profesor Catedrático Programa de Ingeniería Eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira.

Juan Carlos Galvis Manso.

Ingeniero Electricista. Estudiante Maestría en Ingeniería Eléctrica. Profesor Catedrático Programa de Ingeniería Eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira.

Ramón Alfonso Gallego Rendón

Ph. D. Ingeniería Eléctrica. Profesor Titular Programa de Ingeniería Eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira.

PALABRAS CLAVES: Armónicos, flujo de carga armónico, modelamiento de cargas no lineales, sistemas de distribución, software, sistemas radiales, programación orientada a objetos.

KEYWORDS: Harmonics, harmonic load flow, distribution systems, radial systems, programming oriented to objects.

Recibido 9 de septiembre de 2005,
aprobado 25 de octubre de 2005.

RESUMEN Los sistemas de distribución presentan un alto contenido de armónicos debido a la presencia de cargas no lineales tales como equipos electrónicos y elementos ferromagnéticos en saturación. El análisis de este tipo de sistemas es el objetivo del flujo de carga armónico. En este artículo se muestra una metodología de flujo de carga armónico adaptado a los sistemas de distribución dadas las particularidades propias de estos sistemas como es la topología radial. Igualmente se muestra una implementación computacional desarrollada bajo el esquema de programación orientada a objetos usando el sistema operativo Windows. Se presentan ejemplos de prueba IEEE.

ABSTRACT Distribution systems can present a high harmonic level due to existence of non linear loads such as electronic equipment. The analysis of these systems is the objective of harmonic load flow. This document shows a new methodology of harmonic load flow which considers the distribution systems characteristics. Likewise it shows an object oriented software developed in Windows. IEEE test systems are presented.

1. INTRODUCCIÓN

El flujo de carga armónico busca establecer el estado del sistema a partir de los parámetros de los elementos lineales que lo conforman, de información sobre la demanda en los nodos, de la potencia generada por las máquinas sincrónicas, de la topología del sistema y de las características de los elementos no lineales; que dan origen a voltajes y corrientes de frecuencia múltiplos de la fundamental. Los elementos lineales y no lineales deben ser modelados considerando la variación que éstos presentan con la frecuencia.

Xia (1982. Part I and II) presenta el primer planteamiento sobre el flujo de carga armónico y el modelamiento de cargas no lineales. Sainz (1995) presenta las principales metodologías para flujo de carga armónico en sistemas de transmisión.

Este artículo aplica los conceptos de esta metodología teniendo en cuenta las particularidades de los sistemas de distribución como la topología radial. Así mismo, aplica un modelamiento de cargas no lineales basado en el *Estudio y modelización en régimen permanente de cargas no lineales para el análisis armónico de redes eléctricas* de Boix Aragonés (1996), el cual fue acondicionado al flujo de carga desarrollado en este trabajo. El artículo está organizado como se describe a continuación: En la primera parte, se muestra el modelamiento de los diferentes elementos del sistema, el planteamiento matemático del flujo de carga armónico y las técnicas de solución. Posteriormente, se describe la manera cómo fue implementado el algoritmo desde el punto de vista computacional. Finalmente, se presentan ejemplos de prueba en los que se muestran las ventajas del algoritmo propuesto.

2. MODELAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA

Los elementos típicos del sistema de distribución (generadores, transformadores, líneas, condensadores, cargas lineales y no lineales) deben ser modelados considerando su dependencia con la frecuencia. En el estudio de las redes de distribución, el punto de conexión a la red de transmisión se representa por un equivalente de red. Su modelo consiste en

un equivalente de Thèvenin en el cual el voltaje de Thèvenin se considera de forma sinusoidal pura y la impedancia de Thèvenin tiene en cuenta el efecto de la distorsión en el nodo generador. Para transformadores y líneas de distribución, el modelo serie RL es adecuado, aunque en el caso de las líneas puede considerarse el efecto capacitivo debido a que este aumenta con la frecuencia; este efecto es importante en líneas subterráneas y líneas de mayor longitud como es el caso de zonas rurales. Los sistemas de compensación en los sistemas de distribución, están básicamente constituidos por bancos de condensadores, su modelo es una impedancia constante obtenida a partir del valor de la capacitancia o de la potencia reactiva y el voltaje de barra a frecuencia fundamental. En general, los modelos anteriores se constituyen de la misma manera que para el flujo de carga tradicional, afectando la componente reactiva por la frecuencia armónica.

