

# Armónicos y Electrónica de Potencia

Gonzalo Casaravilla

Instituto de Ingeniería Eléctrica  
Universidad de la República - Uruguay  
gcp@fng.edu.uy

Virginia Echinope

Instituto de Ingeniería Eléctrica  
Universidad de la República - Uruguay  
echinope@fng.edu.uy

Daniel Slomovitz

Instituto de Ingeniería Eléctrica  
Universidad de la República - Uruguay  
d.slomovitz@ieee.org

**Abstract**—El presente trabajo plantea el desafío que representa la medida de armónicos en los sistemas eléctricos en un escenario de explosivo crecimiento de equipos basados en electrónica de potencia. Se analiza el marco normativo internacional concluyéndose que debe cambiar sus paradigmas a mediano plazo. A los efectos de evaluar el comportamiento de equipos convencionales que miden armónicos se analiza el modelo de adquisición y medida de un ejemplo concreto. En particular se analiza el modelo de incertidumbres asociados con la adaptación de señales, digitalización y cálculo. Realizadas medidas reales en una onda de espectro conocido se concluye sobre los problemas que presentan estos equipos para medir armónicos con valor relativo reducido respecto al fundamental. Asimismo se analiza la pertinencia de calcular la distorsión armónica total (*THD*) a partir de determinada cantidad de armónicas. Finalmente se propone una forma alternativa a la clásica de medir la *THD* en la cual se pueda contemplar la creciente existencia de equipos de electrónica de potencia que llegan a producir armónicos o interarmónicos fuera del rango de los equipos convencionales de medida.

## I. INTRODUCCIÓN

Desde hace más de 40 años, el desarrollo tecnológico de la electrónica de potencia ha contribuido a proliferar las cargas no lineales en la red de transmisión o distribución de energía eléctrica. Tanto simples dimmers de algunos *VA* como complejas estaciones de sistema *HVDC*<sup>1</sup> de hasta miles de *MW* son responsables de producir corrientes no puramente sinusoidales de la frecuencia de red. Estas corrientes perturbadoras son de frecuencias superiores (armónicas) o inferiores (subarmónicas) de la frecuencia de red pero también pueden tomar valores interarmónicos.

Los armónicos de corriente emitidos por una carga perturbadora se transforman en armónicos de tensión en los sistemas de distribución. Se generan pérdidas adicionales en líneas y transformadores, deterioro y destrucción de condensadores de compensación de reactiva. Se producen resonancias de estos condensadores con la impedancia de corto circuito en el punto de conexión que no hacen otra cosa que propagar el problema.

Desde un punto de vista general, las cargas perturbadoras se pueden clasificar en identificables y no identificables [1].

Rectificadores de grandes potencias con diodos o tiristores (electrólisis, hornos de arco de continua, controles de velocidad de motores, *UPS*<sup>2</sup>, *HVDC*), cicloconvertidores, hornos

de arco de alterna, sistemas *SVC*<sup>3</sup>, *STATCOM*<sup>4</sup>, *TCSC*<sup>5</sup>, *UPFC*<sup>6</sup>, *BESS*<sup>7</sup>, etc. son típicamente los identificables. Las empresas de energía eléctrica conocen generalmente su existencia y ubicación.

Por el contrario, las pequeñas cargas no lineales distribuidas en el sistema eléctrico son imposibles de ubicar. El rectificador de entrada de un pequeño electrodoméstico produce muy poca corriente armónica, pero miles distribuidos en una ciudad se transforman en un problema. Problema que se agrava ya que generalmente los armónicos que emiten están en fase.

El problema empeora si se considera que los equipos que miden la energía a los efectos de su facturación, no manejan bien el problema de cargas desbalanceadas y con corrientes distorsionada [2].

La respuesta formal a este problema está parcialmente contemplada en la normativa internacional sobre Compatibilidad Electromagnética (*EMC*) encabezada por la norma IEC61000-1 [3]. En forma genérica el objetivo de las normas de *EMC* es que los distribuidores entreguen tensiones con determinadas características y que los fabricantes diseñen sus equipos para soportarlas. Por otro lado los clientes y los equipos deben consumir corrientes compatibles con dichos niveles. En definitiva es casi exclusivamente la impedancia de corto circuito en el punto de acoplamiento común (*PCC*) quien determina las tensiones armónicas que surgen como consecuencia de las corrientes armónicas consumidas.

