

Medida de energía en condiciones de distorsión y desequilibrio



Carlos Roncero-Clemente*
 María Isabel Milanés-Montero*
 Enrique Romero-Cadaval*
 Eva González-Romera*
 Fermín Barrero-González*

Ingeniero en Organización Industrial
 Doctora Ingeniero Industrial
 Doctor Ingeniero Industrial
 Doctora Ingeniero Industrial
 Doctor Ingeniero Industrial

* Universidad de Extremadura. Escuela de Ingenierías Industriales. Grupo PE&ES. Avda. de Elvas, s/n - 06006 Badajoz. Tfno: +34 924 289300 (ext. 86787). roncero@peandes.unex.es; milanes@unex.es; eromero@unex.es; evagzlez@unex.es; fbarrero@unex.es

Recibido: 14/12/2010 • Aceptado: 21/03/2011

Energy meters quality under distorted and imbalanced systems

ABSTRACT

• Nowadays the study of power quality is a critical issue due to the proliferation of “nonlinear” consumers connected to the grid, most of them electronic loads which produce voltage and current waveforms distortion, causing a worse operation of the power system and leading to higher losses. At present, “bad customers” of power energy are only penalized due to reactive power consumption. The measurement of this consumption is made by using conventional energy meters designed to operate under sinusoidal and balanced systems with parameters within the required limits. In this paper the experimental validation of these devices in low voltage power systems with harmonic distortion and imbalance is carried out. Finally, a new ratio is proposed for the electrical billing, to penalize at the same time the reactive power consumption, the harmonic pollution and the imbalance.

• **Keywords:** Power quality, harmonic distortion, imbalance, power, energy meter, power factor, electrical billing.

RESUMEN

El estudio de la calidad del producto energía eléctrica es fundamental en la actualidad debido al incremento de conexiones a red de consumidores “no lineales”, fundamentalmente compuestos por cargas electrónicas, que distorsionan la forma de onda, tanto de tensión como de corriente, provocando un peor funcionamiento de todo el sistema eléctrico y generando mayores pérdidas. Hoy en día, lo único que está contemplado en la normativa para penalizar a los “malos consumidores” de energía eléctrica es el consumo de energía reactiva. La medida de este consumo se realiza con contadores convencionales, que están diseñados para su funcionamiento dentro de sistemas equilibrados, con formas de onda de tensión y corriente perfectamente senoidales y con parámetros dentro de los márgenes exigidos. En este artículo se estudia experimentalmente la validez de estos dispositivos en el escenario de redes eléctricas de baja tensión en las que hay presentes distorsiones armónicas y desequilibrios. Finalmente, se propone un nuevo ratio a tener en cuenta en la tarifa eléctrica para penalizar

conjuntamente el consumo de potencia reactiva, la polución armónica y el desequilibrio.

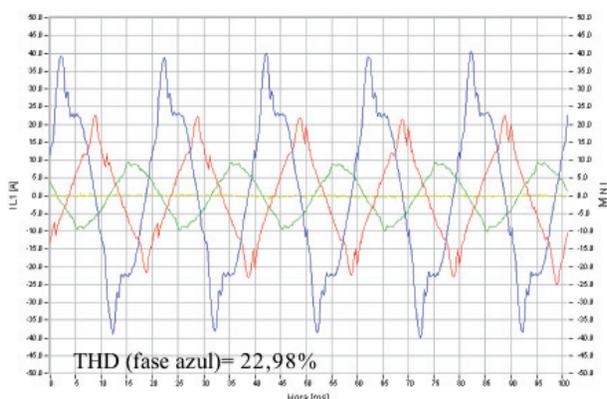
Palabras clave: Calidad de suministro, distorsión armónica, desequilibrio, potencia, contador de energía, factor de potencia, tarifa eléctrica.

1. INTRODUCCIÓN

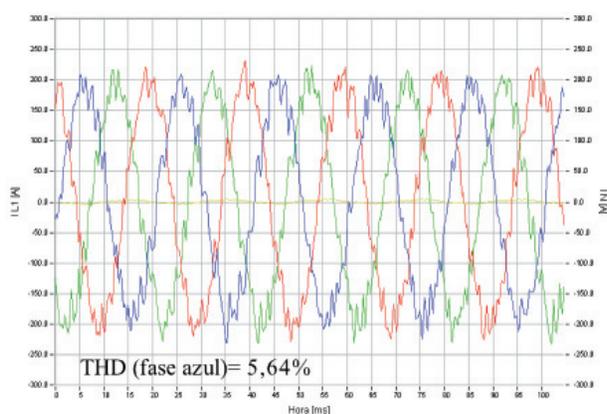
La calidad del suministro eléctrico hace referencia a la forma de onda como uno de los parámetros que actualmente requiere mayor control y exigencia [1], debido al notable aumento de receptores “no lineales”, tanto identificados como no identificados [2], que se han conectado a la red eléctrica en los últimos años. Estos consumidores son principalmente aparatos electrónicos que producen distorsiones en la forma de onda, tanto de tensión como de corriente, dejando ésta de ser perfectamente senoidal, de frecuencia 50 Hz y con la amplitud adecuada. Esto ocasiona disparos de protecciones de líneas debido a sobrecargas en las mismas, cortocircuitos, caídas de tensión y, en