3.1 CARGA LINEALES

Para las cargas lineales se considera un equivalente RL paralelo, donde los valores de R y L son calculados con base a factores asociados al tipo de carga (X_u) —comercial, residencial, industrial—. Si se tienen datos de potencia se realizan las conversiones necesarias teniendo en cuenta la tensión a frecuencia fundamental, como se muestra en la ecuación (1).

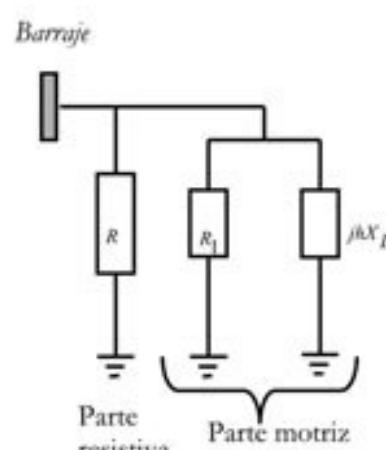


Figura 1. Modelo de carga lineal

$$(1) \quad R = \frac{V^2}{P(1-k)}$$

$$X_L = \frac{V^2}{1.2.k.k1.P}$$

$$R_1 = \frac{L}{k2}$$

P es la demanda total en vatios; k es la fracción de demanda total que corresponde a los motores, posee un valor típico de 0.8 para cargas industriales y 0.15 para cargas residenciales y comerciales (este factor es establecido porque normalmente no se conoce el número de motores en servicio); $k1$ es un factor de severidad en las condiciones de arranque y se sitúa entre 4 y 7; R_1 es la resistencia de amortiguamiento del motor que es calculada como la razón entre la inductancia de rotor bloqueado; y $k2$ que es un factor cercano a 0.2. A partir de los parámetros anteriores se puede establecer un equivalente serie R-L en donde la parte reactiva es multiplicada por el factor h .

2.2. MODELO DE LAS CARGAS NO LINEALES. (TÉCNICA DE SOLUCIÓN POR TRAMOS)

El modelamiento de las cargas no lineales depende del tipo de carga que se considere, aunque la regla general es utilizar una fuente de corriente conformada por las componentes armónicas que la carga inyecta al sistema. Los modelos de estas cargas son determinantes para la convergencia y la exactitud del método de flujo de carga armónico. Un modelo riguroso puede mejorar la exactitud de los resultados, pero aumenta el tiempo de cálculo y puede requerir datos adicionales de los cuales no se dispone, además de comprometer la convergencia. Por otro lado, un modelo aproximado puede llevar a resultados de mala calidad.

El modelamiento de cargas no lineales ha tomado especial interés en los análisis de flujo de carga armónico (Xia, 1982, part II; Boix Aragón, 1996; Sainz Sapera, 1995; Xu). Este aspecto es importante ya que se requieren técnicas de cálculo especializadas para determinar los armónicos inyectados por las

cargas no lineales al sistema, de tal manera que no se comprometa el tiempo de cálculo y la convergencia.

Para el estudio de las cargas no-lineales, éstas son clasificadas en tres grupos:

- Electrónicas o con control electrónico.
- Basadas en descargas o arcos.
- Construidas con materiales ferromagnéticos.

En este documento se tratan las cargas del primer grupo por ser las más comunes y las de mayor impacto en las redes de distribución. La incidencia de las del segundo y tercer grupo es considerada de menor valor, además de tener una forma de solución distinta; sin embargo, su estudio puede ser incluido en trabajos posteriores.

Las cargas del primer grupo presentan una forma de onda estrictamente periódica y es posible realizar una descomposición en series de Fourier, esto permite desarrollar modelos circuitales para su solución. Las cargas del segundo grupo no tienen una onda periódica y los problemas de interarmónicos deben ser tratados. Para estas señales es más conveniente recurrir a otras técnicas matemáticas como la Transformada de Wavelet o la transformada de Fourier de ventana móvil (Herraiz, 2002).

