



# Análisis de la compensación de potencia reactiva en sistemas contaminados con armónicos

Secundino Marrero      Arístides A. Legrá  
Ileana González

Recibido: Julio del 2007

Aprobado: Septiembre del 2007

## Resumen / Abstract

En este artículo se presentan los resultados obtenidos en la evaluación de una red industrial con presencia de contaminación armónica, donde las cargas no lineales corresponden fundamentalmente a rectificadores y variadores de velocidad. Se establecieron los armónicos típicos generados por estas cargas y ello permitió determinar los niveles de distorsión armónica de tensión y corriente para analizar su influencia en la selección del banco de condensadores durante la compensación de la potencia reactiva atendiendo al comportamiento del sistema ante diferentes estados de carga.

Palabras clave: Compensación, armónicos, sistemas de suministro, calidad de energía

*The article is given the evaluation obtained of an industrial network with the presence of harmonic contamination, where the non lineal loads correspond fundamentally to rectifiers and variators of speed. Where the typical harmonic generated by these loads settled down and it allowed it to determine the levels of harmonic distortion of tension and current to analyze their influence in the selection of the bank of condensers during the compensation of the power it reactivates assisting to the behavior of the system before different load states.*

*Key words: Compensation, harmonics, distribution systems, power quality*

## INTRODUCCIÓN

La realización de estudios de calidad de energía asociados a la presencia de armónicos en las redes de suministro industrial, debe partir de un monitoreo de su comportamiento, que permita la identificación de eventos potencialmente perjudiciales y su corrección para eliminar los resultados indeseados en la operación de equipos y sistemas, de manera que se puedan aplicar medidas correctivas atendiendo a las particularidades de cada sistema.<sup>1-3</sup>

Tradicionalmente las fuentes de armónicos han estado asociadas a convertidores estáticos y rectificadores en sistemas de potencia, pero hoy se han incorporado nuevos elementos en el sector industrial y en los

servicios, como los balastos electrónicos, arrancadores suaves, compensadores estáticos y otros equipos que presentan dispositivos semiconductores de conmutación.

Para la absorción de armónicos, resulta necesario establecer criterios y evaluar de forma independiente los diferentes casos que se presentan en las redes industriales, para lo cual es necesario considerar los conceptos y distintos enfoques del problema en la actualidad.

Este trabajo fue orientado al uso del software *Diseño y cálculo de sistema eléctricos (DYCSE)*, elaborado en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM),

donde se recogen las experiencias obtenidas por los autores de este artículo para la evaluación y mejora en la calidad de suministro en redes industriales, apoyados en los modelos de los diferentes componentes de la red que permiten evaluar el comportamiento de las cargas no lineales y la afectación que estas introducen al sistema en los niveles de distorsión armónica de tensión (THDv) y corriente (THDi).

Las pautas para el análisis de la distorsión armónica están definidas en *IEEE Std 519-1992*,<sup>1,4</sup> donde se muestra cómo es posible analizar la contribución armónica de las cargas no lineales en las tensiones y las corrientes del sistema a través de la modelación de las impedancias de los elementos en función de la frecuencia.

## COMPENSACIÓN DE REACTIVO E INCIDENCIA DE LOS ARMÓNICOS

Los condensadores son ampliamente usados en los sistemas de distribución para la compensación de la potencia reactiva, el control de tensión y al mismo tiempo para la disminución de las pérdidas. Los beneficios de su uso hoy están estrechamente ligados al nivel de contaminación armónica que presentan las redes, lo que en ocasiones exige el uso de medidas correctivas para su protección en dependencia de los niveles de contaminación existentes.

En la referencia 5 se resuelve la compensación de la potencia reactiva mediante la instalación de bancos de condensadores y posteriormente, se soluciona el problema de los armónicos instalando filtros, pero sin considerar la interdependencia de ambos problemas. Asimismo otros autores<sup>6,7</sup> resuelven el problema al minimizar las pérdidas totales (a frecuencias fundamental y armónica) mediante un novedoso método de optimización que selecciona la dimensión y localización de filtros pasivos de sintonía simple en el alimentador.

