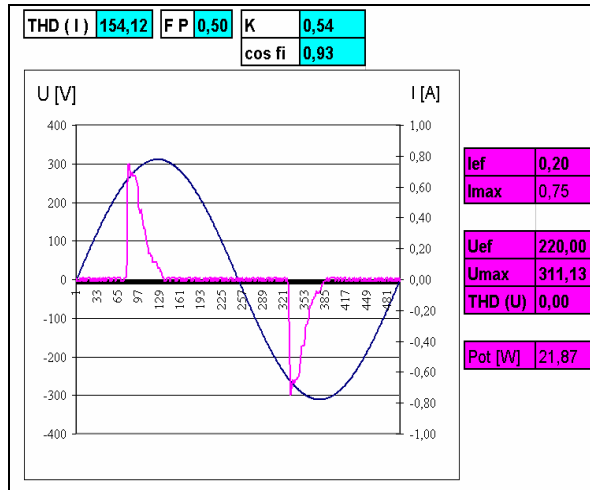


EL FACTOR DE POTENCIA Y EL URE EN EL SECTOR RESIDENCIAL

Mario S. F. Brugnoni (1)

Grupo Energía y Ambiente (GEA), Departamento de Electrotecnia
Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires
Paseo Colón 850, (C1063ACV) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, ARGENTINA
Tel/Fax (54 11) 4343-0891/3503 - email: mbrugno@fi.uba.ar



La figura muestra el resultado que emite el programa de análisis, que se utilizó para el desarrollo del presente trabajo. Se presenta el caso de una lámpara fluorescente compacta (LFC). Además de la señal de un ciclo de tensión perfectamente senoidal, se observa la señal de la corriente, que muestra una notable deformación. Numéricamente se observan los valores de Distorsión armónica total (THD), Factor de Potencia (FP), Factor de contracción (k) y cos fi. En forma complementaria también se aprecian los valores eficaces de la tensión y la corriente, y la potencia activa.

Resumen: En la presente ponencia se analizan las causas de la modificación en los patrones de consumo residencial, debido a las mejoras en la eficiencia de los electrodomésticos. El reemplazo del equipamiento por otro más eficiente, trajo consigo un incremento en el contenido armónico de la corriente y consecuentemente una disminución en el coseno fi.

Palabras clave: Factor de Potencia, Coseno FI, Sector Residencial, Cargas Deformantes, Uso Eficiente de Energía, URE.

I. INTRODUCCIÓN

La incorporación de equipamiento con respuesta eléctrica alineal, desde hace algo más de dos décadas, viene provocando una caída cada vez más notable del factor de potencia (FP) en el sector residencial. Hace años el FP se veía afectado por cargas de característica inductiva como el lavarropas o la heladera y en algunos casos por distintos tipos de iluminación con lámparas de descarga.

Gradualmente se fueron incorporando electrodomésticos, algunos de característica inductiva como los lavavajillas o los secadores centrifugos y algunos ventiladores y extractores de aire; pero fueron los equipos electrónicos, provistos en su mayoría con fuentes switching los que mayor incidencia han tenido.

En la Argentina, la calefacción, el calentamiento de agua y la cocción eléctrica en los hogares, cargas de característica resistiva, son reemplazadas por el uso del gas natural o envasado, con lo cual la proporción de cargas inductivas y distorsivas aumenta. A ello se le ha sumado, en la última década, el reemplazo de las lámparas incandescentes por fluorescentes compactas.

Se debe agregar que los patrones de consumo han cambiado nuevamente en los últimos años con el aporte de los equipos de aire acondicionado en los meses más cálidos. La reducción de los precios de venta y los amplios planes de financiación han incidido notoriamente en las costumbres de muchos hogares argentinos.

En esta ponencia se establecerá en primer lugar la diferencia entre el factor de potencia y el coseno fi en circuitos con corrientes poliarmónicas. Luego se mostrarán los efectos de la conexión simultánea de cargas y su efecto sobre el factor de potencia.