Las cargas del tercer grupo se modelan utilizando una combinación teórico experimental, ya que es importante conocer las características del material, forma de conexión, forma constructiva, etc., para poder establecer un modelo analítico (López, 2000).

Entre los elementos que admiten un análisis por tramos se encuentran los convertidores de 6 y 12 pulsos y los rectificadores controlados por tiristores (TCR). Los rectificadores trifásicos son uno de los componentes más utilizados en la industria para las situaciones en donde se requiere energía DC, tales como: máquinas de lavado industrial, trituradoras, aplicaciones en el endurecimiento de piezas de acero, equipos de tracción, controladores de velocidad, convertidores *AC – DC*. Por el nivel de potencia que maneja y la distorsión armónica que introduce al sistema, es importante realizar un análisis detallado

de este tipo de carga para estudiar su impacto en el sistema.

Una topología típica de un convertidor de 6 pulsos es mostrada en la figura 2, en la cual R_R y X_{LR} representan la impedancia de dispersión en la fase R del transformador conectado al rectificador o, en su defecto, la impedancia de la línea que comunica al barraje más próximo.

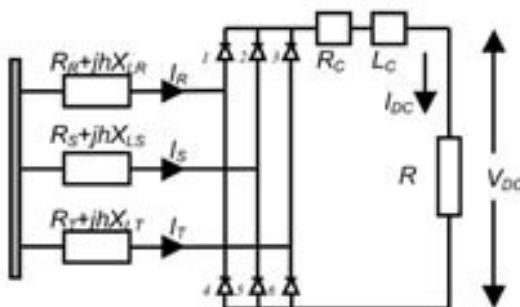


Figura 2. Diagrama del rectificador trifásico de 6 pulsos

R_c es la resistencia de la línea en el lado DC , L_C es la inductancia del lado DC y R es la carga. La emisión de armónicos de este componente está regida por la regla: $h = p \cdot k \pm 1$; $k \in \mathbb{Z}^+$, donde P es el número de pulsos del rectificador. Se requiere encontrar una expresión para la forma de onda de la corriente de línea y partir de ella sus componentes armónicas. La manera de realizar esto es determinando la onda por tramos (Boix Aragónés, 1996), o utilizando funciones de suicheo (Sakui y Fujita, 1994).

Las funciones de suicheo se ajustan mejor cuando se considera que la inductancia $L_C = \infty$. Esta condición es de gran importancia en sistemas de alto voltaje DC (HVDC) en donde se desea que el contenido armónico de corriente sea bajo en el lado DC; en éste la inductancia se comporta como un filtro pasa bajo.

En este trabajo se utiliza un desarrollo por tramos el cual parte de un análisis a partir del dominio del tiempo, lo que permite interpretar mejor los resultados obtenidos. Para utilizar este modelo se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Los voltajes son simétricos y balanceados pero pueden presentar distorsión armónica.
 - Las impedancias de las fases R, S y T son de igual valor, es decir no existe desbalance.
 - Para la carga se considera que la corriente y el voltaje son continuos por lo que solamente una resistencia es modelada.
 - No se llevan en cuenta los períodos de traslape, es decir, las conmutaciones entre una fase y otra son instantáneas.
 - La inductancia del lado DC no es considerada, esto implica que la onda de corriente presenta el máximo rizado.

La corriente que circula por una fase del rectificador trifásico está dada por la expresión:

$$(2) \quad i(t) = \sum_{n=1}^{N_{max}} a_n' \cdot \cos(n \cdot wt) + b_n' \cdot \sin(n \cdot wt)$$

La manera de obtener a_n' y b_n' surge de realizar un análisis de la forma de onda en el dominio del tiempo para después obtener las componentes de Fourier de manera analítica, la deducción completa es descrita en *Flujo de carga Armónico para Sistema de distribución radiales*, (Garcés, 2004) y es de carácter general ya que se puede aplicar a cualquier carga del primer grupo (con control electrónico). Con el conocimiento de estas constantes, se determina el valor de la inyección de corriente para cada frecuencia armónica. Este proceso es iterativo, ya que las constantes dependen de las tensiones armónicas; por tal razón, es importante que los parámetros del modelo de carga no lineal tengan valores que garanticen la solución de las ecuaciones analíticas resultantes y, por consiguiente, la convergencia del flujo de carga armónico.

