

ENTREGA 2

# Armónicos y Electrónica de Potencia

Elaborado Por: Gonzalo Casaravilla, Virginia Echinope, y Daniel Slomovitz, todos de la Instituto de Ingeniería Eléctrica Universidad de la República, Uruguay

## IV. Método alternativo de medir THD

Como se estableció en el apartado II en el mercado abundan los equipos que miden en el dominio de la frecuencia. En general utilizan expresiones del tipo mostrado en (3) lo cual presenta problemas si existen interarmónicos o si la frecuencia distorsionante supera el rango de medida del equipo, por ejemplo  $n = 50$  para el A (2500Hz para  $f=50$ Hz).

Una alternativa sería medir la THD a partir de su verdadera definición: "valor relativo al primer armónico del residuo armónico". Bastará medir indirectamente el residuo armónico restándole al valor eficaz de la onda el valor eficaz del primer armónicos tal a lo que establece (5)

$$THD = \frac{\sqrt{V_{eff}^2 - V_1^2}}{V_1} \quad (5)$$

En (6) se muestra finalmente la incertidumbre en la medida de la THD a partir de las medidas y las incertidumbres de medida de  $V_{eff}$  y  $V_1$  respectivamente.

$$u_{THD}^2 = \left(\frac{THD^2 + 1}{THD}\right)^2 \frac{1}{V_1^2} u_{V_1}^2 + \frac{V_{eff}^2}{THD^2 V_1^4} u_{V_{eff}}^2 \quad (6)$$

Al comparar (4) y (6), es fácil observar que la incertidumbre del método alterna-

<sup>8</sup> Para estimar la incertidumbre expandida de medida se usa como criterio un factor de cobertura de  $K=3$  que asegura con un 99.5% de probabilidad que la medida esté en el rango considerado. Por lo tanto la incertidumbre expandida será  $3u$  [13].

tivo puede ser más grande que del método tradicional. Debe hacerse notar que (6) se calcula asumiendo que no existe correlación entre  $V_1$  y  $V_{eff}$ . En la mayoría de los casos reales si existe esta correlación resultando menor la incertidumbre total de medida que la expresada por (6).

De cualquier modo el método alternativo propuesto tiene la ventaja de considerar todo el residuo armónico, incluidos interarmónicos.

## V. Medidas realizadas

A los efectos de evaluar la capacidad de medida de armónicos individuales y THD del equipo A se realizaron dos conjuntos de medidas.

Por una parte medidas con una onda de tensión cuadrada generadas con un generador de onda considerado estable.

Por otra parte se midió la THD por el método alternativo propuesto a una onda sinusoidal de 50 Hz contaminada con una senoide de frecuencia variable en el rango 100 Hz a 15 kHz.

## A. Medidas realizadas en una onda cuadrada

El montaje de laboratorio que se utilizó es el mostrado en la Fig. 2

El procedimientos de medida y cálculo consistió en la evaluación del valor probable (media) e incertidumbres [13] en la medida efectuada por el A. Se tomaron 20 muestras consecutivas espaciadas 10 segundos a las que se le calculó estadísticamente su valor medio e incertidumbre. Los cálculos estadísticos se realizaron con el PC luego de adquirir los datos del A mediante su interface GPIB.

En el caso de una onda cuadrada, el contenido armónico de los armónicos impares es inversamente proporcional al índice de los armónicos y los pares son nulos.

En la Fig. 3 se muestran las medidas obtenidas para los armónicos IMPARES. En la gráfica del medio se aprecia que el módulo escalado (multiplicar el módulo por  $n$ ) es aproximadamente constante tal como es de esperar. En la parte inferior se grafican las incertidumbres expandidas<sup>8</sup> obtenidas a partir de las medidas de realizadas y de las es-

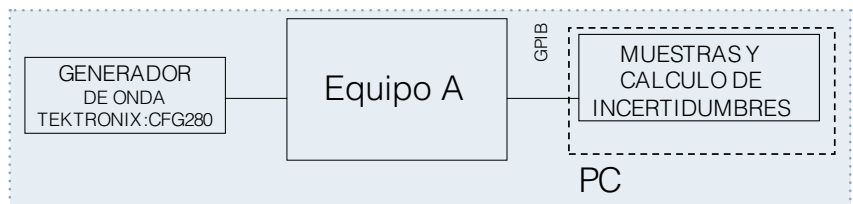


Figura 2. Esquema de adquisición y cálculo

# En el 2010...

Se cumplen 200 años de  
la Revolución de Mayo...