### Corrientes armónicas

La corriente que absorben ciertas cargas, por ejemplo, un rectificador, donde su deformación da lugar a la aparición de armónicas características (de orden 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25...) producto del número de pulsos del rectificador (6, 12, 18, 24...) y su magnitud decrece en el orden  $1/N$ .

También pueden aparecer armónicas no características 2, 3, 4, 6, 8, debido a la asimetría de las cargas del equipo convertidor o de la fuente de alimentación. Los resultados de las investigaciones relacionadas con la contaminación armónica de cargas no lineales mostradas,<sup>8-10</sup> expresan en

diagramas y tablas, el orden de la armónica, valor de la corriente y se realiza el análisis estadístico para establecer valores medio, máximos, mínimos y la dispersión.

Cuando se realiza la medición en el sistema, con el objetivo de conocer las armónicas presentes, es necesario correlacionarlas con los estados de carga, donde conviene utilizar valores absolutos, ya que si se utilizan valores relativos respecto a la componente fundamental (que varía), se corre el riesgo de perder la magnitud real.

En otras cargas como los rectificadores controlados, por ejemplo, se nota la acción del control (presente en los hornos de arco eléctricos), donde al inicio de la fusión se observa un comportamiento caótico y luego se hace más ordenado, pero de todos modos se observan todas las armónicas.

En los casos en que estén presentes fenómenos periódicos de varios ciclos, que son  $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/4$ ,..., de la frecuencia fundamental de la red (denominados subarmónicos), estos se consideran armónicos de las frecuencias 30, 20, 15 respectivamente. Más complejo resulta la aparición de interarmónicas, que pueden ser exaltadas por alguna situación particular, como es el caso de resonancias en el sistema de control. De esto se puede concluir que el espectro es continuo y para determinados valores de frecuencia, la corriente armónica es sensiblemente elevada y estable, mientras que para otros casos, es muy variable y puede aparecer por ráfagas asociadas a transitorios. Por ello resulta discutible la validez del análisis armónico en presencia de transitorios, sin embargo, se pasará por alto este aspecto para analizar la incidencia que tiene la contaminación armónica en las pérdidas y el factor de potencia del sistema en redes balanceadas que presentan un alto grado de variación en el régimen de funcionamiento de sus cargas. Para ello se analizarán modelos simplificados de los componentes de la red.

Hoy, en algunas empresas del país no se analizan los efectos de los armónicos en sus instalaciones. Estos armónicos pueden tener su origen en la propia industria, o bien, en la red de suministro eléctrico al haber sido contaminadas por otros clientes.

Entre los problemas más frecuentes que causan los armónicos se pueden señalar:

- Interferencias en las telecomunicaciones.
- Distorsión en la tensión de la red.
- Perturbaciones en los sistemas electrónicos informáticos.

- Fallas en transformadores y motores debido al sobrecalentamiento producido por el aumento de las pérdidas en el núcleo electromagnético y la generación de mayores corrientes parásitas.
- Funcionamiento defectuoso de relés.
- Interrupción en la alimentación debido al disparo de las protecciones.

La solución más frecuente a estos problemas consiste en instalar filtros para la eliminación de armónicos, es decir, por una parte se debe mejorar el factor de potencia instalando condensadores, y por otra, se deben incorporar filtros para la protección de los condensadores y la eliminación de los armónicos si la red lo exige.

### Filtros de armónicos

La presencia de armónicos puede plantear problemas tanto para los condensadores instalados como para el resto de aparatos conectados a la red. Por una parte las condiciones de trabajo de los condensadores pueden llegar a ser extremadamente duras o inadmisibles y por otro aparecen perturbaciones y distorsiones en el funcionamiento de equipos y el sistema. La solución de la compensación de energía reactiva en redes con armónicos se realiza protegiendo los condensadores mediante filtros de protección o reduciendo el nivel de armónicos mediante filtros de absorción.

