

Influencia de armónicos en el factor de potencia de una instalación eléctrica y en su compensación

1. Introducción

El factor de potencia de una instalación eléctrica es una medida de la eficiencia de la misma. Cuanto mayor sea éste, más eficiente es la corriente que se suministra a la carga. Las distorsiones armónicas generadas por convertidores estáticos y cargas no lineales aumentan la impedancia y disminuyen la eficiencia del factor de potencia.

Hasta hace unos años la naturaleza de las cargas era básicamente lineal como motores, lámparas de incandescencia y equipos de calor, que producían corrientes prácticamente senoidales.

Hoy en día las fábricas modernas incorporan variadores de frecuencia para regular la velocidad de motores, grandes fuentes de corriente continua, controladores programables, equipos de alimentación ininterrumpida, hornos de inducción y otros equipos con convertidores de corriente. Estos equipos son no lineales por naturaleza y producen formas de onda distorsionadas que pueden dañar los circuitos y equipos, además de disminuir el factor de potencia e incrementar costes.

Actualmente se intenta mitigar el efecto de los armónicos sobre los equipos (desclasificación de transformadores y colocación de filtros), pero no se tiene en cuenta su efecto sobre el factor de potencia.

2. Problemas generados por los armónicos relacionados con la potencia

Cuando aumenta la distorsión ar-

mónica, la forma de onda tiende a pulsos con grandes picos de corriente. El valor eficaz de la corriente aumenta, y este aumento produce una potencia aparente mayor, mientras que la potencia activa y el factor de potencia no han cambiado, ya que se basan en la frecuencia fundamental. Además, los equipos eléctricos se sobrecalientan, lo que significa energía perdida en kW, y el usuario pagará esa energía adicional.

Se presentan otros problemas como las lecturas de los vatímetros, dado que los discos de inducción están diseñados para funcionar con ondas no distorsionadas y a la frecuencia fundamental, los armónicos generarán errores de medida. Esto puede hacer que el usuario pague más que si la onda fuese senoidal y del mismo valor eficaz.

En los dispositivos de protección sometidos a armónicos pueden producirse operaciones erróneas por picos de corriente, cambios de tensión.

Por último, las medidas realizadas con aparatos que no sean de verdadero valor eficaz mostrarán medidas erróneas, dado que el valor eficaz suelen calcularlo mediante el factor de cresta o el factor de forma de una onda senoidal, métodos que pierden su validez cuando la onda deja de serlo por la existencia de armónicos.

3. Cálculo del factor de potencia

El factor de potencia total, que llamaremos "factor de potencia verdadero" (f.d.p.v), es la relación entre la potencia de entrada al circuito (P_{med}), en vatios, y la potencia aparente entregada (S), incluyendo el efecto de los armónicos:

JESUS
SAGREDO GONZALEZ,
VICTORIA
ABAD SAN MARTIN y
JAVIER
GONZALEZ DE LA VIUDA
*Area de Conocimiento de
Ingeniería Eléctrica.
Escuela Universitaria Politécnica
de la Universidad de Burgos*

$$f.d.p.v = \frac{P_{med}}{S}$$

Cuando existen ondas armónicas, las tensiones y corrientes pueden representarse mediante series de Fourier:

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) ;$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega_0 t + \theta_n) ;$$

n = orden de armónico

Los valores eficaces verdaderos de tensión y corriente (V_{ev} e I_{ev}) y la potencia aparente se calculan de la siguiente forma:

$$V_{ev} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{2}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_{nev}^2} ;$$

$$I_{ev} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{nev}^2} ;$$

$$S = \frac{P_{med}}{V_{ev} \cdot I_{ev}}$$

Donde V_n e I_n son las correspondientes a las frecuencias n veces la fundamental.