... y 45 años que Electro Tucumán  
Revolucionó el mercado eléctrico!



**Todo lo que usted necesita Electro Tucumán lo tiene!**

- VARIEDAD DE MARCAS
- AMPLIO STOCK
- ENTREGA INMEDIATA Y SIN CARGO EN CAPITAL Y GRAN BUENOS AIRES
- ASESORAMIENTO A CARGO DE ESPECIALISTAS
- ELECPLUS: PROGRAMA DE RECOMPENSAS PARA CLIENTES
- SHOWROOM DE ILUMINACIÓN
- CURSOS GRATUITOS DE ELECTRICIDAD E ILUMINACIÓN
- ESTACIONAMIENTO EXCLUSIVO PARA CLIENTES EN SARMIENTO 1355



**ELECTRO  
TUCUMAN S.A.**

Sarmiento 1342 - Ciudad Auton. Bs. As.  
Tel.: 0054 11 4371-6288 líneas rotativas  
Fax: 0054 11 4371-0260

[electro@electrotucuman.com.ar](mailto:electro@electrotucuman.com.ar)  
[etventas@electrotucuman.com.ar](mailto:etventas@electrotucuman.com.ar)  
[www.electrotucuman.com.ar](http://www.electrotucuman.com.ar)

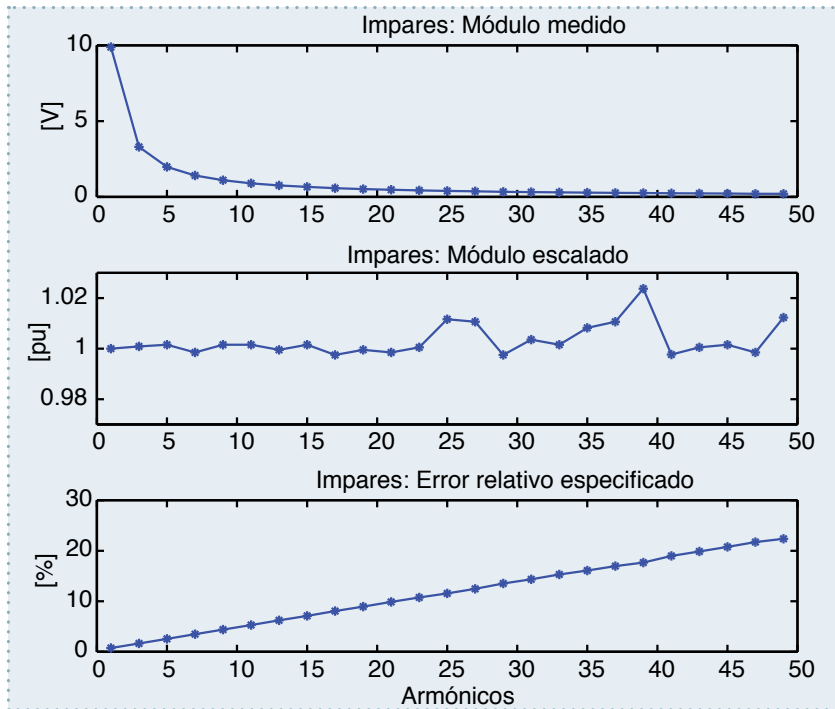


Figura 3. Medidas obtenidas con el A. Armónicos IMPARES. Arriba: Módulo. Al medio: Escalado (Módulo\*armónico) del módulo medido. Abajo: Incertidumbre extendida de la medida a partir de las medidas y las especificaciones de exactitud del A.