general, un peor funcionamiento de todo el sistema eléctrico, ya que todos los dispositivos de protección y maniobra en las líneas, los conductores y receptores están diseñados para funcionar correctamente dentro de rangos determinados de valores próximos a sus parámetros nominales.

Por otra parte, la proliferación de fuentes de generación distribuida, especialmente plantas de energía solar fotovoltaica conectadas a la red de baja tensión, ha aumentado el contenido armónico en esta red, debido a que los inversores o convertidores DC/AC que inyectan la energía a la red, no lo hacen con la calidad adecuada. Como aportación de datos cuantitativos de la problemática de esta situación de demanda o inyección de corrientes armónicas y desequilibradas, se muestran, a modo de ejemplo, medidas realizadas en un centro de transformación de un núcleo urbano [Fig. 1 (a)], así como las medidas realizadas en una instalación solar fotovoltaica conectada a una red de distribución de baja tensión [Fig. 1 (b)] en las que se indica las tasas de distorsión armónica total de las corrientes medidas.



(a)



(b)

Fig.1: Formas de onda de corriente registradas en la provincia de Badajoz. (a) Centro de Transformación de núcleo urbano. (b) Instalación solar fotovoltaica.

La potencia aparente es una de las magnitudes de mayor uso en los términos de potencia eléctrica. Su significado en sistemas monofásicos y sistemas trifásicos senoidales equilibrados es claro, pero no es así cuando nos encontramos con sistemas distorsionados y/o desequilibrados, donde no hay un acuerdo unánime para definir los términos de potencia. Entre los grupos de investigación que estudian esta problemática cabe destacar el Grupo de Trabajo en situaciones no sinusoidales del *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), que propone definiciones efectivas desde un punto de vista práctico a los términos de potencia que aparecen cuando las tensiones y/o corrientes son distorsionadas y/o desequilibradas. Los resultados de este grupo se han recogido en el estándar IEEE 1459-2010 “*IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions*” [3], recientemente publicado.

Ante esta situación, es fundamental analizar y comprobar la operación de los aparatos de medida de consumo de energía para saber si la medición de potencia, tanto activa como reactiva, que realizan en condiciones de polución armónica y/o desequilibrio, es la correcta cuando se dan estas condiciones y, así, conocer si la facturación que están realizando las compañías eléctricas es la adecuada.

La orden ITC/3519/2009 de 28 de Diciembre [4], revisa las tarifas eléctricas aplicables desde el 1 de enero de 2010 e indica cómo calcular el término de facturación de energía reactiva para suministros efectuados en Baja Tensión con potencia contratada mayor a 10 kW. y en Alta Tensión (Tabla 1).

$\cos \varphi$	€/kVAr	(1)
$0,80 \leq \cos \varphi < 0,95$	0,041554	
$\cos \varphi < 0,80$	0,062332	

Tabla 1: Término de facturación de energía reactiva [4]

Sin embargo la medida del $\cos \varphi$ sólo es válida para cuantificar la potencia reactiva en caso de sistemas monofásicos o trifásicos senoidales equilibrados alimentando a cargas lineales y solamente penaliza la demanda de energía reactiva inductiva, no contabilizándose, en ningún caso, la sobrecompensación de capacitiva. En [5] se presentan varios casos correspondientes a diversas medidas de campo aplicándose la normativa vigente en el año 2003, en la que incluso se bonificaba a los consumidores que tuviesen un $\cos \varphi$ superior a 0,95, demostrándose que en la mayor parte de las facturaciones corresponde un descuento del 4% por energía reactiva; sin embargo, atendiendo a las pérdidas originadas en la línea de distribución de la compañía eléctrica, debería gravarse su consumo con un elevado recargo.