II. EL FACTOR DE POTENCIA Y EL COSENO FI

Es conveniente aclarar primero algunos conceptos teóricos que aparecen frecuentemente en forma confusa. Para ello tomaremos como ejemplo un sistema monofásico, donde la tensión U aplicada se supone perfectamente senoidal mientras que la carga es alineal y presenta además característica inductiva. Como consecuencia de la alinealidad la corriente "i" resultará poliarmónica pudiéndose representar de acuerdo al desarrollo de Fourier como:

$$i = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \psi_1) + \sqrt{2} I_2 \sin(2\omega t + \psi_2) + \sqrt{2} I_3 \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots$$

El valor instantáneo de la tensión u deberá expresarse como:

$$u = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \xi_1)$$

Los valores eficaces de la tensión y la corriente se calcularán como:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}$$

$$U = U_1$$

Las potencias activa, reactiva y aparente serán en consecuencia:

$$P = UI_1 \cos(\xi_1 - \psi_1) = UI_1 \cos \varphi_1$$

$$Q = UI_1 \sin \varphi_1$$

$$S = UI$$

Donde φ_1 es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente para la fundamental.

El cálculo del Factor de Potencia (FP) en estos circuitos no difiere del conocido para el comportamiento puramente senoidal:

$$FP = \frac{P}{S}$$

Reemplazando P y S por las expresiones recién vistas tenemos:

$$FP = \frac{UI_1 \cos \varphi_1}{UI}$$

$$FP = \frac{I_1 \cos \varphi_1}{I} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1$$

Donde la relación I_1/I se denomina "factor de contracción (k)" y representa un índice del grado de distorsión de la onda de corriente. Así, si ésta fuera senoidal pura valdría 1 con lo cual el factor de potencia sería igual al $\cos \varphi_1$ en coincidencia con lo que se conoce para régimen senoidal. En la literatura especializada se denomina a este último "factor de potencia de desplazamiento" ya que su origen tiene en cuenta el desfase entre tensión y corriente. Se debe aclarar que diversos autores han desarrollado otras formas de incorporar la influencia de las armónicas en las expresiones de cálculo.

III. EL FACTOR DE POTENCIA EN EL SECTOR RESIDENCIAL

En el sector residencial es posible identificar tres tipos de cargas perfectamente diferenciadas:

- 1) Las que tienen un comportamiento lineal y factor de potencia unitario como las lámparas incandescentes y además todo aparato cuyo funcionamiento se logre mediante resistencias calefactoras, tostadoras, secadores de pelo, estufas etc.

- 2) Aquellas con comportamiento lineal pero con un factor de potencia inductivo menor que la unidad. En este rubro se destaca la heladera cuya demanda de energía la ubica en los primeros lugares entre los artefactos del hogar (en algunos hogares representa mas del 40% de la demanda total). Aquí deben mencionarse también la iluminación fluorescente con balasto magnético y los equipos de aire acondicionado los lavarropas, los ventiladores y todos aquellos equipos cuyo funcionamiento dependa de un motor de inducción monofásico, no provisto de compensación capacitiva.
- 3) Aquellas cuyo comportamiento es alineal tales como televisores, computadoras, reproductores de audio y video, lámparas fluorescentes con balasto electrónico etc.

En las figuras 1 y 2 se observan la forma de onda y los valores característicos para dos ejemplos representativos de las cargas mencionadas.