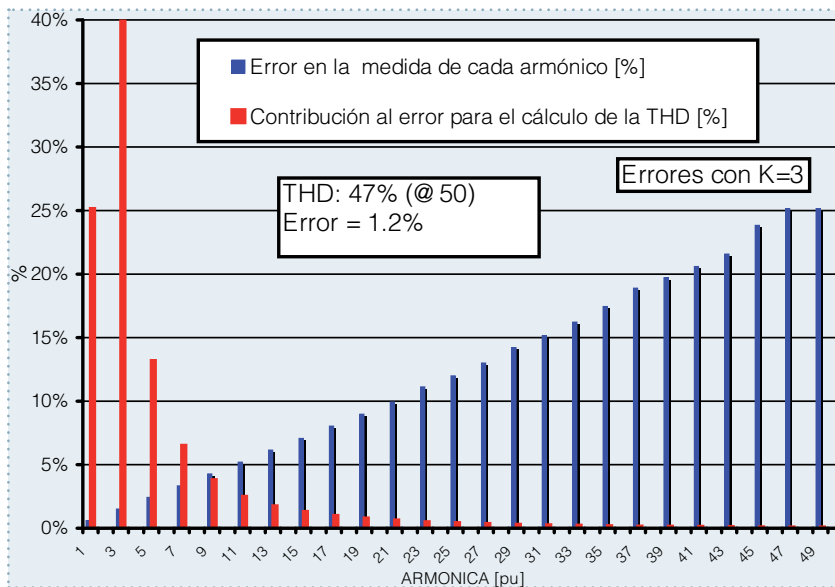


Figura 4. Onda cuadrada. Cálculo de la THD (47.4%) a partir de los valores medidos con el A. Gráfica del error relativo especificado por el A para cada armónicos y peso relativo en el cálculo del el error de medida de la THD (1.2%) de cada armónico de acuerdo a la propagación de la incertidumbre de medida de cada armónico.

pecificaciones de exactitudes<sup>9</sup> del A. Se destaca que la incertidumbre expandida de la medida en esta forma

de onda del armónico 50, llega a valer 25%. Esta situación es normal en ondas “reales” en donde el contenido ar-

mónico es inversamente proporcional al índice del armónico y se debe utilizar en la etapa A=D un rango de medida adecuado para el primer armónico, haciendo que la incertidumbre de cuantificación y redondeo en el A tome valores significativos frente al pequeño (relativo al primer armónico) valor realmente presente en la onda medida.

1) Incertidumbre en el cálculo de la THD

Para evaluar esta incertidumbre se recurre a (4). Los valores  $u_i$  se estiman a partir de la incertidumbre expandida de medida mostrados en la Fig. 3 (abajo) como ya se ha especificado. Luego de obtenida la  $u_{THD}$  se estimó la incertidumbre expandida, resultando en 1.2%. Si se tienen en cuenta las grandes incertidumbres con que se miden los armónicos (25% para el armónico 50), la clave para explicar el resultado es la propagación de incertidumbres utilizada. Si bien el armónico 50 tiene gran incertidumbre, su peso relativo en el resultado final es despreciable. En la Fig. 4 se grafican las incertidumbres expandidas de medida en la medida de los contenidos armónicos y su contribución relativa en la conformación del 1.2% obtenido.

En la Fig. 5 se observa cómo cambia el valor obtenido para la THD de acuerdo a los armónicos considerados y la diferencia con el valor obtenido calculando la THD con 50 armónicos (THD@50). Por ejemplo si se calculara la THD utilizando solamente hasta el armónico 15, se obtiene un resultado de 45.1% con una incertidumbre expandida de 4.9% lo cual puede ser admisible en el marco de una reglamentación sobre calidad de energía eléctrica. Si se toma el valor 40 que la mayoría de las normas establecen, la incertidumbre expandida es de 0.6%. Claramente y teniendo en cuenta la incertidumbre adicional ya reseñado que se introduce con los TI y TT no parece tener sentido considerar tantos armónicos.