Debido a esta situación, las compañías eléctricas pueden estar interesadas en actualizar los criterios de facturación de la energía eléctrica, pues la inyección de corrientes armónicas y el desequilibrio deberían ser tenidos en cuenta

en la tarificación. Para ello, sería necesario el diseño de aparatos de medida capaces de separar los términos de potencia propuestos en las nuevas definiciones de potencia en régimen no sinusoidal y calcular las nuevas figuras de mérito propuestas en [3], al tiempo que se establezcan unos nuevos conceptos tarifarios en los que se bonifique el consumo sinusoidal equilibrado y el factor de potencia unitario. A día de hoy, los avances tecnológicos en la instrumentación de medida permitirían llevar a cabo este propósito, como se manifiesta en los trabajos de investigación realizados en [6-8].

Con este objetivo, se realiza el estudio descrito en este artículo, consistente en la verificación de la medida de tres contadores comerciales que representan más del 70% de los contadores instalados para uso doméstico e industrial en Baja Tensión por la empresa *Endesa Distribución SL*, al someterlos a una batería de ensayos con diferentes condiciones de alimentación y carga. Teniendo en cuenta que las penalizaciones aplicadas sobre el consumo de energía sólo depende de la medida del $\cos \varphi$, resulta interesante comprobar qué medida hacen de esta variable los contadores que actualmente utilizan las compañías eléctricas en caso de

distorsión armónica o desequilibrio en la red. Finalmente, se propone un nuevo ratio a tener en cuenta en la tarifa eléctrica, que sustituiría al actual $\cos \varphi$ para penalizar conjuntamente el consumo de potencia reactiva, la polución armónica y el desequilibrio.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El Standard IEEE 1459- 2010 [3], intenta resolver el cálculo de los diferentes términos de potencia en condiciones de desequilibrio y/o presencia de armónicos en la red. En la Tabla 2 se resumen las definiciones propuestas en este documento en el caso de sistemas monofásicos, para una mejor comprensión del desarrollo y resultados obtenidos en los ensayos realizados.

En esta tabla, P_1 hace referencia a la potencia activa fundamental y P_H es la potencia activa armónica. En el caso de la potencia reactiva, Q , se distingue análogamente entre potencia reactiva fundamental, Q_1 , y la potencia reactiva armónica, Q_H . Según estas nuevas propuestas, la potencia aparente S se compone de dos términos: la potencia aparente

Sistemas monofásicos		(2)
Potencia aparente (S)	$S = UI; S^2 = S_1^2 + S_N^2; S_1 = U_1 I_1$	
Potencia activa (P)	$P = P_1 + P_H; P_1 = U_1 I_1 \cos j_1; P_H = U_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} U_h I_h \cos j_h$	
Potencia reactiva (Q)	$Q = Q_1 + Q_H; Q_1 = U_1 I_1 \text{sen} j_1; Q_H = \sum_{h \neq 1} U_h I_h \text{sen} j_h$	
Factor de potencia (PF)	$PF = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{S}$	
Factor de potencia fundamental (PF_1)	$PF_1 = \cos j_1 = \frac{P_1}{S_1}$	

Tabla 2: Definiciones para el cálculo de potencias en sistemas monofásicos según IEEE 1459- 2010.

Sistemas trifásicos		(3)
Potencia aparente equivalente (S_e)	$S_e = 3U_e I_e; S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2$	
Potencia aparente fundamental equivalente (S_{e1})	$S_{e1} = 3U_{e1} I_{e1}; S_{e1}^2 = S_1^{+2} + S_{U1}^2$	
Potencia aparente fundamental de secuencia positiva (S_1^+)	$S_1^+ = 3U_1^+ I_1^+; S_1^{+2} = P_1^{+2} + Q_1^{+2}$	
Factor de potencia (PF)	$PF = \frac{P}{S_e} = \frac{P_1^+ + P_{U1} + P_H}{S_e}$	
Factor de potencia fundamental de secuencia directa (PF_1^+)	$PF_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+}$	

Tabla 3: Definiciones para el cálculo de potencias en sistemas trifásicos según IEEE 1459 - 2010

fundamental S_f que incluye los valores de P_f y Q_f , ya citados, y el término S_N , correspondiente a la potencia aparente no fundamental, que engloba los términos de potencia debido a tensión y/o corriente distorsionada.

Según el estándar, el factor de potencia total (PF) cuantifica la efectividad del flujo de energía eléctrica en un sistema, y el factor de potencia fundamental (PF_f) mide el flujo de potencia fundamental no polucionada.

Para el caso de sistemas trifásicos, en los que además de distorsión armónica puede aparecer desequilibrio, se definen los términos de potencia que se recogen en la Tabla 3. En esta tabla, el subíndice “e” hace referencia a términos de tensión, corriente o potencia “equivalente” [3], [9-10].