La potencia media se calcula como la suma de la potencia de cada frecuencia:

$$P_{med} = \sum_{n=1}^{\infty} V_{nev} \cdot I_{nev} \cdot \cos(\varphi_n - \theta_n) =$$

$$= P_{1med} + P_{2med} + \dots$$

Donde cada armónico puede contribuir positiva o negativamente, según el ángulo de desfase.

Una forma usual de medir el nivel de armónicos es la distorsión armónica, que es la relación del valor eficaz de los armónicos respecto de la fundamental, en porcentaje para tensión y corriente es el THD (Total Harmonic Distorsion):

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{nev}^2}}{V_{1ev}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \cdot 100\% ;$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{nev}^2}}{I_{1ev}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\%$$

En España UNE 21248/6-1996 indica el contenido de armónicos H en porcentaje (equivalente al THD) según su apartado 2 como:

$$H\% = 100 \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n^2}{I_1^2}\right)}$$

Obviamente, si no hay armónicos, las distorsiones son 0. Los valores de tensiones y corrientes en función de la distorsión armónica:

$$V_{ev} = V_{1ev} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} ;$$

$$I_{ev} = I_{1ev} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}$$

Y sustituyendo en las fórmulas del factor de potencia:

$$f.d.p.v = \frac{P_{med}}{V_{1ev} \cdot I_{1ev} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} =$$

$$= \frac{P_{med}}{V_{1ev} \cdot I_{1ev}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}}$$

En la mayoría de los casos, la contribución de los armónicos en la potencia media es pequeña, y puede despreciarse, por tanto, $P_{med} \approx P_{1med}$.

También, en la mayoría de los casos, la distorsión de tensión es menor del 10% y puede despreciarse: $V_{ev} \approx V_{1ev}$.

Por tanto el factor de potencia puede escribirse aproximadamente como:

$$f.d.p.v = \frac{P_{med}}{V_{1ev} \cdot I_{1ev}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} =$$

$$= f.d.p._{desp} \cdot f.d.p._{dist}$$

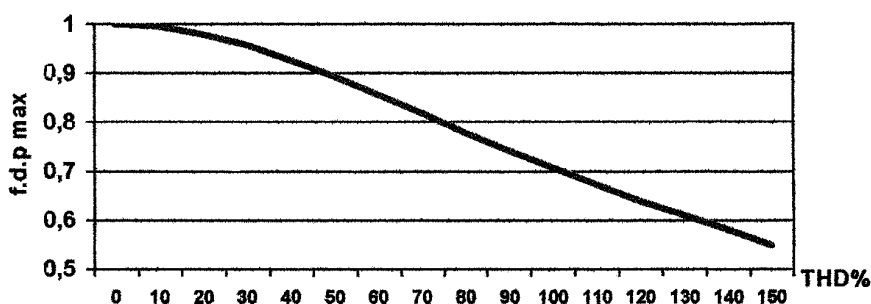
El componente $f.d.p._{desp}$ es conocido como desplazamiento o DPF (Displacement Power Factor) y es la relación entre la potencia activa de la onda fundamental (50 ó 60 Hz), en vatios, y la potencia aparente en voltamperios. Este es el factor de potencia que mide la compañía eléctrica para las tarifas. El componente desplazamiento puede disminuirse mediante la compensación de reactiva a través de condensadores o máquinas síncronas. El DPF es el coseno del ángulo de desfase entre tensión y corriente fundamentales ($\cos \varphi$).

El componente $f.d.p._{dist}$ es conocido como distorsión y es la porción asociada con distorsiones armónicas (tensiones y corrientes) presentes en el circuito, la mayoría de las cuales son generadas por los convertidores estáticos. Esta porción del factor total de potencia constituye una corriente de pérdidas innecesarias, llamada corriente circulante, porque aunque no realiza trabajo alguno, circula entre la alimentación y la carga, además de disminuir el factor de potencia. Esta corriente está siendo facturada por la compañía, pero no es utilizable por el usuario. En este caso deben utilizarse medidas correctoras para reducir las pérdidas.

