

CONGRESO INTERNACIONAL DE DISTRIBUCION ELECTRICA CIDEL ARGENTINA 2002

EFFECTOS DE LAS ARMÓNICAS SOBRE EL DISEÑO DE REDES DE BAJA TENSIÓN

Pedro E. Issouribehere Gustavo A. Barbera
Instituto de Investigaciones Tecnológicas Para Redes y Equipos Eléctricos.
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

ARGENTINA

E- mail: iitree@ing.unlp.edu.ar

Palabras Clave

Armónicas. Adaptación. Red. Distribución.

1. INTRODUCCIÓN

El interés por la Calidad del Servicio Eléctrico se ha incrementado los últimos años debido a la modalidad adoptada en la reestructuración de los Servicios Eléctricos de numerosos países, en especial los de Latinoamérica. Los segmentos regulados, como la Distribución, se han otorgado en concesión basándose en tarifas fijas para los usuarios finales y estándares de la Calidad a cumplir en la prestación del Servicio.

Actualmente existe la preocupación, al menos en países como La Argentina, de vincular sobre bases más técnicas, la Calidad del Servicio pretendida con las correspondientes tarifas a fijar a los servicios.

Este artículo resume un aporte en ese sentido, en una de las perturbaciones de mayor importancia, las armónicas.

2. NORMAS DE CALIDAD DE SERVICIO

2.1 Encuadre de armónicas entre las Normas de Calidad de Servicio.

Con la denominación de Producto Técnico, según lo establecido en los Contratos de Concesión de La Argentina, se alude al Nivel de la tensión suministrada, ponderado en lapsos de tiempo típicos del seguimiento de la demanda en el sistema, y a las Perturbaciones de la forma de la onda – distorsión, frecuencia, variaciones rápidas del nivel y otras.

Las armónicas son unas de las Perturbaciones de mayor interés, y en especial en el enfoque de este artículo, dado que la magnitud del fenómeno está vinculado estrechamente al desarrollo de las redes.

2.2 Descripción de las Normas Argentinas.

Se basan en las normas IEC [1], adecuadamente adaptadas a los requerimientos de servicio público.

La Distribuidora debe cumplir con niveles de armónicas en la tensión en todos los puntos de suministro. Las reglas, procedimientos de control y el régimen de sanciones se fijan en los Contratos. [2] [3]

La Distribuidora puede exigir a los usuarios el cumplimiento de los límites de emisión establecidos, los que guardan relación con las normas mencionadas, asignando cuotas de emisión según las demandas y áreas de la red. [4]

3. GRADO ACTUAL DE CONTAMINACIÓN POR ARMÓNICAS DE LAS REDES EN LA ARGENTINA.

El control del fenómeno, realizado desde 1997 en el Área Metropolitana de Buenos Aires por el Ente Nacional Regulador de la Electricidad – ENRE –, da una amplia experiencia sobre la importancia real de las armónicas en las redes de distribución del país.

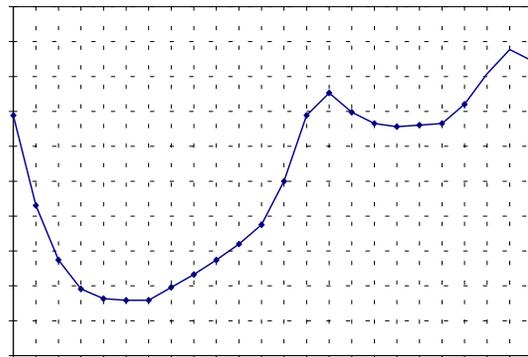


Fig. 1. Perfil de la TDT - armónicas - a lo largo del día.

En la Figura 1 se presenta, a manera de ejemplo, el perfil de la Tasa de Distorsión Total (TDT) a lo largo del día resultante del procesamiento de más de 11.000 mediciones semanales - y realizadas al azar en la red de BT - de armónicas.

Se observa similitud entre este perfil y la curva de carga de Usuarios Residenciales, lo que implicaría una fuerte contribución de éstos al fenómeno global.

También se ha encontrado que los niveles de contaminación armónica en redes de BT son inferiores a los de flicker.