Tampoco tiene sentido considerar tantos armónicos si se tiene en cuenta que la THD teórica de una onda cuadrada

<sup>9</sup> Se asume que la exactitud con que el fabricante da los datos corresponde a una incertidumbre expandida con un factor de cobertura de K=3. Por lo tanto la incertidumbre de medida será la exactitud dada por el fabricante dividido 3.



Conduciendo la Energía y las Comunicaciones  
a todos los rincones del país



[www.prysmian.com.ar](http://www.prysmian.com.ar)

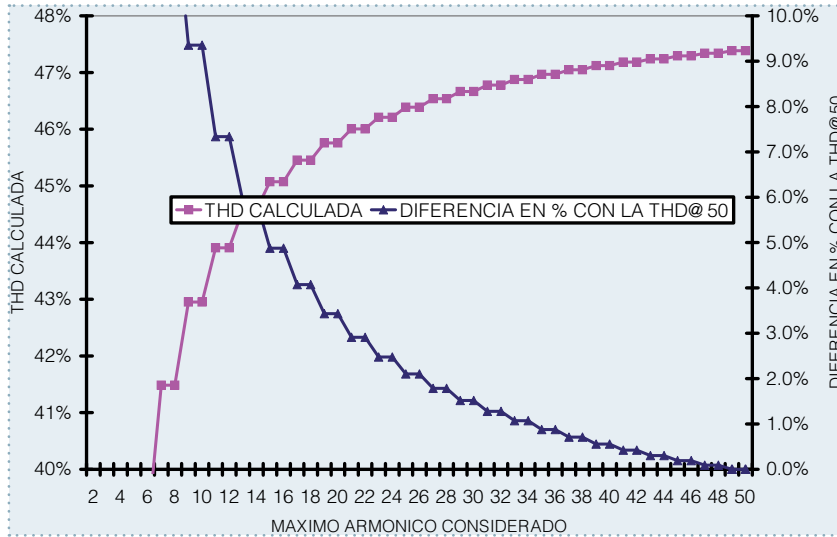


Figura 5. Cálculo de la THD tomando en consideración hasta cierto armónico y diferencia porcentual con la THD@50.

es 48.3% considerando todo el residuo, por lo que el valor obtenido con 50 armónicos (47.4%) dista aun un 2% de dicho valor.

Finalmente si se calcula para este caso la THD con el método alternativo propuesto el resultado da 47.5% (1.6% menor que el valor teórico).

### B. Medidas realizadas de la THD por el método alternativo propuesto

El equipo A tiene dos modos de funcionamiento. Cuando está en modo “armónicos”, además de calcular el valor de los armónicos 1 a 50, calcula el valor eficaz de la onda a partir de los valores obtenidos de los armónicos como expresa (3). Asimismo calcula la THD también a partir de los armónicos calculados. Por otra parte en modo “normal” calcula el valor eficaz a partir como la integral del valor cuadrático en un periodo.

A los efectos de analizar y comparar cómo funcionan otros equipos, se midió valor eficaz con un B y valor eficaz, fundamental V1 y THD con los equipos C, D y E. La onda medida tenía un fundamental de 50 Hz de 6 V y un armónico de 2.88 V al que se le varió la frecuencia en el rango 100 Hz a 15 kHz. Con estos valores, el valor eficaz teórico de tensión sería  $p(6^2 + 2 \cdot 882) = 6:66V$  y la THD sería 48%.

La Tabla I muestra los resultados obtenidos. Se puede ver que el equipo A (en modo “normal”) y el B calculan bien en todos los casos (hasta los 15kHz analizados) el valor de la  $V_{\text{eff}}$ . También los equipos A, C, D y E calculan bien el fundamental de tensión en todos los casos. También estos últimos equipos calculan bien el  $V_{\text{eff}}$  hasta el rango para los cuales están especificados (2500 Hz, 1500 Hz y 2500 Hz y 3000 Hz respectivamente). Por otra parte, no calculan el adecuadamente el valor de  $V_{\text{eff}}$  ni de la THD a partir de dichas frecuencias en virtud de haberse superado la frecuencia hasta la que miden de acuerdo a las especificaciones de los mismos. En lo que refiere a interarmónicos los equipos A y E son capaces de medir correctamente la THD aun en el ca-

so del interarmónico 1025Hz mientras que los equipos C y D no miden la verdadera THD de la señal en este caso.