Los analizadores de armónicos suelen medir tanto el desplazamiento como el factor de potencia verdadero.

Dado que el desplazamiento del factor de potencia nunca puede ser

Fig. 1. Valor máximo del f.d.p. en función de la distorsión armónica



mayor de la unidad, el límite superior lo marcará el término de la distorsión, también con valor máximo de la unidad:

$$f.d.p.v \leq f.d.p_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}}$$

La figura 1, que representa esta distorsión, muestra el valor máximo que puede alcanzar el factor de potencia en función de la distorsión armónica.

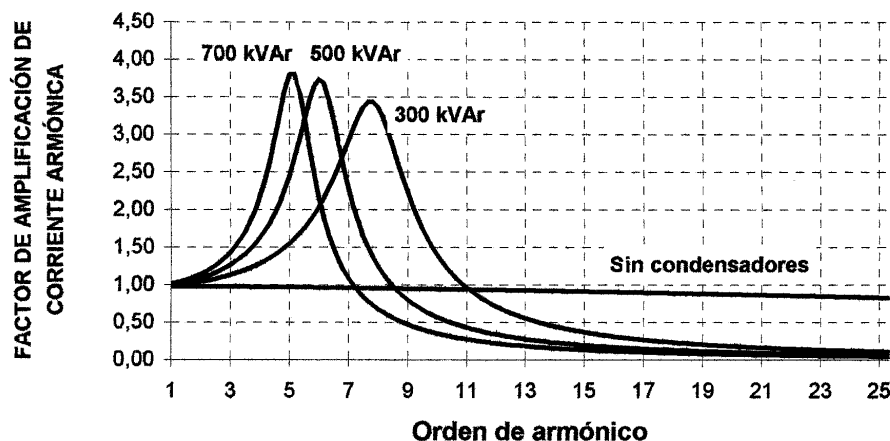
Las pérdidas debidas a los armónicos hacen que el factor de potencia total sea menor que el $f.d.p_{desp}$. Así, por ejemplo, se puede tener un factor de potencia total de 0,6 ó 0,7 mientras que las cargas tienen un factor de potencia de 0,9 ó 0,95 al presentarse un THD del 120%. Se debe, por tanto, considerar el factor de potencia de manera distinta a la de $\cos\phi$ en el caso de existir corrientes armónicas.

4. Compensación mediante condensadores

Cuando una instalación tiene un bajo factor de potencia el procedimiento usual es añadir condensadores en paralelo que suministren energía reactiva. Si existen armónicos éstos puede causar problemas. Dado que la impedancia de los condensadores disminuye cuando la frecuencia aumenta y que las frecuencias de los armónicos son múltiplos de la fundamental, éstos absorben las corrientes de altas frecuencias, causando sobrecalentamientos y disminuyendo la vida de los mismos. Las típicas baterías de compensación están diseñadas para operar a un máximo del 110% de la tensión nominal y a un 135% de su valor de potencia reactiva, valores ampliamente superados cuando existen armónicos. La solución es, entonces, colocar filtros (combinación de inductancias y condensadores especialmente diseñados) que capturen los armónicos.

También sucede que al añadir los condensadores para corregir el factor de potencia se puedan crear otros problemas. La capacitancia de los condensadores y la inductancia del circuito, igualándose,

Fig. 2. Multiplicaciones de corrientes armónicas resonantes



pueden formar un circuito resonante a una determinada frecuencia. Dependiendo de la configuración del circuito esta resonancia puede ser serie o paralelo. La resonancia serie produce una multiplicación de la tensión (rama condensador e inductancia serie) y la paralelo (condensador e inductancia de línea) una multiplicación o amplificación de la corriente. En entornos con altos niveles de armónicos se producen ambos tipos de resonancia. Si la frecuencia de resonancia del circuito coincide o está cercana con la de un armónico la corriente circulante oscilará con una amplitud que podría ser mucho mayor que la corriente normal del circuito. Esta corriente circulante puede llegar a ser 16 veces el valor inicial de la corriente armónica, lo que produciría grandes distorsiones de tensión en todo el circuito, así como fundir fusibles, dañar componentes, e introducir un nivel de armónicos excesivo en toda la instalación.