Para el cálculo de (2) es necesario conocer los parámetros del rectificador. Asumiendo que los parámetros del transformador son conocidos y si la corriente DC consumida por el rectificador es dada, la resistencia de carga es estimada por medio de (3):

$$(3) \quad R = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \text{ donde } V_{DC} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot V_1}{\pi}$$

V_1 : Es el valor eficaz del voltaje línea neutro de frecuencia fundamental.

R_c es normalmente muy pequeño comparado con R y se puede despreciar.

Para el caso en que la potencia activa consumida por el rectificador sea conocida la resistencia de carga es calculada a partir de (3) con la siguiente modificación:

$$(4) \quad P_{DC} = P_1 I_{DC} = \frac{P_{DC}}{V_{DC}}$$

En (4) se considera que el puente rectificador no almacena ni disipa energía, por lo que toda la potencia inyectada en el lado AC es transferida al sistema DC. Esta misma metodología se extiende a los convertidores de 12 pulsos, los TCR de 6 y 12 pulsos y en general a cualquier carga de tipo electrónico con una emisión de corrientes con forma de onda periódica.

3. FLUJO DE CARGA ARMÓNICO (FCA)

3.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Para una red radial con N nodos, el número mínimo de incógnitas que determinan el estado del sistema es $2 \cdot N_{PQ} + N_{PV}$ donde N_{PQ} es el número de

nodos de carga del sistema y N_{PV} es el número de nodos de generación. Cuando una red posee cargas no-lineales el problema se hace más complejo; ya que, además de las incógnitas a frecuencia fundamental, aparecen las tensiones y los ángulos a frecuencias armónicas de cada nodo del sistema para cada una de las frecuencias armónicas (h), como se muestra en la tabla 1.

El conjunto de ecuaciones no-lineales que modela el problema de flujo de carga armónico es el siguiente:

En las cargas lineales se conoce normalmente la potencia a frecuencia fundamental, por lo tanto se plantean las ecuaciones de potencia nodal:

$$(5) \quad P_c^{(1)} - j \cdot Q_c^{(1)} - \left(V_c^{(1)} \right)^* \cdot \sum_{k=1}^N Y_{ck}^{(1)} \cdot V_k^{(1)} = 0$$

En donde el superíndice indica el orden armónico (1 significa frecuencia fundamental).

Igualmente, se tiene el balance de corrientes a frecuencias armónicas.

$$(6) \quad \frac{1}{R_c + j \cdot h \cdot X_c} \cdot V_s^{(h)} + \sum_{k=1}^N Y_{ck}^{(h)} \cdot V_k^{(h)} = 0$$

La impedancia es calculada con los datos de potencia a frecuencia fundamental:

$$(7) \quad R_c + j \cdot X_c = \frac{|V_c^{(h)}|^2}{P_c^{(1)} - j \cdot Q_c^{(1)}}$$

Elementos	Variables Conocidas	Variables Desconocidas	Número de Incógnitas
Slack	$V^{(1)}$ y $\theta^{(1)}$	$V^{(h)}$ y $\theta^{(h)}$	$2 \cdot h$
Generadores (N_G)	$V^{(1)}$ y $P^{(1)}$ generados	$Q^{(1)}$ y $\theta^{(1)}$, $V^{(h)}$ y $\theta^{(h)}$	$2 \cdot N_G + 2 \cdot N_G \cdot h$
Cargas (N_c)	$P^{(1)}$ y $Q^{(1)}$	$V^{(1)}$ y $\theta^{(1)}$, $V^{(h)}$ y $\theta^{(h)}$	$2 \cdot N_c + 2 \cdot N_c \cdot h$
Cargas No Lineales (N_L)	Parámetros (β)	$V^{(1)}$ y $\theta^{(1)}$, $V^{(h)}$ y $\theta^{(h)}$	$2 \cdot N_L + 2 \cdot N_L \cdot h$

Tabla 1. Planteamiento del Flujo de Carga Armónico

En las cargas no-lineales se tiene el modelo de los elementos y el balance de corrientes a frecuencia fundamental:

$$(8) \quad f^{(1)}(V_L^{(1)}, V_L^{(h)}, \beta) - \sum_{k=1}^N Y_{Lk}^{(1)} \cdot V_k^{(1)} = 0$$

