

# REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA Y MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ONDA DE TENSIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

---

JOHANN F. PETIT

*Profesor Escuela de Ingenierías Eléctrica,  
Electrónica y de Telecomunicaciones  
Universidad Industrial de Santander  
jfpetit@uis.edu.co*

GILBERTO CARRILLO

*Profesor Escuela de Ingenierías Eléctrica,  
Electrónica y de Telecomunicaciones  
Universidad Industrial de Santander  
gilberto@uis.edu.co*

## RESUMEN

*Este artículo presenta un método que permite disminuir las pérdidas de potencia activa del sistema y mejorar la calidad del servicio de energía eléctrica mediante la ubicación y el dimensionamiento óptimo de filtros pasivos (predeterminados) en sistemas de distribución en presencia de armónicos; esto incluye la viabilidad del uso del condensador para la compensación. El análisis está basado en los modelos matemáticos existentes para representar cada una de las componentes del sistema y se considera el carácter discreto en la elección del tipo de filtro.*

**PALABRAS CLAVE:** Power Quality, compensación, condensadores, filtros, armónicos.

## INTRODUCCIÓN

En el tema de reducción de pérdidas, se han las siguientes estrategias de corto y largo plazo: tales como la reconfiguración de alimentadores de distribución, la compensación de la potencia reactiva y la reconductorización.

La compensación, tema prioritario en este trabajo, se planteaba asumiendo una característica inductiva y lineal del sistema y de la carga, es decir, la compensación se centraba en reducir el transporte de potencia magnetizante, conocida comúnmente como potencia reactiva. Es así como, el condensador (generador de reactivos) se convirtió en el principal elemento para la compensación.

Hoy en día, y dado el gran giro que ha tenido la composición de la carga, al pasar de una composición lineal a una altamente no lineal (generadora de señales a otras frecuencias y causa principal de la distorsión en las señales de tensión y corriente), es necesario entrar a reformular

el problema de localización y dimensionamiento del condensador, de tal forma que se determine hasta que punto es viable su utilización como dispositivo de compensación y en que momento debe recurrirse a la utilización de otro tipo de compensador; en este caso, el compensador debe mejorar la respuesta en frecuencia del condensador. Adicionalmente, esta reformulación debe considerar múltiples cargas no lineales distribuidas por todo el sistema eléctrico [Carrillo & Petit, 2000], [Petit, 2000].

## FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Se dice que una señal de tensión o de corriente contiene armónicos, cuando se puede descomponer en una suma de señales senoidales de diferentes frecuencias (Series de Fourier). Estas frecuencias corresponden entonces, a múltiplos enteros de la frecuencia normal de trabajo (50 o 60 Hz), que de ahora en adelante se llamará frecuencia fundamental.

Se dice que una carga no-lineal a diferencia de una carga lineal genera armónicos debido a que implicará la existencia de una corriente ( $i_g$ ) con un contenido de frecuencias diferentes a las existentes en la tensión aplicada, esto es, genera esas corrientes.

Al circular estas corrientes armónicas por el sistema, generan pérdidas por efecto térmico y ocasionan caídas de tensión armónicas desmejorando entonces, la calidad de suministro de energía eléctrica (ver Figura 1).

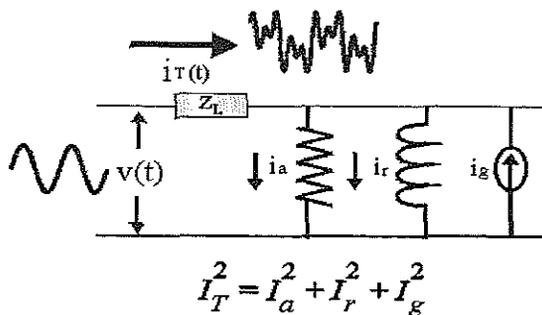


Figura 1. Componentes de la corriente total de una carga no-lineal monofásica.