La figura 2 muestra el factor de multiplicación de las corrientes armónicas para distintos bancos de compensación en una instalación típica industrial donde existen equipos variadores de velocidad de motores.

Puede observarse que al aumentar la potencia de los bancos compensadores (aumentando C) disminuye la frecuencia de resonancia y aumenta el factor de multiplicación del circuito. La frecuencia de resonancia se calcula mediante:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}}$$

En este caso se pueden considerar varias soluciones que disminuyan o eliminen el problema. Una solución obvia es desplazar la frecuencia de resonancia para que no coincida con la de los armónicos. Esto puede hacerse variando la inductancia o la capacidad del circuito. Al añadir una bobina en serie (bancos sintonizados de la figura 3) la frecuencia de resonancia disminuye. También puede cambiarse la localización del banco de condensadores para que la inductancia del circuito respecto del mismo sea otra.

En el caso de bancos sintonizados la frecuencia de resonancia suele ser ligeramente inferior a la del armónico predominante. Para el ejemplo anterior podría tomarse 4,7 veces la fundamental y se obtendrían la curva de la figura 4.

Si no puede cambiarse la frecuencia de resonancia, pueden añadirse filtros para reducir los armónicos. Pero es importante asegurarse de que estos filtros adicionales no crean frecuencias menores de resonancia. Los filtros normalmente son más efectivos si se colocan cerca de la carga que deben proteger o cerca de la fuente de armónicos.

El ejemplo de la figura 2 puede aplicarse también a sistemas de compensación automáticos con escalones. Con los sistemas automáticos existe la posibilidad de puntos múltiples de resonancia que amplificarán las corrientes. La intensidad dependerá del punto de operación de la instalación y de la configuración del banco.

Ejemplo: En una instalación eléctrica se dispone de un transformador estrella-triángulo de distribución de 3 MVA (13,6 kV/660 V, 6% de inductancia propia) que alimenta, entre otras cargas, a dos variadores de frecuencia para controlar dos motores de inducción de 500 CV cada uno. Para mejorar el factor de potencia se instaló un banco de 1.000 KVAR en el lado de 660 V.

$$I_L = \frac{\text{KVA}}{\sqrt{3} \cdot V_L} = \frac{3 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 660} = 2.624,32 \text{ A}$$

La corriente de fase:

$$I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{2.624,32}{\sqrt{3}} = 1.515,15 \text{ A}$$

La reactancia del transformador y su inductancia:

$$X_L = 0,07 \cdot \frac{V_F}{I_F} = 0,06 \cdot$$

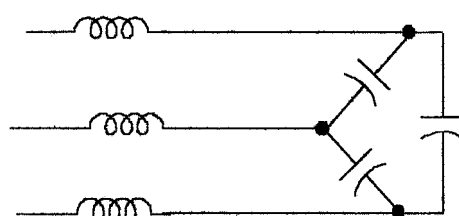
$$\cdot \frac{660}{1.515,15} = 0,02614 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,02614}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} =$$

$$= 8,32 \cdot 10^{-5} \text{ H}$$

Para el condensador conectado en triángulo:

Fig. 3. Banco de compensación sintonizado



$$I_L = \frac{\text{VAR}}{\sqrt{3} \cdot V_L} = \frac{1.000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 660} = 874,8 \text{ A};$$

$$I_C = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{874,8}{\sqrt{3}} = 505,1 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_L}{I_C} = \frac{660}{505,1} = 1,307 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,307} = 2,44 \cdot 10^{-3} \text{ F}$$

Y la frecuencia de resonancia:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{8,32 \cdot 10^{-5} \cdot 2,44 \cdot 10^{-3}}} = 353 \text{ Hz}$$

Frecuencia peligrosamente cercana a los 350 Hz correspondientes a las tensiones y corrientes del 7° armónico, generalmente introducidas por variadores de frecuencia.