La Unidad Reguladora de los Servicios de Energía y Agua del Uruguay (*URSEA*) tiene previsto poner en consideración pública un reglamento sobre calidad de las perturbaciones en la distribución de energía eléctrica. El Ente Regulador Argentino (*ENRE*) hace varios años que tiene reglamentación en este sentido [4] [5] y tiene experiencia en su aplicación. El Operador Nacional del Sistema Eléctrico de Brasil (*ONS*) tiene reglamentaciones vigentes [6] [7] en vías de ser aplicadas. Estas reglamentaciones no sólo limitan la *distorsión armónica total (THD)*, también establecen límites a la emisión de cada armónica particular.

Cualquiera sea el escenario, en la región se está midiendo o se deberá comenzar a medir armónicos de tensión y corriente en las redes de distribución. Estas medidas se

<sup>1</sup>High Voltage Direct Current transmission line

<sup>2</sup>Uninterruptible Power Supply

<sup>3</sup>Static VAr Compensator

<sup>4</sup>Static Synchronous Compensator

<sup>5</sup>Thyristor Controlled Series Capacitor

<sup>6</sup>Unified Power Flow Controller

<sup>7</sup>Battery Energy Storage System

utilizarán para decidir o no la aplicación de penalizaciones a empresas distribuidoras o consumidores individuales por lo tanto es de vital importancia saber cómo medir armónicos y con qué incertidumbre de medida se hace. Todo esto utilizando medidores convencionales con la tecnología disponible y a precios competitivos. Las especificaciones y requerimientos de los equipos de medida de armónicos que se establezcan en las reglamentaciones deben ser razonables. ¿Es razonable pedir en una reglamentación medir hasta el armónico 40? ¿Se está especificando bien cómo se debe medir la *THD*? ¿Están cubiertos por las normas y reglamentaciones los casos de equipos de electrónica de potencia que emiten en el armónico 200 (10 kHz) o hasta el 300 (15 kHz)?

## II. LA NORMATIVA INTERNACIONAL Y LOS ARMÓNICOS

La norma IEC61000-2-2 [8] establece dos formas de medir la *THD* en las tensiones de redes de baja tensión (*BT*). Midiendo la desviación instantánea respecto a la fundamental (indica que es raro su uso) o calculando el residuo armónico a partir de los valores medidos de las armónicas individuales. En este último caso indica que se *puede* utilizar hasta el armónico 40 inclusive. No incluye en el cálculo a las interarmónicas. Esta norma indica valores máximos de armónicas individuales y establece que la norma cubre hasta tensiones armónicas de 10kHz. Si bien no lo indica expresamente, al momento de medir armónicos se debe recurrir a lo que establece la norma IEC61000-4-7 [9] pero ésta dice que es aplicable hasta 2.5kHz. Queda la duda como medir entre 2.5kHz y 10kHz. Por otra parte si un equipo emite en 15kHz (armónica 300 para 50Hz) no sería abarcado por estas normas.

En el caso de redes en plantas industriales se debe aplicar la norma IEC61000-2-4 [10] que establece, según el entorno, niveles más estrictos o más tolerantes que la IEC61000-2-2. A diferencia de esta última faja sin permitir dudas en 40 la máxima frecuencia armónica para calcular la *THD* e introduce cómo novedad que para el cálculo hay que considerar las interarmónicas. Tampoco indica cómo calcular la *THD*. Valen para esta norma las mismas consideraciones respecto a que no queda claro que hacer para frecuencias mayores que 2.5kHz (armónica 50 para 50Hz).

Por otra parte la norma IEC61000-3-2 [11], aplicable en *BT* y corrientes menores a 16A, establece límites a la emisión de corrientes armónicas individuales solamente hasta la armónica 40. Nada dice de las superiores. Tampoco establece límite alguno para la *THD* por lo que un equipo que emite una gran corriente en el armónico 41 quedaría impune. Estas posibles omisiones son salvadas en el informe técnico IEC61000-3-4 [12] aplicable en *BT* y corrientes mayores a 16A. En este la *THD* se calcula hasta la armónica 40 pero, al igual que la norma IEC61000-2-2, establece límites individuales para armónicos en todo el rango de aplicación de la norma. Si bien no queda claro hasta que armónico es este rango de aplicación, de cualquier forma refiere la medida a la norma IEC61000-4-7 que, como ya se indicó, es hasta 2.5kHz.

