

ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

RESUMEN

Este artículo se lleva a cabo a nivel de ejercicio académico un ejemplo en el que se estudia el sistema de distribución de energía eléctrica de la ciudad de Pereira cuando este es afectado por corrientes y voltajes armónicos, también es estudiado el efecto de la colocación de filtros en dicho sistema.

PALABRAS CLAVES: Modelamiento, cargas no lineales, distorsión armónica, filtros, resonancia serie y paralelo.

ABSTRACT

This article is an academic exercise in which the electrical energy distribution system from the Pereira's city studies when this one is affected by currents and harmonic voltages, also is studied the effect of the positioning of filters in this system.

KEYWORDS: *Modelling, non linear loads, harmonic distortion, filters, resonance series and parallel.*

CARLOS ALBERTO RIOS PORRAS

Estudiante Maestría Ingeniería Eléctrica UTP
alpor@andromeda.utp.edu.co

MARCELO ARISTIZABAL NARANJO

Ingeniero Electricista UTP
marcelo.aristizabal@cotel.com.co

Ph. D. RAMÓN ALFONSO GALLEGO R.

Profesor Facultad de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira

**Grupo de Investigación en
Planeamiento de Sistemas Eléctricos
Universidad Tecnológica de Pereira**

1. INTRODUCCION

Los armónicos son distorsiones de las ondas senosoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.

La aparición de corrientes y/o tensiones armónicas en el sistema eléctrico crea problemas tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos, disminución de la vida útil de los equipos, entre otros.

Las soluciones a dicho problema se realizan en forma jerarquizada; primero en forma particular, resolviendo el problema de inyección de armónicos por parte del usuario al sistema (diseñando y ubicando filtros en el lado de baja tensión, usando el transformador como barrera); y segundo, resolviendo el problema en forma global, buscando reducir las pérdidas y mantener los niveles armónicos por debajo de los límites permitidos, en este caso, se trata de un problema de optimización donde se determina la ubicación de los compensadores (condensadores, filtros pasivos, filtros activos).

Independientemente del tipo de compensador utilizado para reducir los niveles de armónicos en el sistema o en el usuario, se debe analizar la forma en que el compensador afecta a la impedancia al variar la frecuencia, esto con el fin de determinar resonancias serie

(baja impedancia al paso de corriente) y paralelo (baja admitancia a la tensión de alimentación).

2. FILTROS PASIVOS PARA COMPONENTES ARMÓNICAS.

El uso de filtros para componentes armónicas en sistemas potencia tiene dos objetivos: Servir de sumidero para las corrientes y tensiones armónicas; y proveer al sistema toda o parte de la potencia reactiva que éste necesita. Los filtros pasivos pueden ser, según el propósito particular que se persigue, de dos tipos:

- Filtros Series.
- Filtros Shunt o paralelo.

Los Filtros Series evitan el paso de una componente de frecuencia particular, desde el contaminante hacia alguna componente de la planta o parte del sistema de potencia, mediante la presencia de una gran impedancia serie a la frecuencia especificada. Estos constan de un inductor y un capacitor en paralelo que se posicionan en serie a la parte de la red que se desea proteger.

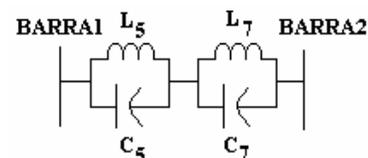


Figura 1. Filtro pasivo serie.

Fecha de Recibo: 21 de abril de 2003

Fecha de Aceptación: 19 de mayo de 2003

Los Filtros Shunt o paralelo proveen un paso alternativo de muy baja impedancia para las frecuencias armónicas, y consisten en una rama resonante serie, compuesta por elementos RLC en conexión paralela con el sistema de alimentación, entre otros.

El filtro paralelo presenta mayores ventajas que el filtro serie porque: Es más económico, sólo transporta las corrientes armónicas para las que fue sintonizado, proporciona una parte de la potencia reactiva al sistema.