Estas tres últimas verificaciones se deben a diferentes razones.

En el caso del equipo A en modo “armónicos” y el E, calculan el  $V_{\text{eff}}$  a partir de los armónicos, pero como logran medir (o estimar) bien estos, incluso en presencia de interarmónicos, no tienen problemas hasta que se supere su máxima armónica calculada. Por otra parte los equipos C y D calculan el  $V_{\text{eff}}$  a partir de la integral cuadrática de los valores muestreados por lo que no tienen problemas hasta que se supera la frecuencia del filtro anti aliasing que tienen por encima de la frecuencia máxima para la cual están especificados.

Queda claro que si se utiliza el método propuesto en el apartado IV, con todos los equipos se podrá medir bien el valor del fundamental. En los que también miden bien el valor de  $V_{\text{eff}}$  se podrá medir (calcular) bien la THD hasta frecuencias tan altas como 15kHz aun en presencia de interarmónicos. En el caso del equipo A se tendrá que apelar a una medida en modo “normal” para medir  $V_{\text{eff}}$  por encima de 2500 Hz y en el modo “armónicos” para medir  $V_1$ . En todos los demás casos hasta las frecuencias hasta la que están especificados se calculará bien la THD ya que mide bien  $V_{\text{eff}}$  y  $V_1$ .

Finalmente en presencia de frecuen-

Arm.	A			B			C			D			E		
Hz	V <sub>eff</sub>	V1	THD	V <sub>eff</sub>	V <sub>eff</sub>	V <sub>eff</sub>	V1	THD	V <sub>eff</sub>	V1	THD	V <sub>eff</sub>	V1	THD	
100	6,7	6,0	48%	6,7	6,7	6,7	6,0	48%	6,7	6,0	48%	6,7	6,0	48%	
500	6,7	6,0	48%	6,7	6,7	6,7	6,0	48%	6,7	6,0	48%	6,7	6,0	48%	
1000	6,7	6,0	48%	6,7	6,7	6,7	6,0	48%	6,7	6,0	48%	6,7	6,0	48%	
1025	6,7	6,0	48%	6,7	6,7	6,7	6,0	5%	6,7	6,0	0%	6,7	6,0	48%	
1500	6,7	6,0	48%	6,7	6,7	6,7	6,0	48%	6,7	6,0	48%	6,7	6,0	48%	
2400	6,7	6,0	48%	6,7	6,7	6,2	6,0	1.5%	6,7	6,0	48%	6,7	6,0	48%	
2600	6,0	6,0	<1%	6,7	6,7	6,0	6,0		6,7	6,0	<1%	6,7	6,0	48%	
10000	6,0	6,0	<1%	6,7	6,7	6,0	6,0		6,0	6,0		6,0	6,0	0%	
15000	6,0	6,0	<1%	6,7	6,7	6,0	6,0		6,0	6,0		6,0	6,0	0%	

Tabla 1. Medidas con varios equipos de  $V_{\text{eff}}$ ,  $V_1$  y de THD en una forma de onda compuesta por un fundamental de 50 hz de 6 v y una armónica o interarmónica de entre 100 hz y 15 khz de 2.88 V.