Mayor información sobre el tema ha sido publicada con anterioridad. [5]

4. DISTRIBUCIÓN DE ARMÓNICAS EN LAS REDES DE BT.

A través de un modelo de red propuesto se obtendrá la contaminación armónica de la tensión esperable si todos los usuarios cumplen con los límites de emisión existentes en La Argentina. Estos resultados se compararán con los niveles que deben cumplir las Distribuidoras.

Sea el modelo circuital de la Fig. 2.

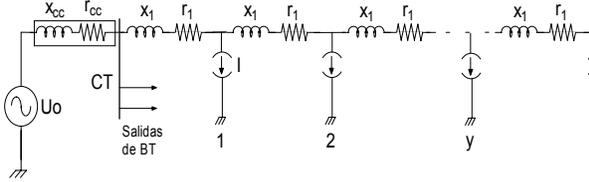


Fig. 2. Modelo para estudiar el efecto de las armónicas en el diseño de redes.

El análisis siguiente considera que:

- ✓ Cada usuario puede emitir armónicas según lo previsto en la Reglamentación [4].
- ✓ La Distribuidora debe cumplir con los límites de Reglamentación [3].

El desarrollo a continuación se particulariza para:

- Red trifásica con neutro rígidamente a tierra, que es normal en el país.
- Considerar para las cargas dos factores de Diversidad:
 - i) Diversidad en la demanda de energía.
 - ii) Diversidad en la emisión de armónicas.
- La red no tiene compensación capacitiva (tampoco los usuarios).
- Armónicas de secuencia + o - (no homopolares, para las cuales debería incluirse la impedancia de neutro).
- Considerar que no hay aporte de armónicas desde niveles superiores del sistema.

4.1 Tensiones armónicas en barras de BT del CT.

Para el modelo radial simple de la Fig. 2, la tensión armónica en el Centro de Transformación es:

$$\left[\frac{U_h}{U_{nom}} \right]_{CT} (\%) = f(h) \cdot x_{cc} (\Omega) \cdot k_a \cdot \left[\frac{\sum_1^n I_h(A)}{U_{nom}} \right] \cdot 100$$

Siendo:

$I_h(A)$: Corriente armónica de orden h , emitida por las cargas. Está limitada por [4].

$f(h)$: Factor de aumento de la reactancia con la frecuencia $f(h) \cong h$, para $(2 \leq h \leq 13)$

k_a : Efecto de compensación o diversidad entre emisiones, válido para superponer varias cargas.

$$k_a \cong 0,63 \dots \dots \dots 0,83, \text{ para } (0,5 < h \leq 10)$$

Además, siendo:

$$i(h) [\%] = \frac{I_h(A)}{I_D(A)} \cdot 100$$

Donde I_D es la corriente de Demanda de la carga.

La expresión anterior, queda:

$$u_{CT}(h) [\%] = f(h) \cdot x_{cc} (\Omega) \cdot k_a \cdot \frac{1}{U_{nom}} \sum I_D(A) \cdot i(h) [\%]$$

La que, por reemplazos, se transforma en:

$$u_{CT}(h) [\%] = f(h) \cdot k_a \cdot \frac{\sum_1^n P_D}{S_{cc}} \cdot i(h) [\%]$$

Por otra parte, teniendo en cuenta que:

$$S_{MT/BT} = F_D \cdot \sum_1^n P_D$$

La potencia del transformador tiene en cuenta el factor de diversidad de las cargas, F_D .

Se obtiene:

$$u_{CT}(h) [\%] = \frac{f(h) k_a}{F_D} \cdot \frac{S_{MT/BT}}{S_{cc}} \cdot i(h) [\%] \quad (1)$$

Esta es la expresión de la tensión armónica relativa esperable en bornes del CT en función de las corrientes admisibles a los usuarios servidos aguas abajo.

Por ejemplo: Caso de 5ª armónica

$$f(h) = 5; k_a = 1,0; F_D = 0,7$$

$$\frac{S_{MT/BT}}{S_{cc}} = \frac{1}{25}$$

Siendo: $i(5) \leq 12\%$ [Límite de [4] para Usuarios de Medianas Demandas (T2)].

Resulta: $u_{CT}(5) \leq 3,36\%$

Valor que es menor al límite del 6 % previsto en [3].