Adicionalmente, si se tiene en cuenta que el transporte óptimo de energía se obtiene cuando se transporta sólo la componente de corriente asociada a la potencia activa, se puede concluir que toda componente de corriente que no sea activa es indeseable, ya que aumenta el valor eficaz de la corriente y por ende, introduce una caída adicional de tensión y un incremento en las pérdidas por transporte.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema considerado se toma bajo el siguiente marco de referencia:

- Tensión en la subestación senoidal y cargas no lineales
- Sistema balanceado y estado estable
- Compensación en el mismo nivel de tensión

Bajo estas condiciones la potencia aparente demandada por la subestación está dada por [Petit, 2000]:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (1)$$

donde:

$I_a, P$ : Corriente activa y Potencia Activa

$I_r, Q_r$ : Corriente magnetizante y Potencia Magnetizante

$I_g, D_g$ : Corriente generada y Potencia Generada

Por lo tanto, si se analiza la ecuación (1) y la figura 2, y se tiene en cuenta que el aumento de la potencia reactiva tiene origen en las cargas, la problemática se puede descomponer en los siguientes dos subproblemas:

- Transporte de reactivos a frecuencia fundamental.
- Inyección de armónicos.

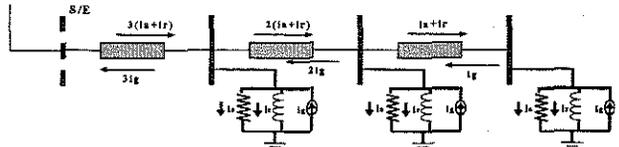


Figura 2. Circulación de corrientes por el sistema.

Para la solución de estos subproblemas, se podrían adoptar las siguientes estrategias:

1. Solución a nivel de diseño de la carga.
2. Solución a nivel de usuario.
3. Solución a nivel de sistema.

Estas estrategias están ordenadas jerárquicamente, de tal forma que, inicialmente se solucionan situaciones particulares y luego generales. Como el cumplimiento de las dos primeras estrategias no se puede llevar a un nivel de error de cero, se establecen unos rangos permisibles a nivel de carga y usuario. Esto implica que al usuario se le permite una cierta contaminación del sistema, que si se acumula con los otros usuarios puede exigir el cumplimiento de la estrategia 3. Este es el marco del presente trabajo.

Otro aspecto corresponde al concerniente con el tipo de compensador. Éste debe caracterizarse por suministrar, reactivos a frecuencia fundamental y servir de sumidero a las corrientes armónicas, evitando que circulen por el sistema. Estas características en frecuencia (más o menos acentuadas) se pueden obtener a partir de combinaciones del compensador tradicional (condensador) con inductancias (L), y se conocen con el nombre de filtros pasivos. Lo anterior sumado al bajo costo y fácil implantación de los filtros pasivos es sin duda alguna la mejor carta de presentación para su utilización.

## VIABILIDAD DEL USO DEL CONDENSADOR

Debido a que se plantea dar solución a un sistema de distribución, el subproblema de reactivos se convierte en el clásico problema de localización óptima de condensadores, en donde éstos se vuelven fuentes

generadoras de reactivos. Con ello se evita su transporte desde la subestación hasta la carga y sus consecuencias en caídas de tensión y pérdidas. Nótese que, el subproblema de inyección de armónicos debe ubicar y distribuir una serie de recursos de baja impedancia a ciertas frecuencias a lo largo del sistema, de tal forma que además de atrapar las corrientes inyectadas, se evite su circulación por el sistema y se le ofrezca a cada nodo de compensación un nivel de referencia en tensión muy bajo, disminuyendo así las tensiones armónicas en el resto de nodos (ver Figura 3).

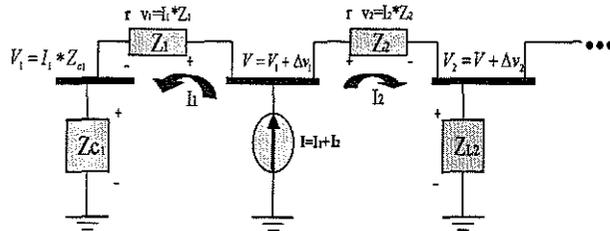


Figura 3. Efecto del compensador en el sistema.