# STECK

## LÍNEA CHALLENGER PROTECCIÓN & CONTROL



CONTACTORES - MINICONTACTORES - RELES TÉRMICOS - ARRANCADORES & GUARDAMOTORES TERMOMAGNÉTICOS



### 1 - Serie SC1 - Contactores de Potencia

Tensión de Trabajo Nominal hasta 690V  
Corriente de Trabajo Nominal de 9 hasta 95A (AC-3)

### 2 - Serie SC2 - Contactores de Potencia

Tensión de Trabajo Nominal hasta 1.000V  
Corriente de Trabajo Nominal de 115 hasta 630A (AC-3)

### 3 - Serie SC6 - Mini Contactores

Tensión de Trabajo Nominal hasta 690V  
Corriente de Trabajo Nominal 6 a 9A (AC-3)  
Potencia hasta 4Kw

### 4 - Serie SR2 - Relevadores Térmicos

Tensión de Trabajo Nominal hasta 1.000V  
Rango de ajuste regulable: 0,1 hasta 93A  
Montaje en riel DIN o pegada al contactor

### 5 - Serie SRC6 - Contactores Auxiliares

Tensión de Trabajo Nominal hasta 690Vca (AC-15)  
Tensión de Trabajo Nominal hasta 230Vcc (DC-13)

### 6 - Guardamotor

Tensión de Trabajo Nominal hasta 690V  
Corriente de Trabajo Nominal de 0,16 hasta 80A  
Térmico regulable para diversos rangos  
Accesorios: bobinas de disparo y contactos auxiliares

### 7 - Arrancadores Eléctricos

Potencia de 0,23 hasta 60CV  
Configuraciones de arranque: directa,  
trifásica/monofásica y estrella delta



línea  
**Challenger**

Steck Electric S.A.  
Bellsario Hueyo 165 (B1870BNA) Avellaneda  
Prov. de Buenos Aires - Argentina  
Tel/Fax: (011) 4201-1489/8396  
Email: [ventas.ar@steck.com.br](mailto:ventas.ar@steck.com.br) - [www.steck.com.br](http://www.steck.com.br)

# STECK

cias superiores a los rangos de los equipos se deberá apelar a un equipo adicional que mida el  $V_{\text{eff}}$  sin filtros del tipo anti aliasing o similar como por ejemplo el equipo B.

## Vi. Conclusiones

Se ha analizado el funcionamiento de un medidor de armónicos digital basado en conversión A=D y posterior cálculo del contenido armónico mediante métodos FFT.

A los efectos de evaluar experimentalmente las dificultades para medir armónicos individuales y THD, se realizaron medidas sobre ondas conocidas con contenido armónico diverso.

En particular en una onda cuadrada que presenta una situación común de la realidad como ser la existencia solamente de armónicos impares y con decaimiento inversamente proporcional a la frecuencia (rectificadores convencionales).

Se analizó la propagación de incertidumbres resultante de aplicar el método usual de cálculo de THD a partir de las armónicas individuales y para el método de cálculo alternativo propuesto. Se mostró cómo inciden los diferentes armónicos en su estimación e incertidumbre. Se mostró lo infructuoso que es utilizar demasiados armónicos a los efectos de calcular la THD por el método tradicional a partir de las armónicas calculadas. Podrán alcanzar los primeros 15 armónicos (750 Hz). Esto es consistente con las propias limitantes que introducen los TI y TT.

Por otra parte se mostró como diferentes equipos pueden tener o no problemas para medir armónicos y THD en los sistemas eléctricos donde aparecen armónicos mayores a 750 Hz. Se concluye que el método de medida alternativo propuesto ofrece en todos los casos una mejor detección de problemas que con equipos convencionales a partir de cálculos FFT.

Hoy en día todos los inversores conectados a las redes eléctricas (Filtros Ac-

tivos, STATCOM, UPFC, BESS, Generación Distribuida, etc.) producen en el sistema eléctrico armónicos que pueden ir desde 1 kHz a 10 kHz e incluso hasta 15 kHz. Por lo tanto, una reglamentación también debe estar atenta hasta estas frecuencias. En la medida que aparezcan en el espectro con valores apreciables (y no inversamente proporcional a la frecuencia), podrán ser medidas con equipos convencionales con incertidumbres adecuadas. Sin embargo, medir un armónico 200 (10 kHz) parecerá estar fuera del rango de medida de los equipos comerciales ya que estos llegan hasta 2.5 kHz (consistente con lo establecido por la norma IEC6100-4-7).