Los filtros resintonizados o antiresonantes son diseñados para presentar una frecuencia de resonancia por debajo de la menor armónica que ofrece el sistema (generalmente el 5to. armónico). El valor de la frecuencia de desintonía se encuentra comprendido entre 179 y 223 Hz, donde la sobretensión en el condensador, dependerá del grado de desintonía elegido, mientras que el filtro sintonizado presenta una impedancia muy baja para la corriente armónica individual, derivando la mayor parte de esta hacia él y no hacia la red de suministro. El valor de frecuencia de resonancia en este caso, se encontrará siempre levemente por debajo de la armónica que se desea eliminar.

### MODELACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA RED

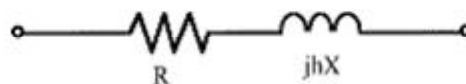
En el análisis y caracterización del sistema en condiciones armónicas, se requiere especificar modelos para los diferentes componentes del sistema, teniendo en cuenta su dependencia con la frecuencia.<sup>4,11</sup>

Los elementos del sistema se representan a través de impedancias lineales o no lineales, donde el primer

caso, corresponde a los elementos en que existe una relación proporcional entre la tensión y la corriente para las mismas componentes frecuenciales; mientras que, en el segundo, los elementos no tienen esta relación proporcional en todo su espectro y se pueden representar a través de impedancias lineales. En este caso se encuentran las líneas, los transformadores, las máquinas eléctricas y algunas cargas.

A continuación se seleccionan los modelos de los elementos del sistema que serán utilizados para la simulación.

**Modelo de línea corta:** Para el análisis armónico el modelo de una línea (en dependencia de su longitud) puede representarse por un circuito RL en serie (figura 1), y en el caso de los cables resulta necesario considerar la capacitancia asociada. La resistencia debe corregirse cuando se tiene en cuenta el efecto piel para las altas frecuencias.



Modelo de la línea.

1

La variación de la resistencia cuando se tienen en cuenta el efecto piel puede ser evaluada según la siguiente expresión.<sup>4</sup>

$$R = R_{dc} (0,035X^2 + 0,938) \quad X < 2,4$$

$$R = R_{dc} (0,035X + 0,3) \quad X \geq 2,4$$

donde:

$$X = 0,001585 \left( \frac{f}{R_{dc}} \right)^{0,5}$$

**Transformador:** En el modelo de la figura 2 la reactancia varía linealmente con la frecuencia, y la resistencia varía en dependencia del efecto piel, utilizándose para el cálculo de la resistencia la expresión:

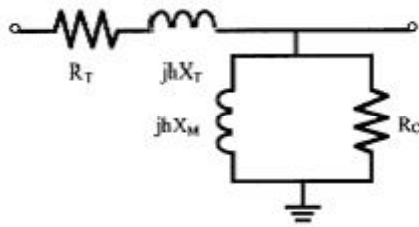
$$R_T = R_{dc} (1 + Ah^B)$$

donde:

$R_{dc}$  : Resistencia en ohms.

$h$  : Orden armónico.

Coefficientes A y B: Toman los valores de 0,1 y 1,5 respectivamente.



Modelo del transformador.

2

**Máquinas sincrónicas:** El modelo simplificado más recomendado (figura 3), consiste en la representación de la máquina para las secuencias directa o inversa. Los generadores modernos no producen voltaje armónico significativo; por consiguiente, ellos no son considerados fuentes armónicas y pueden representarse por una impedancia conectada a tierra. Frecuentemente son representados por la reactancia subtransitoria o la reactancia de secuencia negativa.

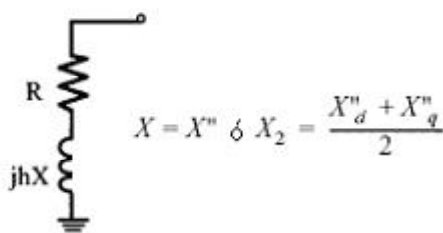
El modelo más sencillo consiste en un circuito serie RL que representa la reactancia subtransitoria con una relación de  $X/R$  (a la frecuencia fundamental) entre 15-50. Sin embargo, la resistencia del generador debe corregirse para frecuencias altas debido al efecto piel.

$$R = R_{do}(1,0 \text{ } Ah^B)$$

donde:

$R_{do}$ : Resistencia de armadura.