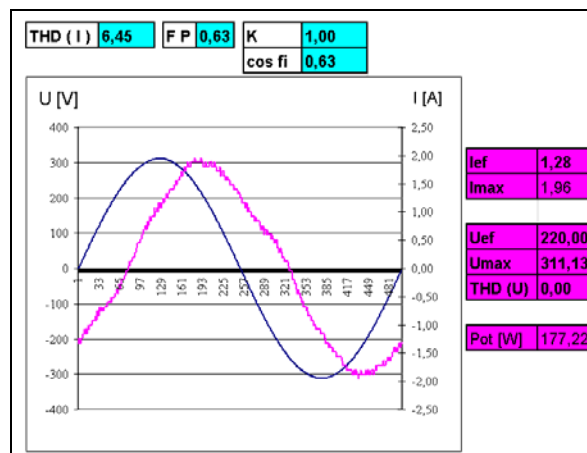


Fig. 1 Heladera familiar

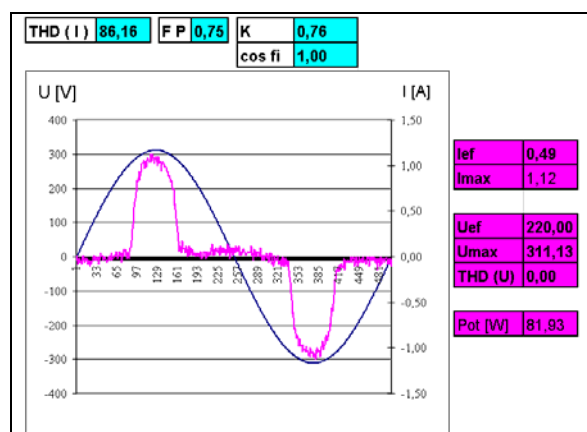


Fig. 2 Televisor de 20 pulgadas

Se observa que en el caso presentado en la Fig. 1 (heladera familiar) el bajo factor de potencia es debido al desfase entre tensión y corriente ($\cos \varphi_1 = 0,63$) mientras que en la Fig. 2 (televisor) el bajo valor es debido a la deformación de la onda de corriente ($k = 0,76$).

Con esta diversidad de cargas vale la pregunta: "porque se relaciona la disminución del factor de potencia con el URE en el sector residencial". Para responderla debemos observar como se modificaron los patrones de consumo influenciados por la mejora en la eficiencia energética. Las variaciones que más se destacan pueden resumirse en sólo dos factores:

- 1) La incorporación de equipamiento electrónico más eficiente donde la "fuente de potencia" es reemplazada por una fuente conmutable (switching), la incorporación de iluminación fluorescente con balasto electrónico y en algunos casos la introducción de dimmers.
- 2) La fuerte eliminación de carga activa al reemplazarse todos los equipos calefactores por sus equivalentes a gas y al retirarse las lámparas incandescentes

En resumen se retira carga activa y se incorpora carga distorsiva con bajo factor de potencia con lo cual el resultado resulta obvio, el factor de potencia promedio se reduce sensiblemente cayendo por debajo de los valores penalizables (En Buenos Aires, por debajo del 0,85).

IV. LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Como es sabido, la reducción del factor de potencia afecta a las redes de distribución de energía eléctrica, aumentando las pérdidas y saturando el equipamiento. La posibilidad de corrección por parte del usuario para evitar la penalización no resulta simple. La clásica utilización de capacitores ubicados en el tablero de alimentación para efectuar la corrección, no resulta la mas adecuada debido a la presencia de las cargas distorsivas que pueden provocar fenómenos de resonancia con alguna de las armónicas. Más aún la disminución del factor de potencia debida a la presencia de estas cargas no es posible realizarla mediante capacitores. Se verán, a continuación, algunos ejemplos aclaratorios.

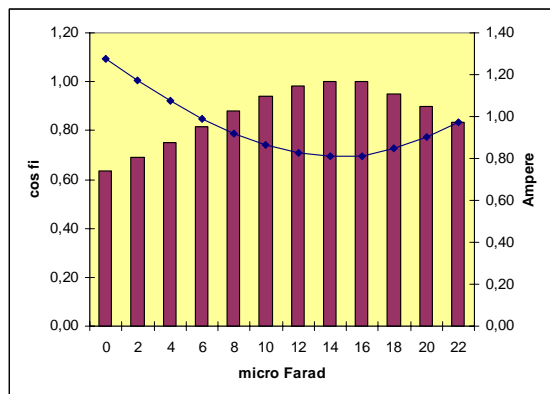


Fig. 3. Corrección de FP en una heladera
Barras: FP, en este caso idem cos fi.
Línea: Valor eficaz de la corriente absorbida.