A continuación se analizará el comportamiento de las topologías propuestas y la viabilidad para la solución del problema planteado.

### USO DEL CONDENSADOR (FILTRO DE PRIMER ORDEN)

La utilización del condensador como compensador, es debido entre otras cosas a:

- ◆ Es un recurso disponible en las empresas.
- ◆ Es económico.
- ◆ Sus necesidades de protección y control son menos exigentes que la de un filtro de orden mayor.
- ◆ Puede servir de solución temporal o provisional (corto plazo), como parte de un proceso a largo plazo.

### RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL CONDENSADOR

El condensador es un excelente filtro pasa altos, es decir, a frecuencias altas ofrece una baja impedancia. Esto quiere decir que al colocarlo en paralelo con la carga puede atrapar corrientes de altas frecuencias mientras que deja pasar las corrientes de baja frecuencia.

Sin embargo como se observa en la Figura 4 y la reducción de la impedancia del condensador también se

puede obtener aumentado el valor de la capacitancia. El problema radica entonces, en que los dos subproblemas planteados, el de distorsión armónica y el de reactiva, tienen soluciones contrarias, en ocasiones. Mientras que para el subproblema de inyección de armónicos es bueno tener valores muy altos de condensadores, para el subproblema de reactivos no debe superar un cierto valor pues estaría asociado a sobretensiones (a la frecuencia fundamental).

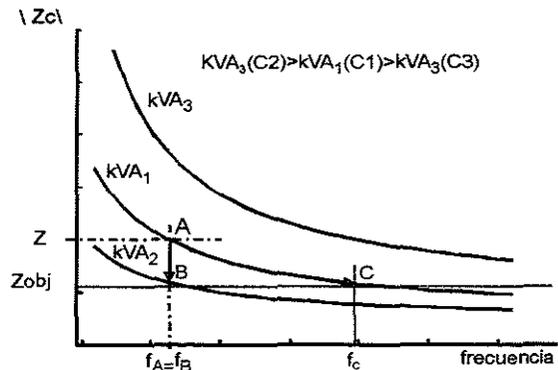


Figura 4. Respuesta en frecuencia del condensador.

Por lo tanto, es de esperar que para encontrar una solución óptima se debe establecer una especie de compromiso de beneficio global.

Por otro lado, el condensador interactúa con el sistema y la carga, estando sometido por tanto, a posibles resonancias serie y paralelo [Ordoñez et al, 2000].

### POSIBLES SOLUCIONES

Si se tienen en cuenta las observaciones dadas en el numeral anterior, se puede concluir que la compensación con condensadores debe permitir el análisis de:

- ◆ Cambiar los tamaños de los condensadores.
- ◆ Mover los condensadores a punto diferentes del sistema.
- ◆ Quitar los condensadores

Cambiar tamaño y mover condensadores considerando todas las alternativas, es una tarea casi interminable para sistemas grandes, por lo cual es necesario recurrir a técnicas de optimización.

## USO DEL FILTRO SINTONIZADO (SEGUNDO ORDEN)

El filtro de sintonía (Notch) está compuesto de un arreglo serie condensador-bobina, caracterizado por ofrecer una impedancia muy baja a una frecuencia determinada (frecuencia de sintonía). Con este arreglo se logra dividir la respuesta en frecuencia del filtro en cuatro zonas a saber (ver figura 13):

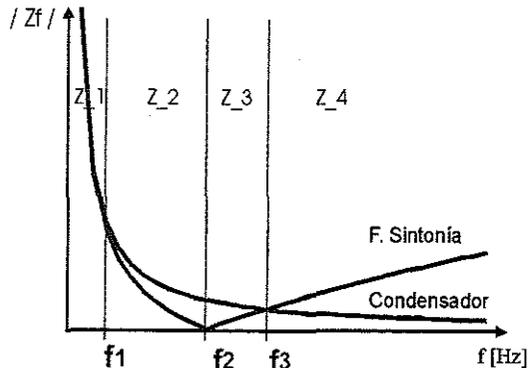


Figura 5. Comparación entre la respuesta en frecuencia del condensador y el filtro de sintonía.

