

# Armónicos y Electrónica de Potencia

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.

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

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.

## 1. 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 HV DC<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 pagar 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>, HV DC), cycloconvertidores, hornos de arco de

alterna, sistemas SV C<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

<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

# SSW 07 Soft-Starter

## Arrancador Suave

new

Protección del motor y arrancador  
By-pass incorporado  
Elevado régimen de arranques/hora



Tensión de operación: 220 hasta 575V  
Corriente: 17 hasta 200A  
By-pass incorporado  
Tamaño reducido  
Elevado régimen de arranques/hora  
Control de las 3 fases  
Minimiza el "golpe de ariete" en bombas  
Protecciones incorporadas para el motor y arrancador  
Operación en ambientes de hasta 55°C sin reducción de corriente  
Función "kick-start" para arranque con cargas de elevada inercia

Transformando energía en soluciones.

[www.weg.net](http://www.weg.net)

### WEG EQUIPAMIENTOS ELÉCTRICOS S.A.

Santiago Pampiglione 4849 • Parque Industrial • (2400) San Francisco (Cba.)  
Tel.: (03564) 421484 • Fax: (03564) 421459 • e-mail: [wegee@weg.com.ar](mailto:wegee@weg.com.ar)  
Chacabuco 314 Piso 8° • C1069AAH Buenos Aires  
Tel.: (011) 4334 1901 • Fax: (011) 4345 6648 • e-mail: [wegba@weg.com.ar](mailto:wegba@weg.com.ar)



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 (UR-SEA) 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 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 fija 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 transformadores 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 TT estarían 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.

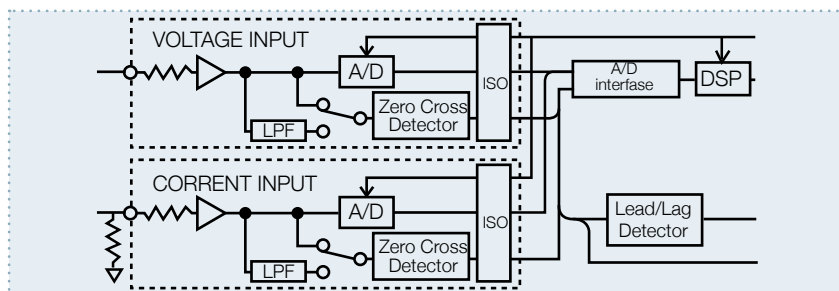


Figura 1. Diagrama de bloques interno del A

# Línea Paso

LA MAYOR VARIEDAD DEL MUNDO

35 modelos diferentes en largo, alto y profundidad



## Cajas plásticas de paso estancas IP 65

Cuerpo y tapa en Polipropileno Blanco reforzado con retardador de llama. Protección UV (solar) y mejorador de impacto. Con tornillos de acero inoxidable imperdibles. Resistente a los 120 °C.

## Línea Paso PRT

Con conos pasacables estancos IP 55



En color blanco y gris.  
Simple y fácil  
de instalar.

Nueva  
PRC1003/81



- Cuerpo con precortado inferior de: 135 mm de largo x 200 mm de alto.
- Tapa de goma precortada.
- Posee 11 orificios para la entrada y salida del cableado que facilitan la instalación.
- Es recomendable para multiviviendas, instalaciones de Internet, computación telefónica, TV, etc.
- Grado de protección IP 55.



INGRESÁ A NUESTRO SITIO  
WEB: [WWW.ROKER.COM.AR](http://WWW.ROKER.COM.AR)  
Y MIRÁ EL VIDEO QUE REALIZARON  
MELINA MARÍN Y RICARDO  
(ELECTROTUCUMÁN)  
PARA ROKER

**ROKER**<sup>®</sup>  
Innovar, mejorar, crecer siempre

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, aislación galvánica (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

$$u^2 = 2u_{\epsilon_0}^2 + 7u_{\epsilon_c}^2$$

donde por una parte  $u_{\epsilon_0}$  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

$$u_{\epsilon_c}^2 = \frac{2^{-2b}}{12}$$

que es el valor cuadrático de la incerti-

dumbre 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  $7u_{\epsilon_c}^2$  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

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{50} V_i^2}}{V_1}$$

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 ( $u_{V_1}$  y  $u_{V_i}$ ) es

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

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

Continuará...



## DIVISIÓN PRODUCTOS ELÉCTRICOS



### SEGURIDAD COMPROMISO TECNOLOGÍA CALIDAD

PVC TECNOCOM Incorpora al mercado productos que garantizan la seguridad de su hogar mediante la fabricación de caños anillados, cajas eléctricas y tubos rígidos doblados en frío en PVC para instalaciones eléctricas. Contamos con Sello de Calidad IRAM y Marca de Seguridad para los caños anillados.

Todos los productos son ignífugos, no inflamables y resistentes a la propagación de la llama. Tienen excelentes propiedades dieléctricas.

Tel.: (54-11) 4848-8000 • [www.tecnocom.com.ar](http://www.tecnocom.com.ar)



Av. Corrientes 5060 C.A.B.A. - Tel.: 4858-1640 / 4854-8672  
[www.lummina.com.ar](http://www.lummina.com.ar) / [ventas@lummina.com.ar](mailto:ventas@lummina.com.ar)