Debe advertirse que la frecuencia de resonancia sería la misma si se hubiese utilizado la configuración estrella para el transformador, pero no si se cambia la capacitancia o inductancia del circuito.

Los motores de 500 CV absorben una corriente de 795 A (asumiendo un factor de potencia de 0,9 y un rendimiento del 90%). Si suponemos que la corriente armónica de 7° orden suele ser (generalmente) 1/7 de la fundamental, entonces $I_7 = 113,6 \text{ A}$. Si la resistencia (R) para el transformador y los conductores dan una caída de tensión del 1,2% en la carga de 3MVA,

$$R = \frac{X_L}{6\%} \cdot 1,2\% = 5,23 \cdot 10^{-3} \Omega$$

El factor de calidad Q de un circuito es:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{R}$$

Si aplicamos este factor de calidad como factor de multiplicación de resonancia a la frecuencia del 7° armónico:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 350 \cdot 8,32 \cdot 10^{-5}}{5,23 \cdot 10^{-3}} = 35$$

La corriente correspondiente, en resonancia al 7° armónico, será 35113,6 = 3.976 A. Esta corriente circula entre el transformador y el banco de condensadores. La corriente neta en dicho banco será:

$$I_Q = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{3.976^2 + 50501^2} = 4.008 \text{ A}$$

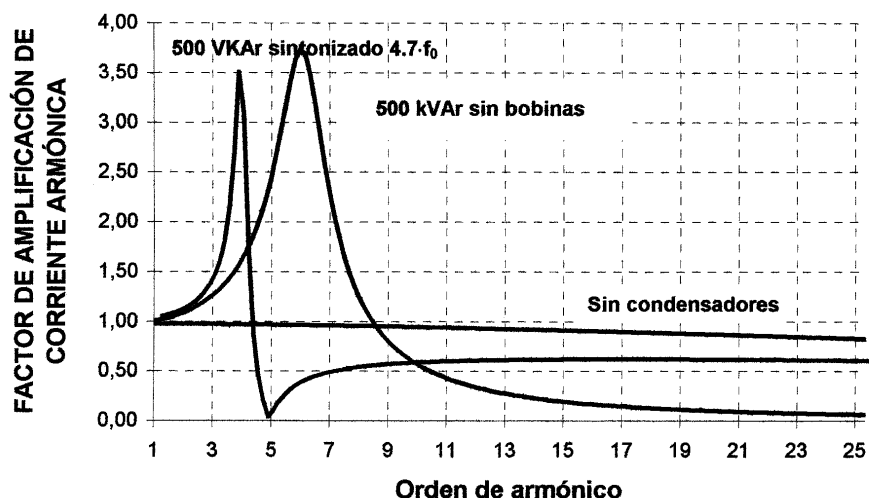
Corriente que puede dañar seriamente los condensadores.

5. Filtros de armónicos

Como se ha mencionado, el problema de la absorción de corrientes armónicas por los condensadores y de circuito resonante se pueden eliminar mediante filtros de armónicos.

Se utilizan dos tipos de filtro. Un filtro paralelo (*shunt*) en la línea que presente una baja impedancia

Fig. 4. Multiplicación sin banco, con banco de 500 KVAR y con banco sintonizado



o cortocircuito a la frecuencia armónica, pero muy alta a la fundamental. Un filtro serie funciona de manera inversa, presenta alta impedancia a la corriente armónica y baja a la fundamental. Estos últimos tienen menor aceptación porque deben soportar la corriente normal de la línea, lo que suele encarecer la instalación.