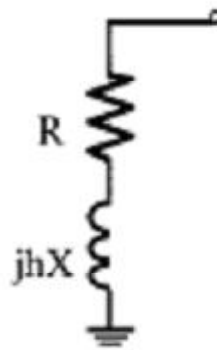
$h$ : Orden armónico.



Modelo de una máquina sincrónica.

3

**Motor asincrónico:** Para las frecuencias armónicas su representación obedece básicamente a los modelos convencionales en la frecuencia industrial, donde es posible simplificar su estructura como se observa en la figura 4, aquí se emplea la reactancia equivalente, ya que para altas frecuencias el deslizamiento se aproxima a la unidad. En este modelo,  $L$  es la inductancia de rotor bloqueado y  $R$  es la resistencia de amortiguamiento, que representa las pérdidas del motor. La reactancia resultante debe ser multiplicada por  $h$ .



Modelo de una máquina asincrónica.

4

**Cargas:** En el estudio de flujo armónico las cargas de baja potencia no se representan individualmente; para ello son utilizados circuitos equivalentes que representan mejor las características de impedancia del conjunto de cargas. Es posible considerar variaciones en la impedancia del sistema con la frecuencia o con el nivel de carga, tanto para consumidores domésticos como para industriales y en este caso se utiliza el modelo<sup>11</sup> de la figura 5.

**Modelación de las cargas no lineales por inyección de corriente:** En el sistema las cargas no lineales se modelan como fuentes de corriente constante para cada frecuencia armónica y se calculan con respecto a la corriente de la frecuencia fundamental.

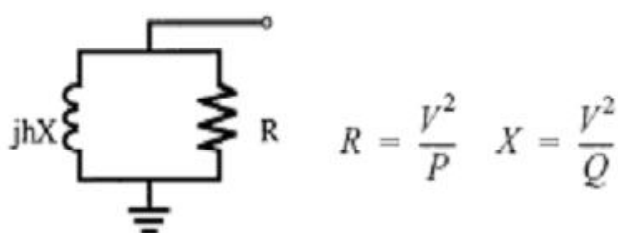
Durante el funcionamiento normal de los convertidores, aparecen armónicas de tensión y/o corrientes en las redes. En el caso de los rectificadores, por ejemplo, se generan armónicos tanto en el lado de continua como en el de alterna, donde, las del lado continuo son del orden  $h = Kp$  y las del lado alterno son del orden,  $h = Kp \pm 1$ , siendo  $h$  el orden armónico,  $p$  el número de pulsos del rectificador y  $k$  un número entero positivo.

**Rectificador de seis pulsos:** Si se aplica la serie de Fourier a la onda de corriente de este circuito, entonces se puede considerar que la inyección de corriente en la entrada AC del rectificador de seis pulsos que se alimenta de un transformador Y-Y se expresa por la ecuación:

$$I_a = \frac{2\sqrt{3}}{13} x_{ld} \cos(wt) - \frac{1}{5} \cos(5wt) + \frac{1}{7} \cos(7wt) - \frac{1}{11} \cos(11wt) + \frac{1}{13} \cos(13wt) - \frac{1}{17} \cos(17wt) \dots$$

Donde se reflejan las diferentes componentes de corrientes armónicas incorporadas al sistema.

Atendiendo a los modelos antes mencionados es posible pasar al cálculo del flujo armónico, teniendo en cuenta los distintos métodos recomendados por la literatura,<sup>8</sup> de los cuales ha sido seleccionado para este análisis el reparto de carga y la frecuencia fundamental con la interacción armónica para calcular por separado los flujos.



Modelo de cargas.

5

## ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO

Para evaluar los efectos que tiene la presencia armónica en la compensación se analizará el esquema de una subestación que aparece en la figura 6.

Los datos del caso de estudio se dan a continuación:

1. Sistema 10,5 kV, nodo compensador.
2. Transformadores:  $T_1$ : 10,5/ 6 kV,  $X = 6 \%$ ,  $T_2$ : 6/0,48 kV,  $X = 6 \%$ .
3. Las líneas  $L_1$  y  $L_2$  tiene una longitud de 100 m y 50 m respectivamente.
4. Potencia de los motores:  $M_1 = 100$  KVA,  $M_2 = 300$  kVA,  $M_3 = 700$  kVA,  $M_4 = 150$  kVA.
5. Potencia de las cargas no lineales. Rectificador (RECT.) = 500 kVA y Convertidor (PWM) = 500 kVA.