Así mismo, se tiene el balance de corrientes de acuerdo con el modelo para cada nivel armónico h :

$$(9) \quad f^{(h)}(V_L^{(1)}, V_L^{(h)}, \beta) - \sum_{k=1}^N Y_{Lk}^{(h)} \cdot V_k^{(h)} = 0$$

En el nodo slack se tiene el valor de tensión (magnitud y ángulo) a frecuencia fundamental y los valores de potencia se pueden obtener una vez determinadas las tensiones nodales del sistema. Para frecuencias armónicas, se requiere hacer cumplir el balance de corrientes:

$$\frac{1}{R_{th} + j \cdot h \cdot X_{th}} \cdot V_s^{(h)} + \sum_{k=1}^N Y_{ck}^{(h)} \cdot V_k^{(h)} = 0$$

(10)

El sistema completo de ecuaciones $F(X) = 0$ puede ser resuelto para las h frecuencias armónicas consideradas.

El primer enfoque a este problema fue propuesto por Xia (1082, Part I and Part II) y es una extensión del algoritmo de Newton-Raphson para un sistema con mayor número de ecuaciones correspondiente al FCA. Sin embargo, la necesidad de modelos analíticos para las cargas no-lineales y el tamaño del jacobiano limitan su uso. Es por ello que se optó el uso del algoritmo de penetración armónica y penetración armónica iterativa, que se describen a continuación.

3.2. METODOLOGÍA DE FCA

La metodología propuesta en *Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas* (Herraiz, 2002), es conocida como *penetración armónica iterativa* y fue desarrollada para sistemas de transmisión; en esta metodología el problema $F(\vec{X}) = 0$ es dividido en

dos sub-problemas (F_1, F_h) . En donde F_1 soluciona el problema de frecuencia fundamental aplicando un algoritmo de Newton-Raphson y F_h resuelve el problema a frecuencias armónicas.

Basado en la metodología anterior y tomando provecho de las particularidades propias de las redes de distribución, se plantea una nueva metodología con la cual se encuentran resultados confiables con un tiempo computacional mínimo. Para lograr este objetivo fue desarrollado un algoritmo de flujo de carga radial adaptado al método de penetración armónica iterativa para el estudio de redes de distribución tal y como se plantea en la sección 2.2. Este método además de ser rápido puede adaptarse al modelo por tramos propuesto para las cargas no-lineales.

Una vez finalizado el flujo de carga, se tienen definidos los modelos de las cargas lineales y no lineales. Para encontrar las tensiones armónicas se debe construir la matriz \mathbf{Y}_{BUS} para cada frecuencia y resolver la ecuación (10):

$$(11) \quad I^{(h)} = \mathbf{Y}_{BUS}^{(h)} \cdot V^{(h)}$$

En la expresión anterior las inyecciones de corriente son conocidas porque dependen de la carga no lineal considerada.

En las cargas no-lineales la corriente es obtenida del modelo, en las cargas lineales la corriente es cero debido a que la impedancia equivalente de estas cargas (ecuación 7) es considerada en la matriz \mathbf{Y}_{BUS} .

El jacobiano no es construido en ninguna de las fases del FCA por lo cual no se requiere de funciones de inversión de matrices o factorización triangular las cuales tienen un alto esfuerzo computacional.

Si los modelos utilizados no consideran la interacción armónica el proceso termina¹, en caso contrario, los nuevos valores de $V(b)$ modifican las inyecciones de corriente en las cargas no-lineales por lo cual se debe reiniciar el proceso con estos nuevos valores, como se muestra en la figura 3.

¹ Si todas las cargas no-lineales tienen modelos porcentuales la metodología de flujo de carga se conoce como penetración armónica, en caso contrario se trata de penetración armónica iterativa.

3.3. INICIALIZACIÓN DEL FLUJO ARMÓNICO DE CARGA

La selección de las condiciones iniciales en el caso del FCA es mucho más compleja que las del flujo convencional. No obstante, en Xia (1982) se hacen algunas recomendaciones para seleccionar estos valores:

- La amplitud y fase de las tensiones a frecuencia fundamental se seleccionan de la manera habitual en 1 pu a 0° .
- La magnitud de los voltajes armónicos en los elementos no-lineales y a las frecuencias de estudio se asumen en un valor cercano a 0.01 pu y 0° .