Un caso muy usual de corrección de Factor de Potencia mediante el agregado de capacitores es el que se muestra en la Fig. 4. Aquí, la carga es un tubo fluorescente con balasto magnético. Se observa que es posible lograr un FP=1 para un valor de capacitancia comprendido entre 5 y 6 μF . Es muy común escuchar en la jerga de los electricistas la expresión "agregue 1 μF por cada 10 W". Si se observa para este caso corresponderían 4 μF con los que se obtiene un FP>0,8.

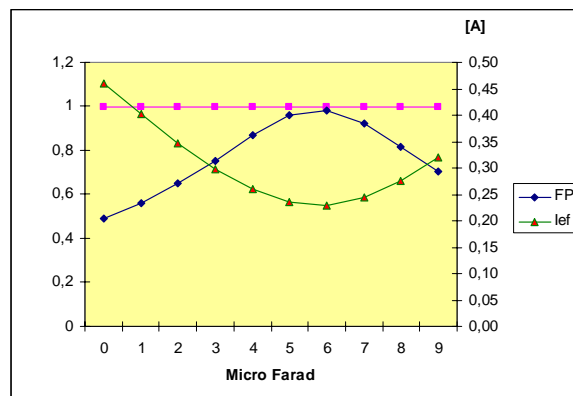


Fig. 4. Corrección de FP para un tubo fluorescente con balasto magnético

Cuando las cargas combinan efectos de desfase y distorsión sólo es posible llevar a 1 el valor de cos fi. Para este valor de capacidad se obtendrá, también, el máximo valor de FP, como se observa en la Fig. 5

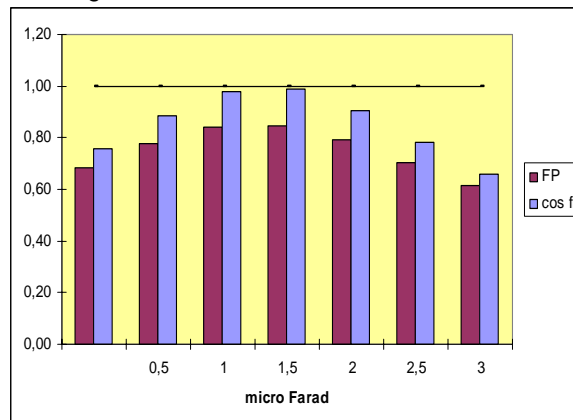


Fig. 5. Corrección de FP para una carga que introduce desfase y distorsión.

Respecto a las cargas puramente resistivas, como los secadores de pelo, no debemos llamarnos a engaño. Para este caso se ha analizado la característica que presenta este aparato en su posición de máximo. Distinto es el caso de su funcionamiento a media potencia, el que, en muchos casos, se obtiene mediante el agregado de un diodo en serie lo cual presenta una fuerte demanda con característica distorsiva, con el agregado de una componente continua en la onda de corriente.

Una mención es necesaria para el caso de los lavarropas, secarropas centrífugos y heladeras. En particular esta última que representa más del 30 % del consumo energético hogareño. La mayoría, por no decir la totalidad, de las existentes en el mercado argentino presentan un factor de potencia muy lejano de la unidad. Siendo tan simple la solución a este problema no se explica la negativa de los fabricantes al agregado de capacitores ni la inexistencia de reglamentaciones que obliguen a la mejora en el comportamiento de estos equipos.

Otro elemento a considerar debido al uso en los hogares, y aún en los comercios, es el tubo fluorescente con balasto electrónico sin filtro. Para este caso ya no es válido el clásico agregado de capacitores dentro del mismo artefacto, modalidad que se practica para corregir el factor de potencia en estos elementos cuando están provistos con balasto magnético. La respuesta que presentan estos tubos provistos de balasto electrónico es similar a la mostrada para las lámparas fluorescentes compactas.