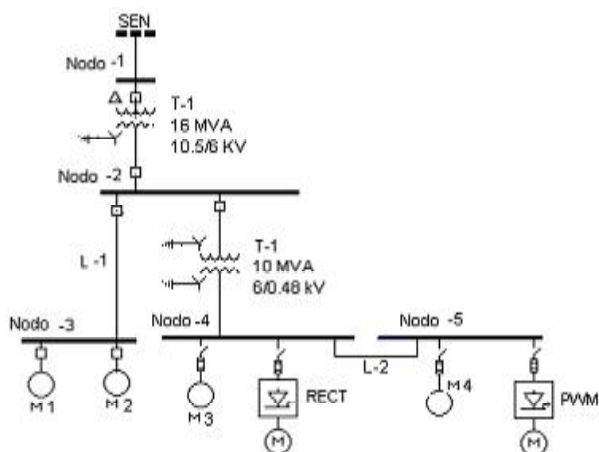


Diagrama monolineal de la red.

6

En el análisis se tendrá en cuenta un sistema balanceado y no se procederá a colocar filtros para la reducción de armónicos en las cargas no lineales, con el objetivo de evaluar el comportamiento durante la variación (del 60 %, 80 % y el 95 %) de las cargas líneas y las no lineales antes y después de la compensación, para poder determinar el total de distorsión armónica de tensión (THDv) en los nodos y el total de distorsión armónica de corriente (THDi) en las ramas de los elementos del sistema. Para ello se analizarán los casos siguientes:

1. Las cargas del sistema están al 60 %.
2. Las cargas del sistema están al 80%.
3. Las cargas del sistema están al 95%.
4. Las cargas lineales (CL) están al 80 %.  
y las cargas no lineales (CNL) al 95%.
5. Las cargas no lineales están al 80% y las lineales al 95%.

Los primeros tres casos a evaluar corresponden al sistema sin la compensación y los dos últimos evalúan la influencia de la variación en las cargas lineales y no lineales en presencia de bancos de condensadores en los nodos de carga.

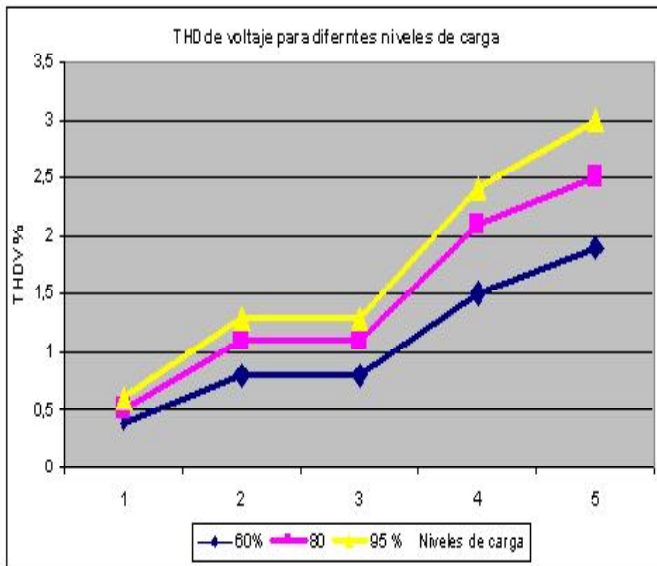
Se utilizará el método de inyección de corriente en las ramas donde están las cargas no lineales correspondientes al rectificador de seis pulsos y al PWM que generan corrientes armónicas con los valores mostrados en la tabla 1.