2.1. Filtros Shunt o Paralelos Pasivos:

Existe una gran variedad de configuraciones de filtros, pero las más utilizadas son los "Filtros Sintonizados Simples" y los "Pasa Altos".

2.1.1. Filtro Sintonizado Simple. Elimina una armónica determinada; consiste en un banco de condensadores conectado en serie con un inductor.

$$\omega_h = 2\pi fh \tag{1}$$

donde, h es el armónico al cual se quiere sintonizar, ω es la frecuencia angular y f es la frecuencia fundamental.

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{|V|^2}{Q_c} \tag{2}$$

donde, X_c es la reactancia capacitiva, Q_c es el valor de la potencia reactiva que el filtro va a suministrar en cada rama, V es la tensión nominal.

$$C_F = \frac{1}{2\pi f X_c} \tag{3}$$

$$L_F = \left[\frac{1}{2\pi 60h \sqrt{C_F}} \right]^2 \tag{4}$$

$$X_{Lh} = \omega_h L_F \tag{5}$$

$$R_F = \frac{X_{Lh}}{Q} \tag{6}$$

donde, Q es el factor de calidad del filtro, R es la resistencia interna del inductor, ver referencias [1] a [9].

Este filtro se sintoniza a la frecuencia armónica h que se desea eliminar; o sea que, para esta frecuencia, las reactancias inductiva y capacitiva son iguales y por lo tanto se anulan, entonces la impedancia que presentará el filtro para esta frecuencia es mínima (valor igual a la resistencia), y absorberá gran parte de la corriente armónica contaminante.

El factor de calidad del filtro, determina la forma de la característica de impedancia, y hace que ésta sea más o menos estrecha o abrupta.

La impedancia de la configuración del filtro sintonizado simple mostrada es:

$$Z = R_F + j \left(\omega L_F - \frac{1}{\omega C_F} \right) \tag{7}$$

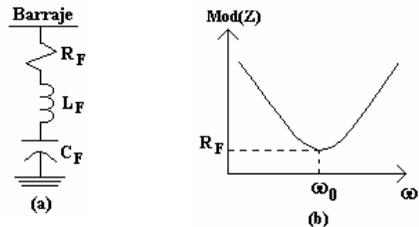


Figura 2. (a) Filtro sintonizado simple, (b) comportamiento en frecuencia.

2.1.2. Filtros Pasa Altos. Son utilizados para eliminar un amplio rango de frecuencias, y se emplean cuando las armónicas no tienen frecuencia fija. Los parámetros se calculan con las ecuaciones (1) ~ (6), ver referencias [1], [9].

La impedancia de este filtro viene dada por:

$$Z = \frac{1}{j\omega C_F} + \left(\frac{1}{R_F} + \frac{1}{j\omega L_F} \right)^{-1} \tag{8}$$

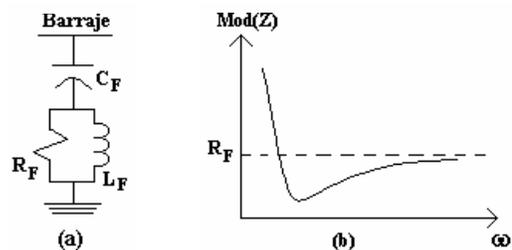


Figura 3. (a) Filtro pasa alto, (b) comportamiento en frecuencia.

Este filtro, al igual que el sintonizado simple, se sintoniza a alguna frecuencia específica; pero debido a que posee una característica amortiguada producto de la resistencia en paralelo con la inductancia, presenta una baja impedancia para la frecuencia de sintonía y superiores a ésta. O sea que, absorbe corrientes armónicas -si existen- de frecuencias desde la de sintonía en adelante. Para frecuencias menores a la sintonía, el filtro presenta impedancias altas. El factor de calidad de este filtro es bajo (0.5-5), ver referencias [1], [9], y al igual que el sintonizado simple, controla la característica de la impedancia.