Como se observa, las zonas que ofrecen las mejores características en impedancia a cada tipo de compensador son:

- ♦ Zonas 2, 3: filtro de sintonía
- ♦ Zona 4: condensador
- ♦ Zona 1: indiferente (técnicamente, más no económicamente)

## MODELADO DEL SISTEMA

Cada componente del sistema se representa matemáticamente por modelos que se aproximan a su comportamiento físico. Dentro de las componentes del sistema se encuentran las líneas, los condensadores, transformadores, cargas, etc.

### SUBESTACIÓN

Esta componente corresponde a la fuente del sistema de distribución; la barra de la subestación se considera como una barra infinita (1 pu) en serie con la impedancia de cortocircuito del sistema (ver Figura 6).

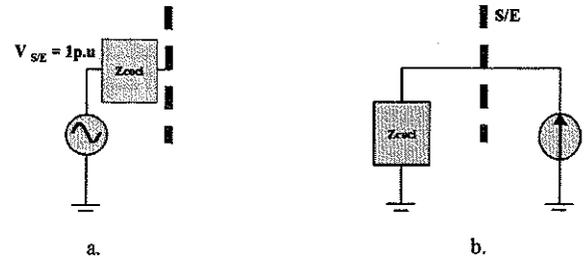


Figura 6. Modelo de la subestación. a. frecuencia fundamental, b. otras frecuencias.

## LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN

La línea de distribución se modela como una línea de longitud media, y se tiene en cuenta la dependencia con la frecuencia de cada componente..

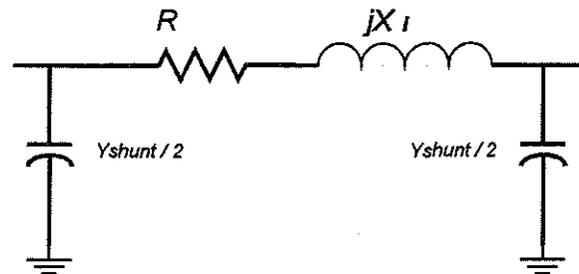


Figura 7. Modelo pi de la línea.

## CARGA

A continuación se describen las partes que componen una carga no-lineal:

### PARTE LINEAL

Se considera como la parte lineal o pasiva de la carga, a la componente que demanda un consumo básico de potencias activa y de magnetización. Este comportamiento puede modelarse a frecuencia fundamental como un consumo tipo: Potencia, Admitancia o Corriente constante.

### MODELO DE CARGA NO LINEAL

La carga no lineal de cualquier barra se modela como una fuente de corriente armónica constante (ver Figura 8.a). Cuando las cargas están compuestas de una parte lineal y otra no lineal, el modelo se representa con una admitancia (parte lineal) en paralelo y con una fuente de corriente armónica (parte no lineal) constante inyectada a la barra (ver Figura 8.b).

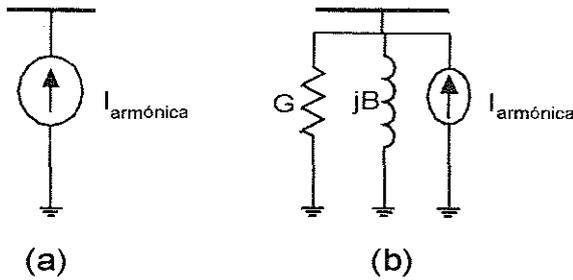


Figura 8. Representación de carga no lineal y compuesta (lineal y no lineal).

**COMPENSADORES**

Como fué establecido, los compensadores a utilizar son algunas topologías de filtros pasivos, en especial se considerarán el condensador como pasa altos y el filtro sintonizado o en inglés "Notch" por ser los más recomendados para la solución de este tipo de problemas.

**FLUJO DE CARGA ARMÓNICO**

Una vez modelado el sistema, es posible establecer pautas para estimar las tensiones en los diferentes puntos de la red y las corrientes que fluyen por todos los elementos del sistema. Se denomina flujo de cargas al estudio que permite determinar el estado estable de un sistema en particular.