Finalmente la norma IEC61000-4-7 establece límites convencionales en la precisión lograda cuando se utilizan transfor-

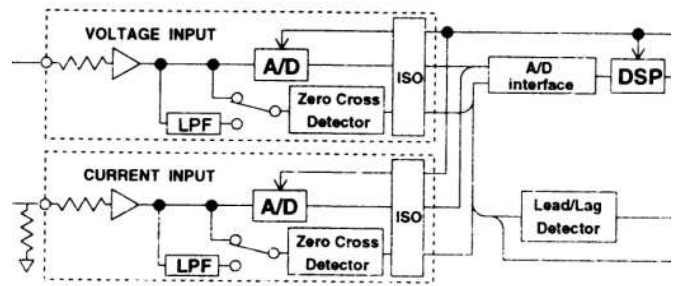


Fig. 1. Diagrama de bloques interno del A

madores de tensión (*TT*) y/o corriente (*TI*). Con la consigna de no tener un error de medida mayor a 5% en amplitud y 5° en la fase relativa al fundamental, establece que en *BT* no hay problemas en el rango aplicable (2.5kHz). En *MT*, los *TI* están serían adecuados hasta 1kHz en lo que refiere a medida de amplitud y hasta 700Hz en lo que refiere a errores de fase relativa. Finalmente en *MT* los *TI* estarían excluidos por encima de 1.5kHz para la medida del ángulo de fase.

En definitiva, siguen pendientes las preguntas planteadas al final del apartado I. La electrónica de potencia produce problemas fuera del alcance de las normas convencionales y hasta se tienen problemas al momento de medir los mismos. Problemas en los *TI* y *TT*, pero también problemas en los equipos convencionales de medida de armónicos.

La norma IEC61000-4-7 establece cómo deben medirse armónicos e interarmónicos. En particular destaca la existencia de equipos de medida de estas variables en el dominio del tiempo y en el dominio de las frecuencias. En este trabajo se analizará el segundo tipo por ser los más comunes en el mercado. Básicamente esto obedece a su bajo precio comparativo ya que se reducen a complejos (pero económicos) sistemas digitales y cada vez menos circuitos analógicos.

Los equipos en el dominio de la frecuencia se basan en la digitalización de señales continuas y posterior cálculo de las componentes de la *Transformada Discreta de Fourier (DFT)* y utilizan métodos de cálculo optimizados desde el punto de vista del esfuerzo de cálculo denominados *Transformada Rápida de Fourier (FFT)*.

## III. UN EJEMPLO DE EQUIPO DE MEDIDA: EL A

El diagrama de bloques del equipo A mostrado en la Fig. 1 es el de un equipo convencional en donde se identifican los bloques de acondicionamiento de la señal para adaptarla a niveles normalizados, posibilidad de filtrado (LPF) de la señal a los efectos de la sincronización (Zero Cross Detector o *PLL*), conversión A/D, aislamiento galvánico (indicado como ISO) y procesamiento de señales digitales (*DSP*). No mostrado en el esquema, el equipo también tiene una CPU encargada de la totalidad de procesar las funcionalidades del mismo.

### A. Incertidumbres de medida del A

Un equipo de medida, que tiene como entrada una señal continua real que luego es digitalizada para finalmente hacer

cálculos numéricos y dar un resultado, tiene varios errores que deben ser considerados y que por la naturaleza de los mismos se traducen en incertidumbres del tipo A y B [13]. El error es la diferencia (con signo) entre el valor medido y el valor real. La incertidumbre es el intervalo de duda que se tiene respecto al valor medido y se caracteriza mediante una distribución estadística con determinada desviación experimental.

En [14] se modela aproximadamente para este equipo la incertidumbre de medida de un determinado armónico como

$$u^2 = 2u_{\varepsilon_0}^2 + 7u_{\varepsilon_c}^2 \quad (1)$$

donde por una parte  $u_{\varepsilon_0}$  es la incertidumbre que introduce la etapa de acondicionamiento de señal analógica a los efectos de llevarla a un nivel normalizado previo a realizar la conversión  $A/D$  de esta etapa son del tipo "proporcional" a la magnitud de la señal que está siendo medida. En general se especifican como una incertidumbre relativa a la señal medida (indicado como *rdg* en las especificaciones del  $A$ ). Esta etapa de adaptación de la señal también introduce incertidumbres de medida de *offset* que se traducen en incertidumbres asociados al rango de medida por ser independientes de la magnitud de la señal medida.