**Tabla 1**  
Valores de las corrientes armónicas que incorporan las cargas no lineales

lh [A]	PWM	Rectificador
5	232	92
7	139	43
11	38	33
13	38	27
17	25	17
19	21	13
23	-	10
25	-	8
29	-	7,7
31	-	6
33	-	3

Al realizar el flujo de carga a frecuencia fundamental, se observa que en ninguno de los regímenes de cargas estudiados el THDv (antes de la compensación) sobrepasa el valor de 3 % (figura 7), en presencia de un factor de potencia en los nodos inferior a 0,92 como se muestra en la tabla 2, lo que satisface lo recomendado por la norma,<sup>1</sup> en cuanto a niveles de distorsión armónica, pero requiere de una mejora del  $\cos \phi$  para reducir las pérdidas y evitar penalizaciones de la empresa eléctrica.

Para corregir el factor de potencia se colocarán bancos de condensadores en los nodos con vistas a lograr un valor de 0,91 a 0,92 en el nodo del sistema, considerando los diferentes regímenes de carga en los casos analizados anteriormente. Las capacidades de los bancos de condensadores utilizados, se muestran en la tabla 3.



**Comportamiento del THDv, para diferentes regímenes de carga sin compensación de reactivo en el sistema.**

7

**Tabla 2**  
**Valor del factor de potencia en los nodos antes de la compensación**

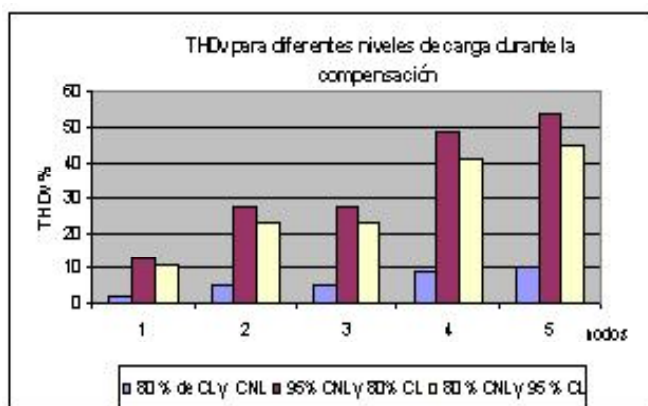
Valor inicial $\cos \phi$	
Nodo1	0,79
Nodo2	0,81
Nodo3	0,80
Nodo4	0,77

**Tabla 3**  
**Valores de los condensadores de compensación del reactivo en los casos de estudio**

Condensadores	Capacidad de los condensadores, MVar		
	Caso	Caso	Caso
	1	2,3	4,5
C1	0,05	0,08	0,08
C2	0,2	0,28	0,3
C3	0,1	0,15	0,15

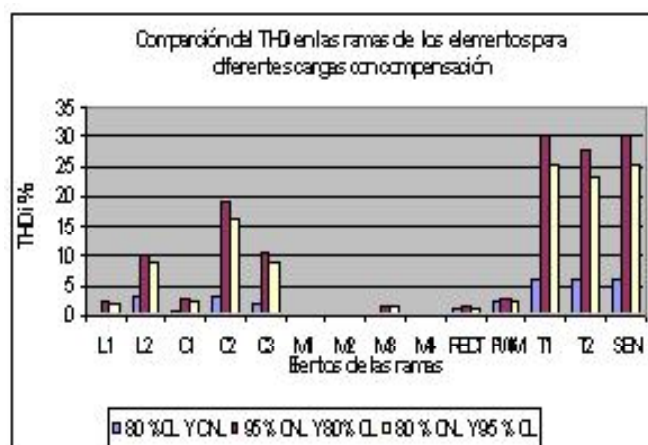
Al efectuar la corrección del factor de potencia en los diferentes casos, se obtiene que el THDv se incrementa y sobrepasa el valor de 5 %, recomendado.<sup>1</sup> Esto se acentúa más en los nodos con cargas elevadas y a pesar de tener mayor incidencia el incremento de las cargas no lineales, al existir la distorsión armónica, el aumento de las cargas lineales, también eleva el THDv. Estos resultados se comparan en la figura 8. Por otra parte, el incremento del THDi en las diferentes ramas de los puntos de conexión, se presentan en la figura 9, donde se observa que su afectación es mayor en los condensadores, las líneas y los transformadores, siendo estos últimos los más afectados, al tener valores muy superiores a los recomendados en las normas. Por ello el Código Nacional Eléctrico Americano (NEC) de 1993 y *Underwriting's Laboratory* (UL), sugieren el uso de transformadores de factor  $k$  para la alimentación de cargas no lineales.