Ventajas:

- Atenúa un amplio espectro de frecuencias armónicas de acuerdo a la elección del valor de la

resistencia, sin la necesidad de subdivisión en ramas paralelas.

- Es muy robusto frente a problemas de pérdida de sintonía comparado con el filtro sintonizado simple.

Desventajas:

- Origina una frecuencia de resonancia paralela al interactuar con la red.
- Las pérdidas en la resistencia y en el inductor son generalmente altas.
- Para alcanzar un nivel similar de filtrado (de una armónica específica), que el sintonizado simple, el filtro pasa altos necesita ser diseñado para una mayor potencia reactiva.

2.2. SELECCIÓN DE FILTROS PASIVOS [1], [9].

La utilización de un filtro como solución al problema de armónicos requiere de un análisis detallado de la respuesta en frecuencia del sistema. Entre los criterios de selección del filtro se tienen los siguientes:

2.2.1. El número de armónicos del sistema a atenuar. Dependiendo del número de armónicos existentes en el sistema, se puede determinar la cantidad de filtros (filtro sintonizado o dual) que se podrían ubicar para obtener una atenuación de las componentes armónicas. Esta minimización debe estar acorde con los límites establecidos por las normas.

2.2.2. Los requerimientos del filtro. Se hace referencia a la acción correctiva que se desee del filtro (compensación de reactivos, reducción de la distorsión armónica, regulación de tensión o todos). Cada requerimiento del filtro implica un diseño específico, tal que el objetivo para el cual se quiere se cumpla.

2.2.3. La energía de cada armónico. La magnitud de cada armónico está directamente relacionada con las pérdidas que estas componentes armónicas ocasionan en el sistema de potencia.

2.3. UBICACIÓN DE FILTROS PASIVOS.

Existen dos opciones para ubicar un filtro pasivo para armónicos (ver Figura 4):

- El alimentador de media tensión con el fin de disminuir las pérdidas del sistema.
- Cerca de la carga no lineal (baja tensión), para evitar la inyección de componentes armónicas de corriente al sistema por parte de la carga.

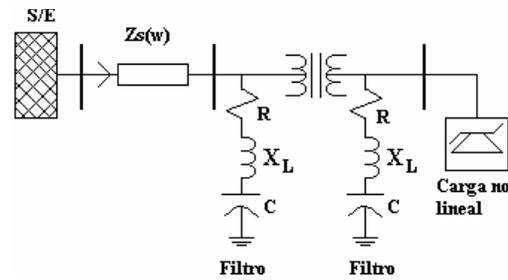


Figura 4. Posibles ubicaciones de los filtros pasivos.

Los criterios de ubicación del filtro son:

2.3.1. La existencia de cargas altamente contaminantes. Se debe ubicar el filtro en el lado de baja tensión; de esta forma el transformador de potencia sirve de amortiguador (aislante de armónicos) tanto de las corrientes armónicas provenientes de otras cargas como de las corrientes armónicas generada por la carga, lográndose aislar el problema.

2.3.2. La existencia de cargas armónicas distribuidas. Los filtros deben ser ubicados en media tensión y en **lugares estratégicos (óptimos)** para evitar la excesiva circulación de corrientes armónicas por el sistema.

2.4. PROBLEMAS DE LOS FILTROS

Uno de los mayores problemas de los filtros es que se produzca la desintonía de éstos. Los cuatro eventos más comunes que pueden dar como resultado una desintonización del filtro son:

- Deterioro de los condensadores, lo cual disminuye la capacitancia total y con esto aumenta la frecuencia a la cual el filtro fue sintonizado.
- Tolerancia de fabricación tanto en el reactor como en los condensadores.
- Variación de temperatura.
- Variación en el sistema.

Típicamente, los filtros se sintonizan aproximadamente entre un 3% y un 10% por debajo de la frecuencia deseada, ver referencias[1], [2], [7] y [9]. Esto para tener la opción de una buena operación del filtro en un rango mayor de tiempo de vida útil.