V. UN ANÁLISIS DE LA CURVA DE CARGA

La promoción de la eficiencia de la energía eléctrica en sector residencial argentino y la consecuente disminución del factor de potencia por debajo de los límites penalizables, ha creado una controversia entre los distintos actores del sector. Así los usuarios opinan que se los premia por reducir el consumo y a su vez se los penaliza por bajo FP. Las distribuidoras se ven beneficiadas por la reducción de los picos de consumo, en sus centros de transformación, pero observan con preocupación la disminución del FP y la creciente proporción de

usuarios de la zona metropolitana de Buenos Aires, cuyo FP promedio cae por debajo del 0,85.

En la Fig: 6 se presenta una gráfica donde se han volcado las mediciones tomadas con intervalos horarios, durante un día hábil para un usuario residencial. En la misma se representa la variación de la corriente (en trazo grueso), el coseno fi (en punteado) y el factor de potencia (con línea llena). Las líneas gruesas horizontales representan los valores medios durante el día de coseno fi = 0,9 y FP = 0,82.

Es posible analizar la gráfica por tramos para destacar algunos aspectos interesantes. El periodo de reposo nocturno se extiende aproximadamente desde la 1,30h hasta 8,30h. Allí se observa un consumo algo superior a 1A debido a alguna iluminación nocturna permanente a la que se le suma el consumo de los equipos en standby. El consumo de la lámpara desaparece en horarios diurnos (ver 13h). Se observa además, con notable simetría, el aumento del consumo debido a los periodos de funcionamiento de la heladera en coincidencia con una disminución del coseno fi y del factor de potencia.

Un segundo tramo muestra alteraciones visibles en el consumo durante el comienzo de la actividad matutina. Durante este periodo se mantiene bajo el FP mientras que aumenta en forma notable el coseno FI, típico comportamiento del consumo debido a televisores, equipos de audio, PC y otros electrodomésticos con carga distorsiva pero con la fundamental prácticamente en fase con la tensión. Idéntico comportamiento pero con mayor consumo se observa en el tramo en el cual se registra el pico nocturno (tener en cuenta que las mediciones se han realizado durante la estación invernal).