4.2 Tensiones armónicas aguas abajo del CT.

La tensión a frecuencia industrial, a lo largo de un distribuidor con carga uniforme, es:

$$U_y = U_0 - |\Delta U_n| \frac{2}{n^2} \left[ny - y \left(\frac{y-1}{2} \right) \right]$$

$$\text{con } |\Delta U_n| = (R \cos \varphi + X \operatorname{sen} \varphi) \frac{I_T}{2}$$

La tensión cae hacia la cola del alimentador con la ley indicada.

Las tensiones armónicas - desarrolladas por las corrientes armónicas producidas por las cargas y que fluyen hacia el CT - siguen la siguiente ley :

$$u_y(h)[\%] = u_{CT}(h)[\%] + r_1 \sqrt{1 + f(h)^2 q_1^2} \cdot k_a \cdot \frac{1}{U_{nom}} \cdot |I_h| \cdot \left[ny - y \frac{(y-1)}{2} \right] \cdot 100 [\%]$$

Expresión que es suma de módulos.

$$q_1 = \frac{x_1}{r_1}, \text{ factor de mérito } q \text{ de la línea.}$$

La "caída" de tensión armónica hasta el extremo será:

$$|\Delta U_n(h)| = r_1 \sqrt{1 + f(h)^2 q_1^2} \cdot k_a \cdot |I_h| \cdot \frac{n^2}{2}$$

La tensión armónica será:

$$u_y(h)[\%] = u_{CT}(h)[\%] + \frac{1}{U_{nom}} |\Delta U_n(h)| \cdot \frac{2}{n^2} \left[ny - y \frac{(y-1)}{2} \right] \cdot 100 [\%]$$

En el extremo será:

$$u_n(h)[\%] = u_{CT}(h)[\%] + \frac{|\Delta U_n(h)|}{U_{nom}} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

Para relacionar las tensiones armónicas con la caída de tensión en el alimentador a frecuencia industrial, que es el factor de diseño, es:

$$\frac{|\Delta U_n(h)|}{|\Delta U_n|} = \frac{\sqrt{1 + f(h)^2 q_1^2} \cdot k_a \cdot |I_h|}{(\cos \varphi + q_1 \operatorname{sen} \varphi) |I_1|} \quad (3)$$

Por ejemplo: Caso de 5ª armónica

- Red de BT construida con cable Preensamblado de 95 mm² ⇒ $q_1 \cong \frac{1}{4}$
 - $\cos \varphi = 0,85$
 - $i_5 [\%] = 8,5$

$$\text{Resulta : } \frac{\Delta U_n(5)}{\Delta U_n} = 0,1$$

La caída en el alimentador, a la armónica 5ª, es un 10 % de la caída a frecuencia industrial.

Por lo que, si la caída a frecuencia industrial se calculó para cumplir con los límites de Producto Técnico, entonces:

$$\frac{\Delta U_n(5)}{U_{nom}} = 0,1 \frac{\Delta U_{L_1 L}}{U_{nom}}$$

Si, p.e, es $\Delta U_{L_1 L} / U_{nom} = 16\%$, es :

$$\frac{\Delta U_n(5)}{U_{nom}} = 1,6\%$$

Esto implica que el aporte de todo el alimentador completo es del mismo orden que el efecto en el CT.

Ambos, sumados, no superan el límite del 6 % previsto.

De esto se concluye:

Un distribuidor radial para cumplir con los límites de armónicas de tensión - con cargas que cumplan a su vez con los correspondientes límites de emisión - no requiere sobredimensionamiento respecto al requerido por Calidad de Producto Técnico (Nivel de tensión).

4.3 Generalización del cálculo de las tensiones armónicas.

En bornes del CT. Las tensiones armónicas en las barras de BT de los CT se indican en la Fig. 3.

Los valores se obtienen con la ecuación (1). Los valores de corriente son los límites de emisión de [4] para T2. Los límites de tensiones son los de [3].

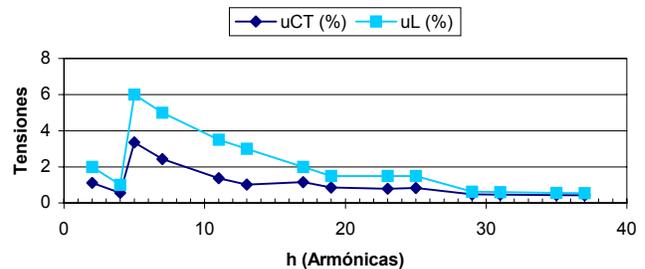


Fig. 3. Tensiones armónicas en las barras de BT de los CT.