La segunda recomendación no debe ser tomada de manera estricta, pues depende del tipo de cargas no-lineales que se consideren; además, las magnitudes de las tensiones tienden a disminuir a medida que la frecuencia aumenta. No todas las tensiones armónicas deben ser inicializadas, ya que los elementos no-lineales sólo producen contaminación armónica a determinadas frecuencias.

Si se pretende aplicar penetración armónica, la inicialización de los voltajes armónicos no tiene ninguna repercusión en el resultado final del proceso (a diferencia de la penetración armónica iterativa). Esto se debe a que el método no considera la interacción armónica.

Una fase de inicialización es propuesta por Sainz (1995), ésta utiliza el concepto de penetración armónica tradicional empleando voltajes planos (1 pu) a frecuencia fundamental, para obtener un aproximado de las corrientes armónicas (usando el modelo porcentual de las cargas no lineales). De esta forma, se tienen valores iniciales de cada una de las tensiones armónicas del sistema. Este tipo de inicialización fue implementada en este trabajo con el método de penetración armónica iterativa.

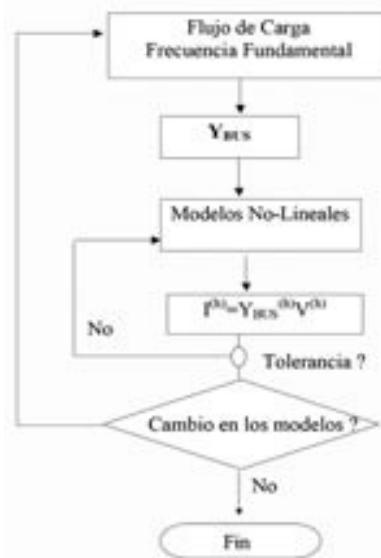


Figura 3: Diagrama de flujo del algoritmo de penetración armónica iterativa

3.4 FLUJO DE CARGA RADIAL

En el flujo de carga a frecuencia fundamental pueden ser aplicadas las metodologías tradicionales; sin embargo, en el caso de redes radiales de distribución, existen algoritmos más rápidos especialmente diseñados para este tipo de redes. Uno de estos métodos es el barrido iterativo de corrientes.

Éste es un método linealizado que aplica de manera separada la primera y la segunda ley de Kirchhoff: la primera ley se usa en un barrido hacia arriba en donde se encuentra los flujos de corriente por cada línea. La segunda ley se usa en el barrido hacia abajo encontrando las tensiones en los nodos.

El ordenamiento nodal es importante, pues permite sistematizar el proceso al calcular el flujo de corriente por una línea a partir de los flujos en las líneas inferiores y de la inyección de corriente en el nodo de recibo (barrido hacia arriba). Igualmente, permite calcular el voltaje en nodos inferiores a partir del voltaje en un nodo superior (barrido hacia abajo).

4. IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

Se diseñó un programa de computador bajo entorno windows en el que se muestra la eficiencia del método de penetración armónica iterativa, usando barrido de corrientes para la frecuencia fundamental. El programa SIMULAR-SR (Simulador de armónicos para sistemas radiales) fue desarrollado usando Borland Delphi 5.0 como lenguaje de programación.

El uso de lenguajes de alto nivel en el desarrollo de aplicaciones computacionales en Ingeniería Eléctrica ha surgido de la necesidad de dar solución a los problemas inherentes a los sistemas de eléctricos. Las aplicaciones modernas de ingeniería no solo requieren el desarrollo de algoritmos más robustos y eficientes sino también la programación de interfaces gráficas que faciliten la entrada y salida de datos. La estructura del programa se muestra en la figura 4:

Las principales características del programa son:

- Entrada y salida de datos por medio del sistema gráfico.
- Chequeo de datos erróneos disminuyendo la probabilidad de errores internos.
- Posibilidad de imprimir los resultados o de guardarlos en formatos compatible con otros programas (.doc para los datos y .bmp para los gráficos).
- Rápida convergencia.
- Posibilidad de usar tanto penetración armónica