**ANÁLISIS A FRECUENCIA FUNDAMENTAL**

En vista que la relación tensión-corriente de algunos de los modelos de carga no es lineal, es necesario establecer un flujo de carga iterativo. En consecuencia se utiliza el método de Gauss-Seidel topológicamente orientado desarrollado en la referencia [Carrillo & Pérez, 2000] y adaptado para el flujo de carga con armónicos en la referencia [Petit, 2000].

**ANÁLISIS A FRECUENCIAS ARMÓNICAS**

El flujo de carga desarrollado se basa en la inyección de corrientes armónicas y en la utilización de la matriz de admitancia del sistema. Con este flujo se obtiene el vector de tensiones armónicas, esto es:

$$[V^h] = [Y^h]^{-1} [I_B^h] \tag{2}$$

El flujo de carga se debe desarrollar para cada armónico. Para el cálculo del valor RMS de voltaje en el nodo i se recurre al principio de superposición, es decir:

$$V_{RMS_i} = \sqrt{(V_{RMS_i}^1)^2 + \left(\sum_{h=1}^{\infty} V_{RMS_i}^h\right)^2} \dots(3)$$

**PÉRDIDAS DE POTENCIA**

Las pérdidas de potencia activa del sistema están dadas por la expresión:

$$F.O = \sum_{h=1}^N P^h \tag{4}$$

Donde

F.O: Pérdidas totales de potencia activa del sistema

P<sup>h</sup>: Pérdidas de potencia activa del sistema para las frecuencias de interés (incluye la fundamental h=1).

**METODOLOGÍA DE COMPENSACIÓN**

Retomando las observaciones dadas, el problema propuesto se puede dividir en los siguientes subproblemas: reactivos a frecuencia fundamental e inyección de armónicos, y para su solución se debe utilizar un mismo compensador.

Este compensador debe ubicarse dentro de la categoría de los filtros pasivos y como tales, éstos tienen una infinidad de topologías y variables asociadas. Para ello se acota el problema por medio de topologías de filtros previamente establecidas ("filtros predeterminados").

La metodología de compensación se debe caracterizar por utilizar el condensador cuando es viable o remplazarlo por un filtro de sintonía cuando no lo es. Por otro lado en la aplicación de un filtro de sintonía se debe escoger un rango de frecuencias que justifiquen su instalación en lugar del condensador. Una vez obtenido el rango de frecuencias de sintonía de los filtros a ubicar en el sistema y partiendo de la localización y requerimientos de reactivos se obtiene una solución sólo con condensadores, y luego a partir de ella se considerarán la localización y el dimensionamiento de los condensadores, para hacer el análisis con los filtros. A continuación se especifican los pasos a seguir de la metodología de compensación y en la siguiente sección se especificará el algoritmo de optimización.

**ALGORITMO DE COMPENSACIÓN**

Una vez identificado el problema y analizadas las características de los posibles compensadores, se establece la siguiente estrategia de compensación:

1. Establecimiento de la Función Objetivo: Valor eficaz de la corriente o Pérdidas de potencia totales del sistema (Fund+Armónicas).
2. Minimización de la función objetivo, siendo la variable de decisión el condensador.

$$\text{Min}_c [F.O] \quad (5)$$

Siendo C los tamaños discretos de bancos de condensadores disponibles en el mercado.

3. Establecimiento del tipo de filtro y de las frecuencias de sintonía.

Si se llega a esta fase es por que no se obtuvo una solución satisfactoria con sólo condensadores y por lo tanto se escogerá un filtro sintonizado.

El número de filtros a considerar está dado por el número de barras con compensación capacitiva, mientras que las frecuencias de sintonía están asociadas a las frecuencias que conllevan las mayores pérdidas del sistema.