Atentos a poder regular problemas de armónicos hasta valores tan grandes como 15 kHz (armónicas e inte-

ramónicas), quizás sea el momento de cambiar el paradigma de medida de la THD. Hay que volver a su definición primigenia considerada: residuo/fundamental. Medir fundamental es trivial, medir residuo es tan simple cómo medir el valor eficaz y restarle el fundamental medido. De esta forma se mide todo, armónicos, interarmónicos y el ancho de banda que cubre dependerá de la habilidad de medir valor eficaz en forma correcta. Los equipos analizados no tuvieron problemas en su rango previsto. Evidentemente el cálculo del valor eficaz no deberá ser hecho en este caso a partir de sus componentes armónicas. Quizás el comentario incluido en la IEC61000-2-2 respecto al uso de la medida de la desviación instantánea respecto a la fundamental (indica que es raro su uso) deba ser revisada. ■

## Referencias

- [1] H. Akagi, New trends in active filters for power conditioning., IEEE Trans. on Ind. Applications, vol. Vol. 32(6), pp. 1312.1322, 1996.
- [2] D. Slomovitz, "Están las empresas eléctricas computando correctamente el factor de potencia a sus usuarios" IEEE Enc. Inst. y Med. Sec. Uruguay, 1999.
- [3] "IEC 61000-1," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 1992, electromagnetic Compatibility (EMC): General Considerations, Definitions and terminology.
- [4] ENRE, "Decreto 99/97," 1997, ente Nacional Regulador de la Electricidad de Argentina.
- [5] "Base metodológica para el control de la emisión de perturbaciones, producto t'ec. - etapa dos," 1997, Ente Nacional Regulador de la Electricidad de Argentina.
- [6] ONS, "Submodulo 2.2. padroes de desempenho da rede basica.. 2002, operador Nacional Do Sistema Elctrico de Brazil.
- [7] "Submodulo 3.8. requisitos minimos para a conexao a rede basica," 2002, operador Nacional do Sistema Elctrico de Brazil.
- [8] "IEC 61000-2-2," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 1990, electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2-2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.
- [9] "IEC 61000-4-7," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 1991, electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-7: General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentatio, for power supply systems and equipment connected thereto.
- [10] "IEC 61000-2-4," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 1994, electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2-4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances + corrigendum 1994.
- [11] "IEC 61000-3-2," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 2001, electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current lower than 16A per phase).
- [12] "IEC 61000-3-4," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 1998, electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A.
- [13] BIPM, ISO, and IFC, "Guide to the expression of uncertainty in measurements" 1995.
- [14] G. Casaravilla and V. Echinope, "Armónicos y electrónica de potencia," in 1as. Jornadas de Electrónica Industrial Y Control Automático -Uruguay, 2004.
- [15] D. Slomovitz, Mediciones Eléctricas. IEEE - Región Latinoamérica.,2005, ISBN: 07803-8395-8.

Naturalmente cerca tuyo.

Por naturaleza tenemos la mejor atención y un excelente servicio para empresas, arquitectos, constructoras y público en general.

:: Todas las marcas

:: Entregamos sin cargo en Capital Federal y GBA



**Entrega EXPRESS 24 hs.**

:: Venta y asesoramiento telefónico permanente

:: Amplio show room de iluminación y materiales

Cotización ONLINE en [www.paternalsr.com.ar](http://www.paternalsr.com.ar)

NUEVO  
SERVICIO



Materiales  
Eléctricos e  
Iluminación

Av. Álvarez Jonte 1902 (C1416EXR) C.A.B.A.

Tel 4584 2454 + 4585 1326 ☎ Fax 0800 555 5728

[www.paternalsr.com.ar](http://www.paternalsr.com.ar) 📧 [ventas@paternalsr.com.ar](mailto:ventas@paternalsr.com.ar)