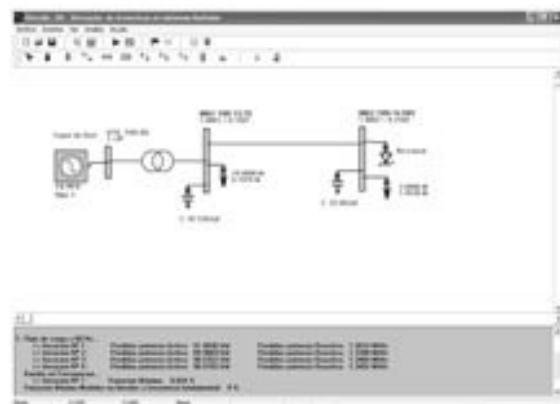


Figura 5: Entrada de datos al programa

(modelos porcentuales) como penetración armónica iterativa (modelos por tramos).

- Visualización de la convergencia en cada iteración.
- Diseño para redes radiales.



Figura 4: Estructura del programa.

Los resultados pueden ser visualizados en tablas o en gráficos de corriente nodal tanto en porcentaje individual de cada nivel armónico como en la forma de onda de tensión o corriente como se muestra en las figuras 5 y 6.

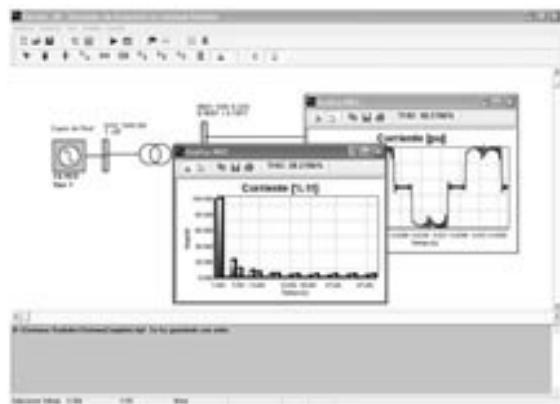


Figura 6: Resultados del flujo de carga armónico.

5. EJEMPLOS DE PRUEBA

La figura 3 muestra un sistema radial con una carga no-lineal (convertidor de 6 pulsos).

Los datos del sistema son los siguientes:

Línea: $Z = 0,02 + j 0,06 \text{ pu}$

Transformador: $0.0098 + j 0.0762 \text{ pu}$

N1: $V = 69 \text{ kV}$. Barraje infinito.

N2 (IND1) : $V = 13.8 \text{ kV}$.

Carga 10 MW $f_p = 0.8$ N3 (IND2) : $V = 13.8 \text{ kV}$.

Carga 3 MW $f_p = 0.9$

Convertidor de 6 pulsos sin filtro capacitivo. $P = 5 \text{ MW}$

Los resultados utilizando el software diseñado (SIMULAR-SR) y la metodología de penetración armónica iterativa se muestran en la tabla 2.

Armónico:	1	5	7	11	13	17
V(IND1)	0.96	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00
V(IND2)	0.95	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01
I(Conv)	5.26	1.18	0.54	0.42	0.26	0.21

Tabla 2: Resultados del flujo de carga armónico

Potencia base: 1 MW; Voltaje base: 13.8 kV en IND1. Estos resultados fueron confrontados usando un software de simulación en el dominio del tiempo (Simulink). Los resultados presentan una diferencia máxima del 15% en los armónicos de orden superior (13 y 17) e inferior al 5% en los primeros (1,5,7,11)

- Tiempo de cálculo del flujo de carga: 0.7 segundos.
- Tiempo de cálculo de Simulink: 109 segundos.

De igual forma, el software desarrollado fue probado con un sistema IEEE de 18 nodos obteniendo resul-

tados equivalentes a los obtenidos usando Digsilent Power Factory. Se muestran los resultados para el voltaje en el nodo 5 el cual tiene una carga no lineal. El programa Digsilent solo puede ejecutar un algoritmo de penetración armónica (no iterativa). El programa desarrollado (SIMULAR-SR) utiliza tanto penetración armónica como penetración armónica iterativa. La metodología de penetración armónica iterativa sólo puede ser comparada con metodologías igualmente exactas, como son las del dominio del tiempo (Simulink). En cuanto a los resultados utilizando el método de penetración armónica (no iterativa), estos son iguales tanto en el programa desarrollado como en Digsilent Power Factory debido a que el modelo porcentual es el mismo.