Estos resultados obtenidos guardan relación con mediciones efectuadas en sistemas en condiciones similares. Sin embargo, al establecer una comparación entre los resultados del cálculo realizado con diferentes herramientas informáticas, estos pueden diferir entre sí<sup>8,10</sup> debido a que no existe un modelo único para evaluar los elementos del sistema de potencia y las formulaciones para el análisis pueden ser diferentes al igual que los métodos matemáticos empleados, aspectos estos que resultan de gran importancia en el análisis de armónicos. Por ello, otros autores<sup>11</sup> plantean que, para el estudio de armónicos se deben combinar conjuntamente la modelación, medición y simulación con vistas a poder realizar una evaluación más precisa del problema y así proceder a seleccionar las mejores soluciones en cuanto a la colocación de los medios de compensación de la potencia reactiva y los filtros armónicos.



THDv en los nodos para diferentes regímenes de carga.

8



Valores del THDi en las ramas.

9

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos al calcular las tensiones y corrientes armónicas de un sistema eléctrico están relacionados directamente con la adecuada representación matemática de cada uno de sus componentes, donde existe una estrecha relación entre el incremento de las cargas y la contaminación armónica, como se observa en los modelos aproximados que se han empleado.

La presencia de armónicos en las redes industriales independientemente de que estén por debajo de la norma, debe ser analizada siempre que se procede a la compensación de reactivo, con vistas a considerar su efecto en los elementos del sistema al variar las impedancias de las ramas en los nodos donde se compensa el reactivo. Además, el THDv puede superar los valores límites recomendados en las normas si no se considera la colocación de filtros antes de proceder a la compensación.

Los transformadores, condensadores y las líneas en este orden son los elementos de las ramas más

afectados por la circulación de corrientes armónicas que se evidencia en el THDi elevado del sistema.

## REFERENCIAS

1. Norma IEEE 519/92.
2. Arrillaga, J.; B. Smith; N. Watson and A. Wood: *Power System Harmonic Analysis*, John Wiley & Sons, 1997.
3. Sharon A.: "Flujo de potencia y calidad del suministro", *IEEE. Transaction on Power Systems*, Vol. 13, No. 1, 1999.
4. IEEE. Std 399-1997. *Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis*.
5. Kasikci, I.: *Power Quality Problems and its Solutions*, Large Engineering Systems Conference Series, Halifax, Canada, 2000.
6. González, I.; R. Arzola; S. Marrero y A. Legrá: *Optimización bajo criterios múltiples de redes de suministro industrial*, Seminario Latiamericano de Sistema de Ingenieroa (SELASI), Perú, 2005.
7. Carrillo Caicedo, G. and J. F. Petit Suárez: *Fictitious Power Compensation of Distribution Feeders*, Large Engineering Systems Conference Series, Halifax, Canada, 2000.
8. Herraiz J., S.: "Aportaciones al estudio de flujo armónico de carga", Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2002.
9. Xu, W. and R. Marti J.: "Harmonic Analysis of System with Static Compensation", *IEEE. Transaction on Power System*, Vol. 6, No.1., 1991.
10. Sainz, S. L.: "Formulación del flujo de carga armónico. UPC", Tesis doctoral, 1995.
11. Rios, C.; M. Aristuaga y A. Escobar: *Modelado de sistemas eléctricos en presencia de armónicos*, *Scientia et Technica*, Año IX, No 22, October, 2003.

## AUTORES

### Secundino Marrero Ramírez

Ingeniero en Electrónica Industrial, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM), Moa, Holguín, Cuba  
e-mail: smarrero@ismm.edu.cu

### Ileana González Palau

Ingeniera Electricista, Máster en Electromecánica, Profesora Auxiliar, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Holguín, Cuba  
e-mail: igonzalez@ismm.edu.cu

### Arístides A. Legrá Lobaina

Licenciado en Educación, Especialidad Matemáticas, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Holguín, Cuba  
e-mail: alegra@ismm.edu.cu