Por otra parte se introducen tres tipos de incertidumbres en los sistemas digitales. La de cuantificación que se produce al realizar la transformación análogo-digital y la de redondeo y truncamiento (*overflow*) luego de hacer una cuenta numérica. Este último puede ser evitado y en general es despreciable frente a los de redondeo. Estas incertidumbres son constantes e independientes de la magnitud medida pero sí proporcionales al rango de medida (indicado como *rng* en las especificaciones del  $A$ ). Por lo tanto el segundo término de (1) depende de

$$u_{\varepsilon_c}^2 = \frac{2^{-2b}}{12} \quad (2)$$

que es el valor cuadrático de la incertidumbre de medida de la señal normalizada provocada por la conversión  $A/D$  con  $b$  bits más signo. El valor 7 resulta de considerar el error de la conversión  $A/D$ , el error de redondeo del cálculo  $DFT$ , la propagación de incertidumbres del cálculo  $DFT$ , las operaciones de pasar del valor obtenido por  $DFT$  a armónicos y la incertidumbre que introduce el error de redondeo al pasar al display del equipo (*rng*). En [14] se concluye que del término  $7u_{\varepsilon_c}^2$  asociado al rango de medida, un 29% es responsabilidad de la conversión  $A/D$ , un 57% se debe al cálculo  $DFT$  y el restante 14% es por el hecho de calcular el valor final de la armónica a partir del resultado de la  $DFT$  (básicamente esto último es dividir por la cantidad de muestra que se realizara para calcular la  $DFT$  y por escalar el resultado normalizado al display del equipo.

### B. Incertidumbre en el cálculo de la $THD$ del equipo $A$

El equipo  $A$  da un valor de la  $THD$  en su display pero no da en sus especificaciones la exactitud de la medida. Esto se justifica por la forma en que se debe calcular dicha incertidumbre de medida. Si se observa la definición de la

$THD$  como

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{50} V_i^2}}{V_1} \quad (3)$$

y se realiza el cálculo de la propagación de incertidumbres convencional dada la relación funcional que la determina [13] [15], se arriba a que la incertidumbre de la  $THD$  calculada a partir de las incertidumbres de sus factores ( $u_{V_i}$  y  $u_{V_1}$ ) es

$$u_{THD}^2 = \frac{THD^2}{V_1^2} u_{V_1}^2 + \frac{1}{THD^2 V_1^4} \sum_{i=2}^{50} V_i^2 u_{V_i}^2 \quad (4)$$

El fabricante, por la forma que calcula la  $THD$  a partir del cálculo de armónicas individuales, no conoce a priori cuál será el espectro de la señal medida y por tanto no puede calcular la propagación de la incertidumbre de medida.

### IV. MÉTODO ALTERNATIVO DE MEDIR $THD$

Cómo 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 alternativo 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 sinusoide 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

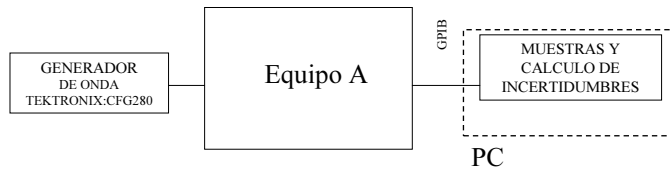


Fig. 2. Esquema de adquisición y cálculo

El procedimiento 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 interfaz GPIB.

En el caso de una onda cuadrada, el contenido armónicos de los armónicos impares es inversamente proporcional al índice del 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 especificaciones de

<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].

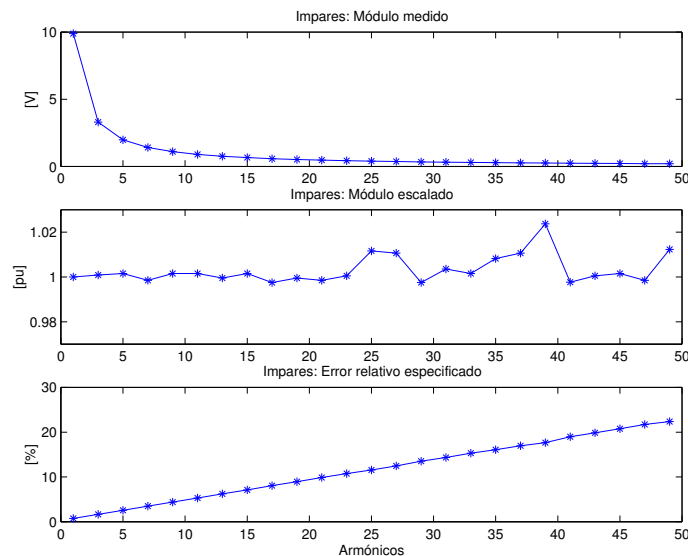


Fig. 3. Medidas obtenidas con el A. Armónicos IMPARES. Arriba: Módulo. Al medio: Escalado (Modulo\*armónico) del módulo medido. Abajo: Incertidumbre extendida de la medida a partir de las medidas y las especificaciones de exactitud del A.