APORTES Y CONCLUSIONES

- Se desarrolló un FCA especialmente adecuado para el análisis de sistemas de distribución con topología radial, en el que se utiliza un método de barrido iterativo para la frecuencia fundamental.
- Se implementó un software aplicando el modelamiento y la metodología propuesta, representando así un aporte académico y práctico cuyo objetivo es la difusión del conocimiento en el sector académico y el sector eléctrico.
- La metodología de modelamiento por tramos considera el efecto de las cargas no lineales sobre el sistema, ya que se adapta a metodologías de análisis como la penetración armónica iterativa sin comprometer la convergencia del método ni el tiempo de cómputo.
- La metodología de barrido iterativo acelera el tiempo de cálculo y produce resultados equivalentes a los obtenidos con metodologías más exactas como las que se utilizan en el dominio del tiempo.
- La metodología de penetración armónica iterativa permite la construcción de modelos más flexibles para las cargas no lineales, ya que no es necesario construir un Jacobiano tal como se hace al aplicar el método de Newton Raphson.

Frecuencia (x 60)	Voltaje	Angulo
1	1,0851	-4,3867
5	0,0391	-165,301
7	0,0932	-178,372
11	0,0093	179,876
13	0,0037	-53,5541
17	0,0023	-57,4552

Tabla 3: Resultados para el sistema de 18 Nodos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Arrillaga, Jose Et Al. 1997.

Power system harmonic analysis.

Jhon Wiley and Sons.

Boix Aragonès, Oriol. 1996.

Estudio y modelización en régimen permanente de cargas no lineales para el análisis armónico de redes eléctricas.

Barcelona. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Eléctrica.

Garces r. Alejandro, galvis m. Juan c. 2004.

Flujo de Carga Armónico para Sistemas de Distribución Radiales.

Proyecto de Grado para optar al título como ingeniero electricista. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Eléctrica

Herraiz Jaramillo, Sergio. 2002.

Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas.

Barcelona. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Eléctrica.

López García, Ricardo. 2000.

Desarrollo y validación de modelos de transformadores monofásicos y trifásicos con saturación, para el análisis de armónicos en sistemas de potencia.

Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Eléctrica.

M. Sakui and H Fujita, 1994.

“An Analytical Method For Calculating Harmonic Currents of a Three-Phase Diode-Bridge Rectifier with dc Filter”.

En: *IEEE Transaction on Power Electronic*, Vol 9, No. 6, pp. 631-637, November, 1994.

Sainz Saperas, Luis. 1995.

Estudio de la formulación y resolución del problema del flujo de armónico de cargas.

Barcelona. Tesis Doctoral . Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Eléctrica.

Xia, dao zhi and heydt g.T. 1982.

“Harmonic power flow studies part I - Formulation and solution”.

En: *IEEE Transactions on power apparatus and systems*. Vol PAS 101 N°6 (Jun 1982).

Xia, Daozhi And Heydt G.t. 1982.

“Harmonic power flow studies part II Implementation and practical application”.

En: *IEEE transactions on power apparatus and systems*. VOL PAS 101 N°6 (Jun 1982).

Xu, Wilson.

Harmonic modeling and simulation task force reference documents.

Disponible en Internet: <http://www.ee.ualberta.ca/pwrsys/IEEE/download.html>

BIBLIOGRAFÍA.

Aristizabal Marcelo., Rios Carlos. 2001.

Modelamiento de sistemas eléctricos y empleo del software Digsilent Power Factory en el análisis de armónicos.

Trabajo de grado para optar al título como Ingeniero Electricista. Universidad Tecnológica de Pereira.

Grainger, John J., Stevenson, William D. 1996.

“Análisis de sistemas de potencia”.

MacGraw-Hill.

Muñoz C. Fernando. 2002.

Caracterización del sistema eléctrico de la facultad de ingeniería eléctrica para un estudio de armónicos.

Trabajo de grado para optar al título como Ingeniero Electricista. Universidad Tecnológica de Pereira.