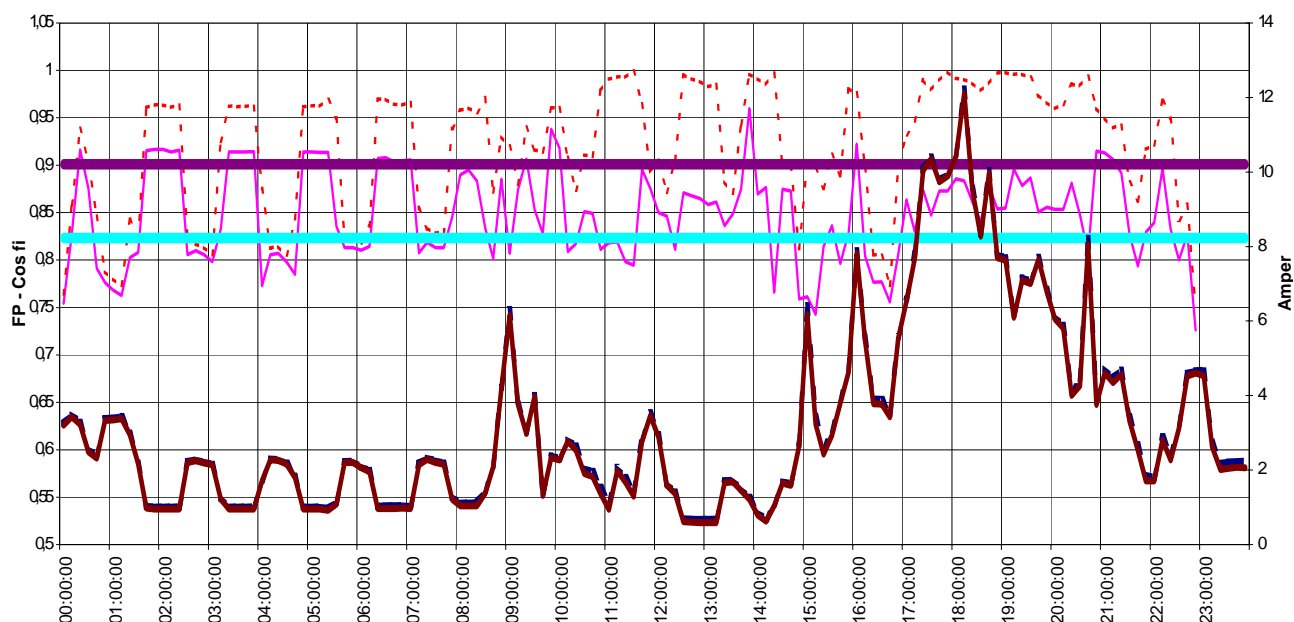


Fig. 6 Curva de carga diaria para un día hábil de un consumo residencial

VI. LA MEDICIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Con la desregulación del Mercado Eléctrico Argentino y la privatización de las empresas, se establecieron normativas que dan derecho a las distribuidoras del área metropolitana de Buenos Aires a verificar el factor de potencia y aumentar los cargos por la prestación del servicio eléctrico, de acuerdo al siguiente criterio:

- $\cos \phi < \text{de } 0,85 \text{ hasta } 0,75$:	10%
- $\cos \phi < \text{de } 0,75$:	20%

Para efectuar la determinación del Factor de Potencia el Ente Nacional Regulador de Electricidad (ENRE) autoriza a efectuar mediciones de potencia activa y reactiva. Son al menos cinco mediciones en un periodo no menor de 15 minutos. En este caso el FP deberá ser calculado mediante la expresión:

$$Fp = \frac{\sum^n Pot. activa}{\sqrt{(\sum^n Pot. activa)^2 + (\sum^n Pot. reactiva)^2}}$$

En la práctica se utilizan pinzas que muestran el FP en forma directa en su display.

En forma gradual, las distribuidoras están reemplazando los aparatos registradores de energía de tipo electromagnético, instalados en el sector residencial, por otros electrónicos con capacidad de medición de potencia activa y reactiva. Con estos equipos el ENRE indica que el FP debe calcularse como sigue:

$$Fp = \frac{E_{activa}}{\sqrt{E_{activa}^2 + E_{reactiva}^2}}$$

La expresión anterior, de apariencia simple, trae serias dudas en su aplicación práctica. Todo deriva de la interpretación que se le asigna al valor de la energía reactiva y con que algoritmo se efectúa su cálculo en los registradores electrónicos.

La medición de energía activa en circuitos cuya corriente contiene armónicas no ofrece mayor diferencia si la medimos con un medidor electromagnético o uno electrónico, más allá de alguna diferencia que afecte su exactitud por la presencia de armónicos superiores.

No sucede lo mismo con la energía reactiva. Esta ha sido interpretada de distintas formas por diferentes autores intentando que exprese un valor que tenga en cuenta el desfase y la distorsión. Así, el valor indicado en el display será dependiente de la configuración del algoritmo de cálculo del aparato.

Así las cosas, se deberá tener especial cuidado en los contrastes del instrumental de medida con el

objeto de saber con exactitud que estamos midiendo.

VII. CONCLUSIONES

En la medida en que se siga con procesos de eficiencia energética que retiren carga esencialmente activa (estufas, cocción eléctrica, iluminación incandescente etc), reemplazándola por carga eléctrica de característica distorsiva, el Factor de Potencia seguirá disminuyendo.

Teniendo en cuenta que la disminución de FP trae como consecuencia un menor aprovechamiento de las instalaciones de distribución eléctrica, deberán tomarse medidas para evitar este efecto nocivo.

Aquí se presentan dos opciones:

- 1) La empresa distribuidora exige al cliente que corrija el FP actuando sobre su instalación.
- 2) Es la distribuidora la que se hace cargo de una compensación centralizada cargando los costos en la tarifa que le aplica al cliente.

La primera de las soluciones resulta poco adecuada dada la compleja característica del tema y los pocos conocimientos del cliente o del personal al que puede recurrir para solucionar el problema.