De los cuatro eventos mencionados anteriormente los tres primeros tienen que ver con variaciones propias de los elementos constitutivos de los filtros, mientras que el último depende de las variaciones del equivalente del sistema.

3. SISTEMA DE PRUEBA

Se considerará el sistema de distribución de energía eléctrica de la ciudad de Pereira de 17 nodos, 9 líneas y 13 transformadores. En la tabla 1 se muestran las

inyecciones de corriente armónica asumidas para los barrajes de 13.2kV y 33-115kV [1].

COMENTARIO:

[1] ARISTIZABAL NARANJO, Marcelo y RIOS PORRAS, Carlos Alberto. "MODELAMIENTO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS Y EMPLEO DEL SOFTWARE DIGSILENT POWER FACTORY EN EL ANÁLISIS DE ARMÓNICOS". Capítulo VI. Universidad Tecnológica de Pereira. 2001.

En los barrajes de 13.2 kV de Centro, Ventorrillo, Cuba y Dosquebradas se supone la compensación con bancos de condensadores.

Tabla 1. Inyecciones de corriente al nivel de 13.2kV y 33kV – 115kV.

| | 13.2 kV | 33 kV – 115 kV |
|----|---------------------------------|---------------------------------|
| h | %I _h /I ₁ | %I _h /I ₁ |
| 5 | 17.46 | 0.5 |
| 7 | 9.92 | 1.85 |
| 11 | 7.15 | 1.15 |
| 13 | 5.92 | 1.63 |
| 17 | 3.53 | 1.13 |
| 19 | 3.05 | 1.04 |
| 23 | 1.49 | 0.86 |

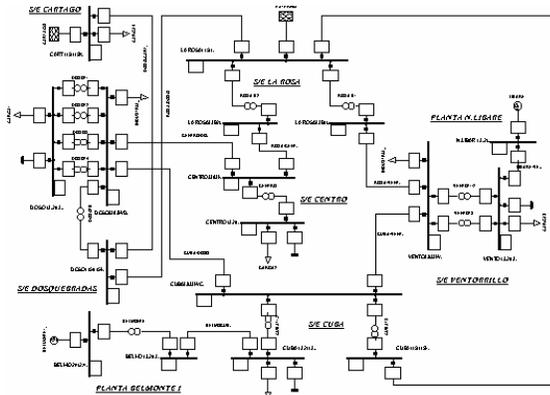


Figura 5. Topología del sistema eléctrico de Pereira.

El análisis de este sistema se descompone en dos partes:
 (1) Análisis del sistema bajo condiciones de operación y
 (2) empleo de filtros.

(1) Análisis del sistema. Para efectos comparativos se determina la impedancia equivalente y la onda de tensión en algunas barras del sistema considerando dos situaciones:

- Cargas al 100% y compensación de potencia reactiva a través de bancos de condensadores al 100%.

- Cargas a 33 kV y 115 kV al 100%, cargas a 13.2 kV y compensación de potencia reactiva al 50%.

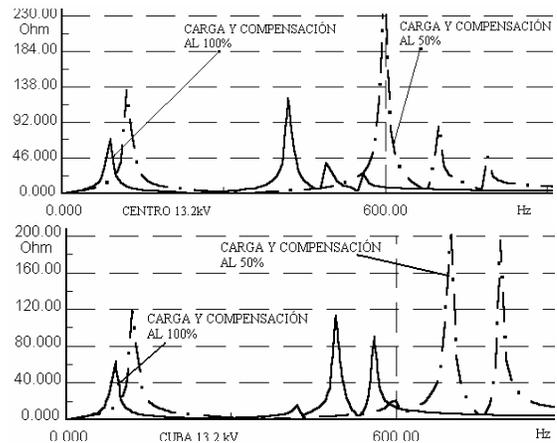


Figura 6. Impedancia vista en barras de 13.2 kV

Las simulaciones muestran que, cuando el sistema de distribución está a plena carga y la compensación de reactivos está al 100%, se presentan resonancias paralelo y serie con unas frecuencias de sintonía peligrosamente próximas a la frecuencia fundamental; también, a medida que disminuye la cargabilidad del sistema las resonancias paralelo se alejan de la fundamental pero presentan unos picos muy elevados que son igualmente peligrosos