4. Minimización de la función objetivo, siendo la variable de decisión el tipo de filtro, (F0, F1...). Teniendo la ubicación, los reactivos fundamentales y el rango de sintonías de los filtros, el problema consiste en escoger cual es la sintonía óptima en cada nodo de compensación. Para lo cual se le asigna a cada sintonía un número, es decir: Filtro 0 (F0): Sólo condensador, Filtro 1 (F1): Filtro sintonizado a la frecuencia asociada a las mayores pérdidas totales ocurridas con la compensación capacitiva, Filtro 2 (F2): Filtro sintonizado a la frecuencia que obtuvo el segundo lugar en cuanto a mayores pérdidas totales ocurridas con la compensación capacitiva. Etc...

$$\text{Min}_{\text{TIPO DE FILTRO}} [F.O] \quad (6)$$

### MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN

A medida que aparecen nuevos componentes en un filtro y aumenta el número de posibles nodos de compensación, la dimensión del problema crece exponencialmente y por ende, encontrar una solución óptima en un tiempo finito es casi imposible. De ahí que surja la necesidad de establecer un método de optimización que permita encontrar una solución en un tiempo razonable. Esto se puede lograr mediante técnicas de programación no-lineal o mediante técnicas de inteligencia artificial, o mediante técnicas heurísticas.

El algoritmo a utilizar consiste en una adaptación del método utilizado en la referencia [Carrillo & Perez, 2000],

y consiste en la evaluación de configuraciones que nacen de cambios unitarios de configuraciones previamente evaluadas (permutación), y establece una búsqueda organizada siguiendo la lógica "primero el mejor".

### APLICACIÓN

Una vez planteada la metodología de compensación, se hace necesario demostrar su validez mediante diferentes tipos de simulaciones, para ello, en esta sección se aplicará el método.

### DATOS DEL PROBLEMA

El ejemplo es tomado de la referencia [Petit, 2000] y consiste en un alimentador de distribución real a 13.2 kV.

#### Consideraciones:

- Cargas no lineales en todos los nodos (convertidores de 6 pulsos que generaran armónicos de orden: 5,7,11,13,...).  $I_h = I_1/h$
- Los valores base del sistema son:  $V_b = 13,2 \text{ kV}$  y  $S_b = 2 \text{ MVA}$
- El transformador es de 34,5/13,2 kV, 2 MVA.  $Z_s = j0,05 \text{ p.u.}$
- Los tamaños discretos de condensadores varían de: 200 a 1300 kVA trifásicos.
- Los tipos de filtros: **F0**: Condensador, **F1**: filtro sintonizado al orden 5, **F2**: filtro sintonizado al orden 7, **F3**: filtro sintonizado al orden 11, **F4**: filtro sintonizado al orden 13.
- El factor de calidad de los filtros tiene un valor mínimo de 150. Y La constante que afecta el efecto piel es igual a:  $\exp = 0,5$ .

### CASOS

Para un correcto entendimiento de la metodología se realizará la búsqueda de la solución mediante la subdivisión del problema en los siguientes casos:

- **Caso 1:** caso base, es decir, sin compensación.
- **Caso 2:** Compensación con condensadores a frecuencia fundamental.
- **Caso 3:** Compensación con condensadores (Fund+Armónicos).
- **Caso 4:** Compensación con filtros predeterminados.

## RESULTADOS GENERALES

Se utiliza el desarrollo computacional MCPF v1.0 desarrollado en la referencia [Petit, 2000] para evaluar las condiciones del sistema y para aplicar la metodología de compensación. Los resultados más relevantes de estas simulaciones se muestran a continuación:

### Cuadros comparativos

Tabla 1. Tabla comparativa de pérdidas por armónicos [W].

<i>n</i>	Caso (1)	Caso (2)	Caso (3)	Caso (4)
1	16125	11757	16643	11789
5	4313,2	79620,7	4192,6	557,36
7	3319,7	7998,6	443,8	440,21
11	2410,1	284,06	102,4	396,08
13	2158,3	115,1	83,03	399,34
Tot	28326	99776	21464	13582

Tabla 2. Tabla comparativa de tensiones y distorsiones.