De esto se concluye:

Los límites se cumplen en todos los casos.

Tensiones armónicas en el extremo del alimentador de BT. Las tensiones armónicas en los extremos del alimentador se muestran en la Fig. 4.

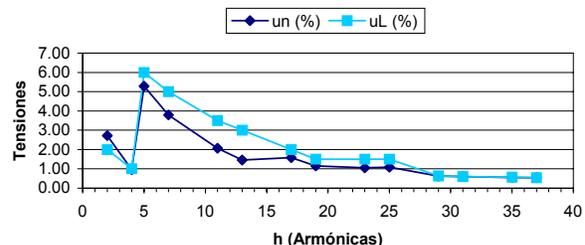


Fig. 4. Tensiones armónicas en extremo de alimentador.

Los valores se obtienen con la ecuación (2) y aplicando la ecuación (3) para los rangos admisibles de variación del nivel de la tensión. Los cálculos se realizaron para $\cos \varphi = 0,85$. Corresponden al caso peor de los factores de mérito típicos de los cables preensamblados en uso (25...95 mm²). Los valores de corriente son los límites de emisión

de [4] para Usuarios de Medianas Demandas (T2). Los límites de tensiones son los de [3].

De esto se concluye que:

En general, se observa un razonable cumplimiento de los límites.

5. INFLUENCIA DE LA COMPENSACIÓN DE REACTIVO EN EL FENÓMENO DE ARMÓNICAS EN BT

Se evalúa el efecto - eventuales resonancias o magnificaciones armónicas - que podría producir la compensación de potencia reactiva en el Distribuidor.

Sea la red de la Fig. 5.

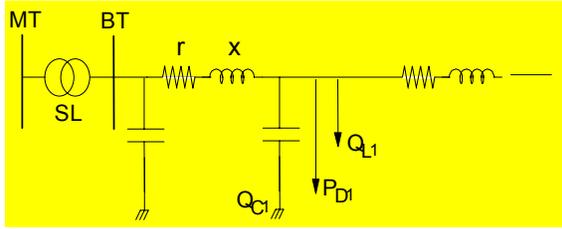


Fig. 5. Red de BT con compensación de potencia reactiva.

Se supone que todas las cargas, uniformemente distribuidas, requieren iguales mejoras:

$$\cos \varphi : 0,7 \rightarrow 0,85$$

La corriente de demanda de cada carga I_{D1} es:

$$I_{D1} = I_T \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{F_D}$$

n : nº de cargas

F_D : Factor de diversidad.

La potencia de demanda de cada carga, se vincula a la potencia del transformador (P_T), según:

$$P_{D1} = P_T \frac{1}{n} \frac{1}{F_D}$$

El reactivo de cada carga es, ($a \cos \varphi = 0,7$):

$$Q_{L1} = P_{D1}$$

Para compensar a $\cos \varphi = 0,85$, se requiere una potencia reactiva de:

$$Q_{C1} = 0,38 P_{D1}$$

La red de alimentación, vista desde una carga distorsionante, es la que aparece en la Fig. 6.

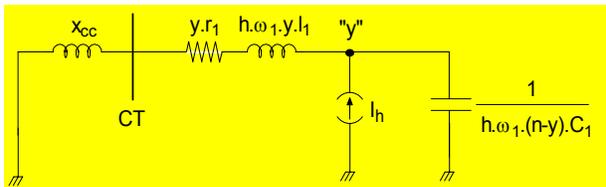


Fig. 6. Red de alimentación vista desde una carga distorsionante.

Donde "y" es el punto genérico (de 1n) donde se ubica el emisor. El modelo es de 1ª aproximación. Se ha considerado el circuito aguas arriba como inductivo puro y aguas abajo capacitivo puro (impedancia de entrada de línea corta). La frecuencia de resonancia (f_r) es:

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{S_{cc}(y)}{Q_c(n-y)}}$$

Donde $S_{cc}(y)$ es la potencia de cortocircuito en "y" y $Q_c(n-y)$ la potencia reactiva total aguas abajo del alimentador.

Nota: La expresión anterior es estrictamente válida en redes con bajas pérdidas (AT, por ejemplo). Se usa aquí como aproximación.