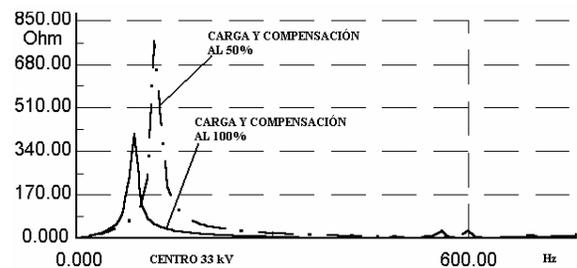
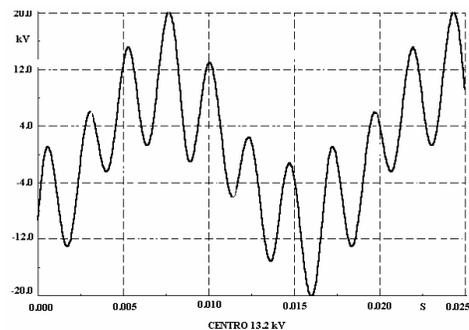


Figura 7. Impedancia vista en una barra de 33 kV.



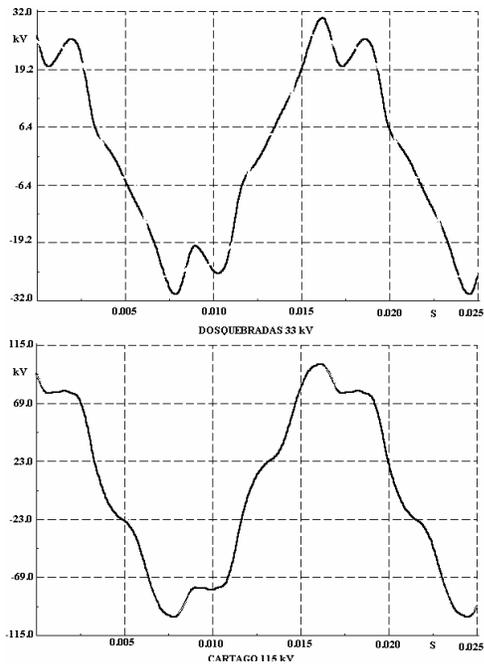


Figura 8. Ondas de tensión en tres barras de 13.2, 33 y 115 kV.

Para el voltaje, el comportamiento más distorsionado se presenta en las barras que están a un nivel de 13.2 kV, puesto que a estas se conectan cargas con un mayor grado de componentes armónicas. Las cargas conectadas a 33 kV y 115 kV poseen componentes armónicas en menor magnitud y por lo tanto su distorsión es menor, se debe resaltar que los transformadores sirven de barrera para algunas componentes armónicas y por eso resultan atenuados a elevados niveles de tensión.

(2) Empleo de filtros. Los bancos de condensadores ubicados en los barrajes de 13.2 kV de Centro, Ventorrillo, Cuba y Dosquebradas, se reemplazan por filtros sintonizados simples para eliminar solamente la quinta componente armónica.

Los parámetros de cada filtro se obtienen de aplicar las ecuaciones (1) ~ (6):

$$h = 5, C = 76.12\mu F, L_F = 3.70mH, R_F = 0.12\Omega, Q = 60$$

El comportamiento del sistema se ilustra en las siguientes figuras:

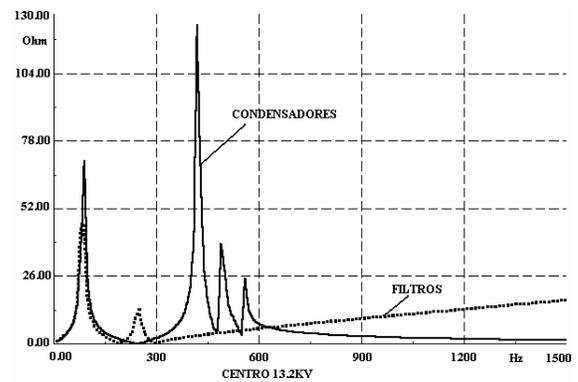


Figura 9. Impedancia vista en barras de 13.2 kV.