Indicador	C 1	C 2	C 3	C 4
DATv[%] Máx	12,28	28,16	6,7	3,5
DATv[%] Min	11,34	26,19	6,6	3,13

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

**Caso 1**, el hecho de tener componentes armónicas en el sistema puede aumentar significativamente por un lado los niveles de distorsión y por otro lado las pérdidas totales de potencia.

**Caso 2**, con este tipo de compensación los resultados son muy buenos para frecuencia fundamental, pero muy malos para las frecuencia armónicas, en este caso el remedio, resultó peor que la enfermedad.

**Caso 3**, la respuesta teniendo en cuenta todas las componentes armónicas difiere de la compensación obtenida en el caso 2. Se observa que globalmente la compensación es mejor.

**Caso 4**. Una vez se llega a esta etapa es por que la compensación capacitiva no es suficiente. Es así como con la utilización de los filtros seleccionados, se obtienen los mejores resultados

- Compensar un sistema de distribución bajo condiciones armónicas pensando solamente en la compensación de potencia reactiva fundamental puede ser peligroso, pues, podría incrementar los niveles de distorsión armónica total de voltaje (DATv) y las pérdidas de potencia.
- Los buenos resultados obtenidos con la utilización de filtros de sintonía, radica en que estos se diseñan para entregar los kVAr necesarios para compensar la potencia magnetizante fundamental y además al sintonizarse a una frecuencia determinada se evita que corrientes generadas circulen por el sistema.

## REFERENCIAS

- [Carrillo & Petit, 2000]. Carrillo Caicedo G y Petit Suárez J. F. (2000) "Fictitious Power Compensation of Distribution Feeders" Large Engineering Systems Conference Series, Halifax, Canada, 2000.
- [Carrillo & Pérez, 2000]. J. Carrillo Caicedo G y Pérez Arriaga I. J. (2000) "Optimal Reconfiguration of Distribution Networks with a Heuristic Truncated Enumeration Algorithm" Large Engineering Systems Conference Series, Halifax, Canada
- [Gonzales & McCall, 87]. "Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems" IEEE Transactions on industry applications, Vol IA-23, No.3.
- [Ordoñez et al, 2000]. Gabriel Ordoñez, Gilberto Carrillo, Johann Petit, Armando Ustariz. Methodology for the fictitious power compensation of distribution feeders. . Conference on Harmonics and quality of power proceedings ICHQP2000. Orlando, Florida USA
- [Petit, 2000]. Petit Johann Farith "Armónicos en sistemas de distribución: Compensación de la potencia ficticia con filtros predeterminados" Proyecto de maestría dirigido por Gilberto Carrillo Caicedo. Universidad Industrial de Santander
- [Carrillo, 95], G. Carrillo, Explotación Óptima de la Distribución, Universidad Pontificia de Comillas Madrid, Tesis Doctoral, Madrid 1995.

## CONSIDERACIONES Y CONCLUSIONES

- La metodología de optimización propuesta presenta una alta eficiencia en la búsqueda de la mejor configuración.
- La metodología de compensación se convierte en una herramienta fundamental para que las empresas distribuidoras del país se ajusten a las necesidades regulatorias impuestas por el código de distribución.

## AUTORES

Johann Farith Petit Suárez. Ingeniero Electricista-UIS 1997, Distinción Tesis Laureada. Magister en Potencia Eléctrica UIS 2000. Investigador del Grupo GISEL-UIS-E3T. Áreas de trabajo: Análisis de sistemas de distribución, Calidad del suministro de energía eléctrica, Armónicos, Análisis de Sistemas de Potencia.

Gilberto Carrillo Caicedo. Ingeniero Electricista UIS 1978; Master of Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, 1981; Especialista Universitario en Técnicas de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia Comillas 1994; Doctor Ingeniero Industrial en Ingeniería Eléctrica, Universidad Pontificia Comillas de Madrid (España) 1995 con distinción Apto Cum Laude. Profesor Titular Laureado UIS; Registrado en el International Youth in Achievement. Premiado en el IEEE Stockholm Power Tech. Áreas de trabajo: Mercados de energía eléctrica, Servicios complementarios, Calidad del servicio, Armónicos.