Esta expresión permite calcular la frecuencia de resonancia a lo largo del alimentador.

Las potencias varían según se muestra en la Fig. 7.

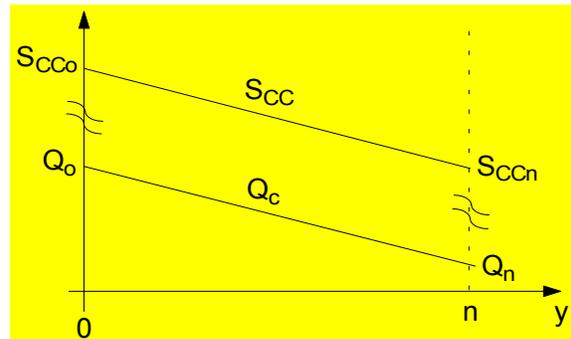


Fig. 7. Variación de Potencias en la red.

$$Q_0 \cong 0,38 \frac{1}{F_D} P_T \quad ; \quad Q_n = Q_0 / n$$

$$S_{cc_0} \cong 25 P_T \quad ; \quad S_{cc_n} \cong \frac{U_{nom}^2}{nx_1}$$

Tanto S_{cc} , como Q_c , disminuyen aguas abajo.

En bornes del CT es:

$$h_r = \frac{f_r}{f_1} = \sqrt{\frac{25 P_T}{0,38 \cdot \frac{1}{0,7} \cdot P_T}} \cong 7$$

Es decir que se produce una resonancia alrededor de la 7ª armónica.

En el extremo del distribuidor será:

$$h_r \cong \sqrt{\frac{F_D}{q_1 \cdot \Delta U_{LL}(p.u.) \cdot 2 \cdot 0,38}}$$

Válido para las consideraciones del inicio de este apartado y con:

$q_1 = \frac{x_1}{r_1} = \frac{1}{4} \dots \frac{1}{16}$, típicos de preensamblado de 95 y 25 mm², respectivamente.

$\Delta U_{LL} (p.u.) = 0,1; 0,16; 0,20$ según Calidad de Producto Técnico (Nivel de tensión – CPT) subterráneo, aéreo y rural, respectivamente.

Para los casos extremos, será :

$$h_r = 4 \dots 12$$

Lo cual implica que las armónicas más importantes, desde el punto de vista de su posible magnificación, son las de bajo orden.

Sin embargo, ¿qué magnificación es esperable en estas redes de BT?

Para cualquier caso de inyección de armónicas en el distribuidor el circuito resonante de la Fig. 6 da:

$$\frac{I'_h}{I_h} \cong \frac{w_r l}{r} \quad (\text{factor de mérito el circuito})$$

Donde I'_h es la corriente circulante aguas arriba. [Esta corriente es, a su vez, la que podría producir una tensión U_h magnificada respecto a la del cálculo de red sin compensación realizado previamente].

l : toda la inductancia aguas arriba.

r : toda la resistencia serie del cableado y transformador (es aproximadamente independiente del punto de inyección).

Por lo anterior:

$$\frac{I'_h}{I_h} \cong h_r q_1$$

Para el ejemplo que se desarrolla, el cual se considera razonablemente representativo, resulta:

$$\frac{I'_h}{I_h} < 1,5$$

Con lo que, aún en el caso peor, la magnificación no es notable.

De esto se concluye:

La compensación de reactivo en la red modifica el perfil de las tensiones armónicas en la red. El efecto, para casos representativos de compensaciones y tipos de redes, se nota en frecuencias de orden bajo, menor al 11^{avo}. Sin embargo, las altas pérdidas de los conductores de BT hacen que ese efecto no sea significativo.

6. EJEMPLO DE APLICACIÓN

En un Centro de Transformación (CT) de Buenos Aires se efectuó una medición de armónicas normalizada IEC.

La medición resultó penalizada, puesto que la armónica 15° de tensión excedió su Nivel de Referencia durante casi un tercio de la semana de medición.

En la Fig. 8 aparecen la armónica 15° de tensión referida a la fundamental y la corriente eficaz – representativa de la demanda - para una de las tres fases, esta última en color más claro. Además se muestra el Nivel de Referencia para la armónica 15° de tensión en BT, que es 0,3 %. [3]

Se observa que en gran parte de la semana la armónica 15° se encuentra por encima del límite establecido. También, que el nivel varía con cadencia diaria, aunque no guarda una correlación evidente con la curva de carga.