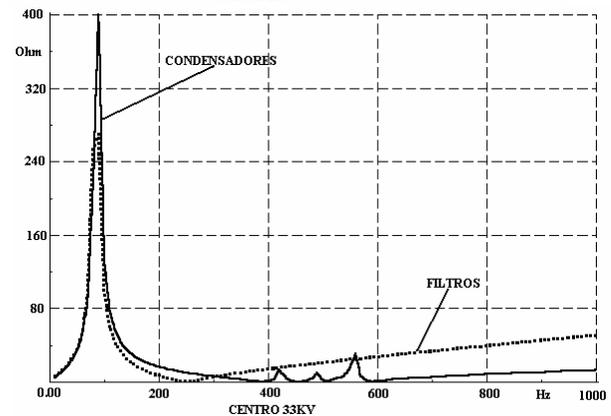
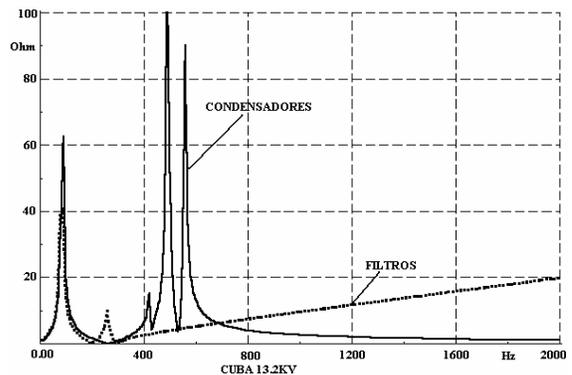


Figura 10. Impedancia vista en una barra de 33kV.

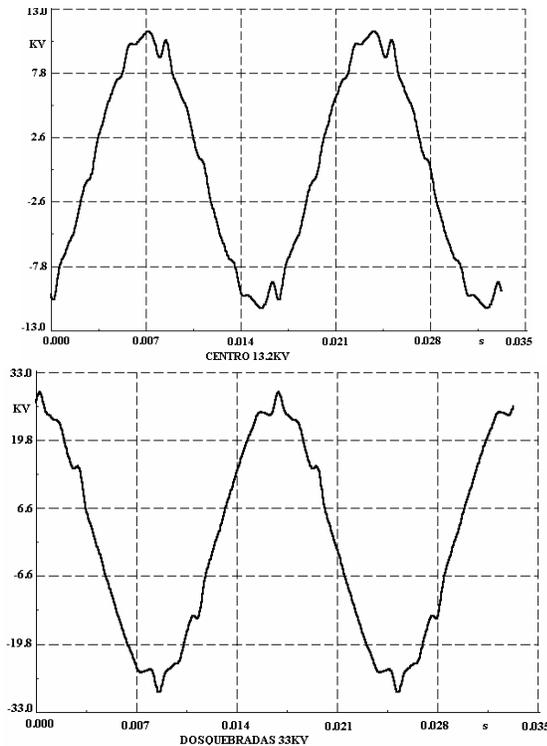


Figura 11. Ondas de tensión en barras de 13.2, 33 kV.