Existe una tercer posibilidad, que es la de actuar por medio de regulaciones comerciales sobre los fabricantes de aparatos de uso hogareño, para conseguir que estos mejoren su factor de potencia. Esta última posibilidad incrementa el costo de los equipos, en algunos casos en forma notable.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. *La distorsión armónica y el factor de potencia en el sector residencial*. Mario Brugnoli, Norberto Lemozy. Séptimas Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica. Gestión de Sistemas de Energía Eléctrica. P391-P396, Leganés. Madrid. España. Julio/2001
2. *Reducción de la carga eléctrica reactiva en el sector residencial*, Brugnoli, M.S. y N. Lemozy, Presentado en AAPURE, Publicado en Megavattos, Buenos Aires, noviembre 1999
3. *La Eficiencia Energética y la Calidad de la Energía Eléctrica*. Lemozy, N., Brugnoli, MS y Almeida, C. VIII Encuentro Regional Latinoamericano de la CIGRÉ (VIII ERLAC), Ciudad del Este, Paraguay, 30 mayo al 3 junio, 1999
4. *Technical Power Quality in Argentina's Electricity Distribution Networks*, Brugnoli,

- M.S. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Roma, Italia. Julio, 1998
5. *La evolución de la calidad de energía en las redes de distribución eléctrica metropolitanas de Bs As.*, Brugnoli, M.S.. Congreso Latino Americano de Distribuição de Energía Eléctrica, San Pablo, Brasil, setiembre, 1998
 6. *Característica de la demanda residencial y su incidencia sobre la calidad de servicio de la Energía Eléctrica.* Brugnoli, M.S., C.G. Tanides y G.S. Dutt. 9º Congreso y Exposición Internacional de la Energía Eléctrica (CEDE/96), Buenos Aires, setiembre, 1996.
 7. *IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations: Effects on Meter Performance and Definitions of Power.* Working group members: R. Arseneau, Y. Baghzouz, J. Belanger, K. Bowes, A. Braun, A. Chiaravalle, M. Cox, S. Crampton, A. Emanuel (Chairman), P. Filipski, E. Gunther, A. Girgis, D. Hart", Shu-Dong He, G. Hensley, D. Iwanusiw, W. Kortebein, T. McComb, A. McEachern, T. Nelson, N. Oldham, D. Piehl, K. Srinivasan, R. Stevens, T. Unruh, D. Williams
 8. *Reactive Power: A misinterpreted quantity?*. Dr. Ir. Jozef Ghijsselen, Inverto N.V. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, July 1993 84 1
 9. *Harmonics and How They Relate to Power Factor.* W. M. Grady and R. J. Gilleskie, Proceedings of PQA93, San Diego, CA, 1993
 10. *Residential Harmonic Loads and EV Charging.* Richard Bass, Ronald Harley, Frank Lambert, Vinod Rajasekaran, Jason Pierce National Electric Energy Testing Research, and Applications Center (NEETRAC)
 11. *Partial Cancellation of Harmonic Currents Caused by Nonlinear Residential Loads.* J.A. Suárez, G.F. Di Mauro, D.O. Anaut y C.A. Agüero. Universidad Nacional de Mar del Plata, Fac. Ingeniería, Depto. Ing. Eléctrica,
 12. *Curvas de Demanda Horaria para Usos Finales de Electricidad en Viviendas y el Potencial para la Gestión de la Demanda.* G.S. Dutt y C.G. Tanides. Grupo Energía y Ambiente, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires Paseo Colón 850, (1063) Buenos Aires (Argentina). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 5, 2001. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184*
 13. *An Investigation of Harmonics Attenuation and Diversity Among Distributed Single-phase Power Electronic Loads.* A. Mansoor W. M. Grady A. H. Chowdhury M. J. Samotyj. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, January 1995 467
 14. *End-use metering campaign in 400 households of the European Community. Assessment of the Potential Electricity Savings.* SUMMARY. EURECO PROJECT
- (1) El Ingeniero Mario S. F. Brugnoli es Director del "Grupo Energía y Ambiente" de la Facultad de Ingeniería de Universidad de Buenos Aires y Director de la carrera de Ingeniería Electricista en la misma casa de altos estudios.