Los filtros paralelos se sintonizan normalmente a una frecuencia ligeramente menor a la armónica, para que cualquier variación de sus componentes no cree una nueva resonancia. Como ya se ha dicho, los filtros para el 5° armónico se suelen sintonizar a 4,7 veces la frecuencia fundamental. Adicionalmente se debe tener en cuenta que la capacidad de los filtros se suma a la de los condensadores de corrección del factor de potencia, y la capacitancia total no debe ser excesiva e introducir potencia reactiva en la red.

A menudo, un sistema eléctrico existente, con un nivel mínimo de armónicos, utiliza condensadores para corregir el factor de potencia. Posteriormente se añade al sistema un equipo de alimentación ininterrumpida o convertidores de frecuencia que introducen armónicos en el sistema. Se suelen aprovechar los bancos de condensadores (para ahorrar costes) y se le añade una inductancia serie que lo convierte en un filtro. Esto puede funcionar, pero también puede causar el problema anterior de sobretensiones en el condensador por resonancia serie. Los condensadores están diseñados para funcionar con una tensión superior del 10%. Al añadir la inductancia en serie se produce un incremento de la tensión fundamental de hasta un 20%. Esta nueva tensión puede hacer fallar los condensadores. Por esta razón, los filtros se construyen como un conjunto compacto y sus condensadores suelen ser de tensiones bastante superiores a las de funcionamiento (380 V para una instalación de 220 V).

6. Otras consideraciones

Transformadores

En los últimos años han aparecido los transformadores “desclasificados” o de factor K, indicativo del

nivel de armónicos hasta el que se asegura el correcto funcionamiento del mismo. A través de un analizador de armónicos se puede medir el factor THD de la instalación y con este valor se selecciona un transformador de determinado valor K.

Condensadores y motores

En sistemas de distribución donde existan armónicos y motores de inducción, se recomienda que los condensadores se conecten a cada motor individualmente. Esta disposición minimiza los daños potenciales de las combinaciones inductancia-condensador a la vez que simplifica los filtros que puedan necesitarse. Cada uno de los condensadores debe seleccionarse cuidadosamente para mantener la tensión de la línea dentro de sus límites. Actualmente se recomienda retirar los condensadores y usar solamente filtros si se detectan armónicos.

Condensadores y fuentes de alimentación electrónicas

No se recomienda el uso de condensadores para mejorar el factor de potencia en el lado de la carga de fuentes de alimentación electrónicas conectadas a motores de inducción. La conexión de condensadores en este caso requiere un análisis del motor, de la fuente de alimentación y de la característica de carga como función de la velocidad para evitar la sobreexcitación del motor, resonancia de armónicos y prevenir sobretensiones en los condensadores.

7. Conclusiones

1. El factor de potencia de una instalación eléctrica es una medida de la eficiencia de la misma, sin embargo, cuando existen armónicos no es cosφ y las medidas tradicionales del mismo pueden ser erróneas.

2. La táctica habitual de compensar el factor de potencia con condensadores puede acarrear problemas de resonancia o funcionamiento erróneo de los filtros que pudiesen existir.

3. Por todo ello las soluciones a tomar requieren un estudio detallado de cada derivación de la instalación, debiendo hacerse medidas (con aparatos de valor eficaz verdadero) de todos los parámetros de

inductancia de conductores, transformadores y motores, así como el uso de analizadores de armónicos para medir correctamente el factor de potencia.

4. La tendencia actual es el empleo de filtros paralelos que sirvan a la vez para compensar el factor de potencia y eliminar los armónicos.

8. Bibliografía:

[1] Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems. Harmonics Working Group (IEEE 519 Commite).

[2] UNE 21248/6 (1996).

[3] EN6100-3-2. (Retrasada al año 2001).

[4] Harmonics and how they relate to power factor. W. Mack Grady. University of Texas at Austin. San Diego Gas & Electric.

[5] Influencia de cargas no lineales en transformadores de distribución. V. Abad San Martín. Escuela Universitaria Politécnica. Burgos.

[6] Power Factor, Harmonic and Harmonic Filters. Tom Shaughnessy. Power-CET. Santa Clara.