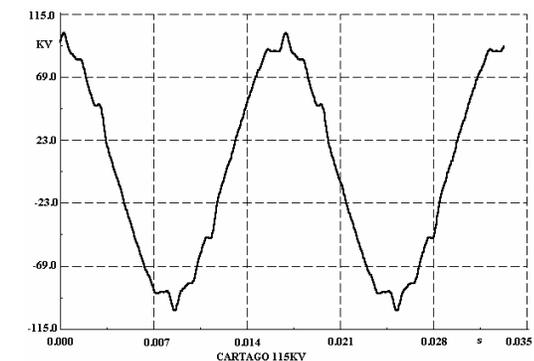


Figura 12. Ondas de tensión en una barra 115 kV.

Los filtros se presentan como una de las mejores alternativas para mitigar la polución armónica, pero antes de proceder a instalarlos se deben realizar una gran cantidad de estudios para determinar cuál es la mejor configuración y qué problemas adicionales introducen en el sistema eléctrico.

4. CONCLUSIONES

- ◆ El filtro sintonizado simple proporciona una máxima atenuación para una armónica individual, a frecuencia fundamental, puede proporcionar la potencia reactiva requerida en la red, y tiene bajas pérdidas (asociadas a la reactancia del inductor y la resistencia del filtro).
- ◆ El filtro sintonizado simple es vulnerable a la desintonía debido a la tolerancia de los elementos con la temperatura, interactúa con la red originando una resonancia paralela al igual que un banco de condensadores.

- ◆ El crecimiento sostenido de cargas no lineales, unido al aumento de la utilización de bancos de condensadores para la compensación del factor de potencia, aumenta las fuentes de distorsión o sus componentes negativas, tanto para el usuario como para la empresa responsable del suministro eléctrico.
- ◆ La magnitud de los costos originados por la operación de sistemas y equipos eléctricos con tensiones y corrientes distorsionadas aumenta en la medida en que se reduce la vida útil de estos.
- ◆ Las resonancias crean tensiones y corrientes elevadas que deterioran o destruyen los elementos del sistema

5. AGRADECIMIENTOS

El grupo de investigación en **Planeamiento de Sistemas Eléctricos** agradece a la Universidad Tecnológica de Pereira por el apoyo prestado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ARISTIZABAL Naranjo, Marcelo y RIOS Porras, Carlos Alberto. "Modelamiento de Sistemas Eléctricos y Empleo del Software Digsilent Power Factory en el Análisis de Armónicos". Capítulo VI. Universidad Tecnológica de Pereira. 2001, tesis de pregrado FIE.
- [2] ARRILLAGA, Jos et al. "Power Systems Harmonic Analysis". University of Canterbury, Christchurch, New Zeland: Jhon Wiley & Sons, 1997.
- [3] ARRILLAGA, J and SMITH, B.C. "Power Flow Constrained Harmonic Analysis in AC-DC Power Systems". IEEE Transactions on Power Systems, Vol 14, No. 4, November 1999.
- [4] CZARNECKI, Leszek S. "What is Wrong with the Budeanu Concept of Reactive and Distortion Power and why it Should be Abandoned". IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT. VOL. IM.-36, NO. 3, SEPTEMBER 1987. PAG. 864.
- [6] OLIVEIRA, José Carlos De et al. "Cargas Eléctricas Especiais". Capitulo I a VI. Universidade Federa-De Uberlândia Departamento De Engharia Elétrica, 1998.
- [7] OLIVEIRA, Luis Carlos De. "Harmônicas Em Sistemas Elétricos De Potência". Universidade Estadual Paulista "Julio De Mesquita Filho". Facultad De Engenharia De Ilha Solteira. Departamento De Engenharia Elétrica, 1994.
- [8] PASCHOARELLI Junior, Dionizio. "Avaliação de Distorções Harmônicas Utilizado-Se Computadores de Pequeno Porte". Faculdade de Engenharia Elétrica. Faculdade de Sistemas e Control de Energia. Universidade Estadual de Campinas.
- [9] USTARIZ, Armando Jaime y ORDÓÑEZ Plata, Gabriel. "Criterios de Selección, Ubicación y Diseño de Filtros Pasivos para la Atenuación de Armónicos en Sistemas de Distribución". Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.