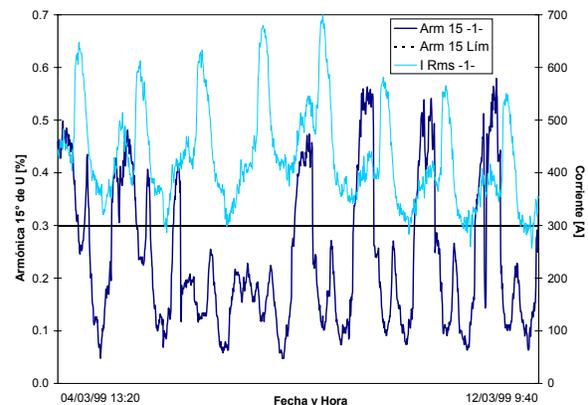


Fig. 8. Medición de armónica penalizada.

La Distribuidora efectuó las mejoras correspondientes en la red para mitigar el problema y dejar entonces de estar penalizada.

A los pocos días de haberse llevado a cabo la primer medición en el CT, la Distribuidora propuso medir nuevamente para demostrar que el inconveniente había sido resuelto. Los resultados obtenidos son los que aparecen en la Fig. 9.

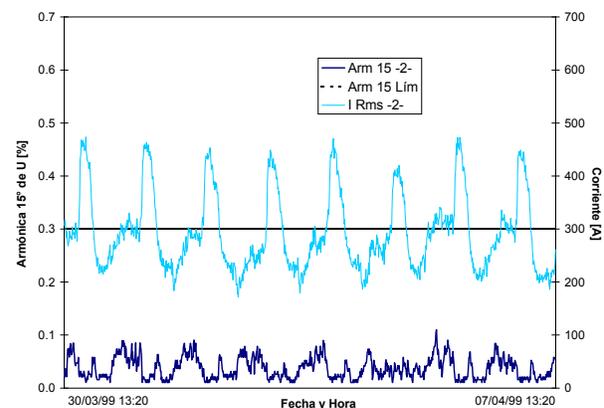


Fig. 9. Remediación en el CT originalmente penalizado.

Desde la gráfica se percibe que el contenido armónico en la tensión se redujo considerablemente. Durante toda la semana de medición, si bien la carga disminuyó con respecto a la medición original, el valor de la armónica 15° de tensión se encontró muy por debajo de su Nivel de Referencia. Por lo tanto no correspondió penalización alguna para la Distribuidora.

Con este ejemplo se pone de manifiesto cómo suele actuarse sobre la red para cumplir con las exigencias de Calidad de Producto Técnico.

En este caso se supone que las acciones correctivas se efectuaron en la conexión del neutro, ya que la armónica perturbadora es de secuencia homopolar.

7. CONCLUSIONES

En las redes de distribución de La Argentina se dispone de una importante experiencia en la medición de armónicas.

Por otra parte, y en general, preocupa que la compatibilización entre la emisión y los límites impuestos al fenómeno en la red influya en las tarifas de los servicios regulados.

Queda demostrado que la compatibilización de armónicas, bajo las reglas vigentes en La Argentina, no implica un sobrecosto en las redes dimensionadas para cumplir con requerimientos de Producto Técnico (caídas de tensión) normales.

No obstante, y por vía de ejemplo, queda evidenciado que en aquellos casos en los que se exceden los límites tolerables, la mitigación requiere acciones correctivas.

8. REFERENCIAS

- [1] Normas IEC 61000-x-yy, correspondientes a Armónicas.
- [2] Contratos de Concesión de los Servicios Públicos de Electricidad de La Argentina.
- [3] Anexo a la Resolución ENRE 184/00. Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico. Etapa 2.
- [4] Anexo a la Resolución ENRE 99/97. Base Metodológica para el Control de la Emisión de Perturbaciones. Etapa 2.
- [5] Issouribehere P., Barbera G., Martínez J., Galinski A. "Experiencias en el control de armónicas y flicker en servicios eléctricos públicos". Proc. I Conferencia Internacional del Área Andina del IEEE. pp. 541-546. Porlamar, Venezuela. 8-10 Sept. 1999.