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 armónico 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 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

<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.

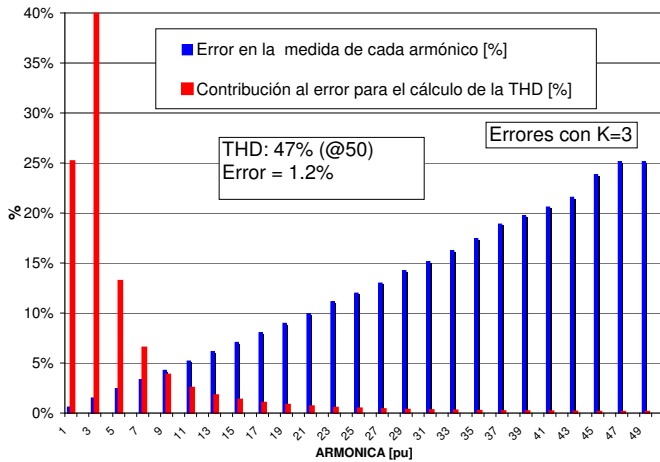


Fig. 4. Onda cuadrada. Cálculo de la  $THD$  (47.4%) a partir de los valores medidos con el  $A$ . Gráfica del error relativo especificado por el  $A$  para cada armónico y peso relativo en el cálculo del error de medida de la  $THD$  (1.2%) de cada armónico de acuerdo a la propagación de la incertidumbre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

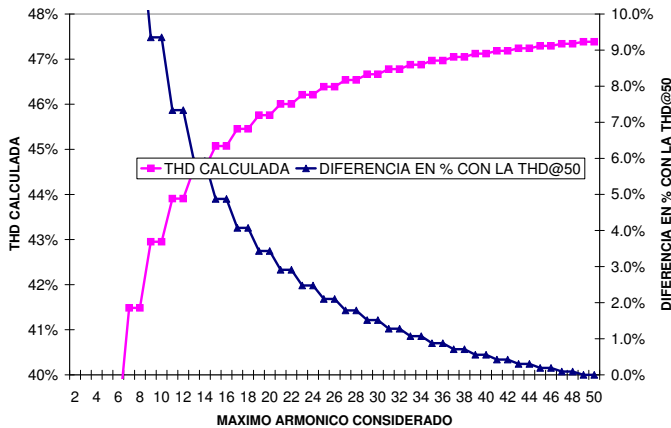


Fig. 5. Cálculo de la  $THD$  tomando en consideración hasta cierto armónico y diferencia porcentual con la  $THD@50\%$ .

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  $V_1$  y  $THD$  con los equipos  $C$ ,  $D$  e  $E$ . 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  $\sqrt{6^2 + 2.88^2} = 6.66V$  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  $V_{eff}$ . También los equipos  $A$ ,  $C$ ,  $D$  e  $E$  calculan bien el fundamental de tensión en todos los casos. También estos últimos equipos calculan bien el  $V_{eff}$  hasta el rango para los cuales están especificados (2500 Hz, 1500 Hz y 2500 Hz

TABLE I

MEDIDAS CON VARIOS EQUIPOS DE  $V_{eff}$ ,  $V_1$  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.

Arm.	A			B			C			D			E		
	Hz	V <sub>eff</sub>	V <sub>1</sub>	THD	V <sub>eff</sub> *	V <sub>eff</sub>	V <sub>1</sub>	THD	V <sub>eff</sub>	V <sub>1</sub>	THD	V <sub>eff</sub>	V <sub>1</sub>	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%	

y 3000 Hz respectivamente). Por otra parte, no calculan el adecuadamente el valor de  $V_{eff}$  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  $A$  e  $E$  son capaces de medir correctamente la  $THD$  aun en el caso 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 debe a diferentes razones. En el caso del equipo  $A$  en modo "armónicos" y el  $E$ , calculan el  $V_{eff}$  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  $V_{eff}$  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  $V_{eff}$  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  $V_{eff}$  por encima de 2500 Hz y en el modo "armónicos" para medir  $V_1$ . En todos los demás casos hasta las frecuencia hasta la que están especificados se calcularía bien la  $THD$  ya que mide bien  $V_{eff}$  y  $V_1$ . Finalmente en presencia de frecuencias superiores a los rangos de los equipos se deberá apelar a un equipo adicional que mida el  $V_{eff}$  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 me-

didadas 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. Podrían 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 Activos, *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) parecería 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 interarmónicas), 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.

## REFERENCES

- [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 téc. - 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 instrumentation, 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.