De modo análogo al caso de sistemas monofásicos, la potencia aparente equivalente se descompone en los términos de potencia aparente fundamental equivalente (S_{ef}) y potencia aparente no fundamental equivalente (S_{eN}). La diferencia estriba en que, en el caso de sistemas trifásicos, los cálculos se realizan con los valores eficaces de tensión y corriente equivalentes, U_e e I_e . La potencia aparente fundamental se descompone en potencia aparente fundamental de secuencia positiva o directa, S_f^+ , y potencia aparente fundamental de desequilibrio, S_{U1} . El subíndice “U” engloba las componentes de secuencia inversa y homopolar. El factor de potencia total (PF) se calcula del mismo modo que en el caso de sistemas monofásicos, mientras que el factor de potencia fundamental de secuencia directa (PF_f^+) mide el flujo de potencia fundamental de secuencia positiva no polucionada (ni por armónicos ni por desequilibrios).

El lector interesado en conocer la definición y el procedimiento de cálculo de cada uno de los términos de potencia incluidos en las Tablas 2 y 3 puede encontrarlo detalladamente en [3].

Una vez expuestos los conceptos de potencia que se van a utilizar, se pasa a describir el material utilizado durante los ensayos realizados a los contadores y el procedimiento seguido.

2.1. CONTADORES ENSAYADOS Y DISPOSITIVOS EMPLEADOS DURANTE LAS PRUEBAS

En la Fig. 2 se muestran los contadores que han sido sometidos a ensayo. Las especificaciones de estos contadores, siguiendo un orden de derecha a izquierda en dicha figura, se detallan a continuación:

- Contador monofásico de Clase 1, destinado a uso en viviendas.
- Contador trifásico de Clase 2, destinado a uso en viviendas.
- Contador trifásico bidireccional de Clase 1 para potencia activa y Clase 2 para reactiva, destinado a uso industrial.

Para poder realizar la batería de ensayos a los contadores descritos en esta sección, se han utilizado los siguientes equipos e instrumentación de medida:



Fig. 2: Contadores sometidos a ensayo

- Fuente de perturbaciones programable HP modelo 6834B, para la generación de la forma de onda deseada (Fig. 3).
- Cargas trifásicas lineales variables $R-L-C$, de módulos DISTESA (Fig. 4).
- Osciloscopio TEKTRONIX, modelo TDS 5034 (Fig. 5).
- Medidor de calidad QUAME basado en el estándar IEEE 1459- 2010 (Fig. 6). [11]
- Cargas trifásicas alineales formada por tres ordenadores portátiles. (Fig. 7).
- Medidor Topas 1000 de LEM. (Fig. 8).



Fig. 3: Fuente de perturbaciones programable como sistema generador.

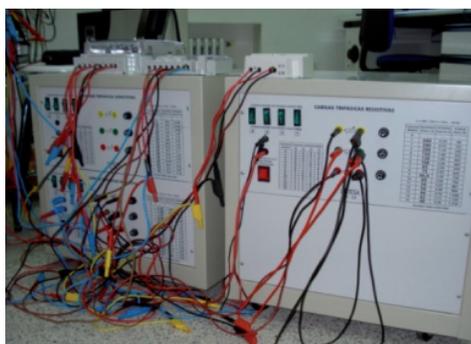


Fig. 4: Cargas trifásicas lineales variables $R-L-C$ de módulos DISTESA.



Fig. 5: Osciloscopio para ver formas de onda.

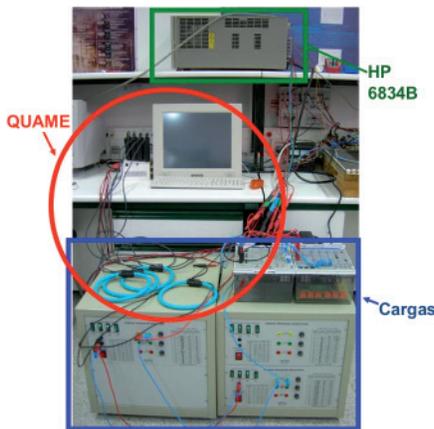


Fig. 6: Medidor de Calidad (QUAME).



Fig. 7: Cargas alineales.



Fig. 8: Medidor Topas 1000 de LEM.

2.2. PROCEDIMIENTO LLEVADO A CABO

En la Fig. 9 se muestra el esquema del montaje utilizado para realizar los ensayos. Se genera una forma de onda distorsionada y/o desequilibrada mediante el software que incorpora la fuente de perturbaciones y se alimenta con ella a las distintas cargas, estando los tres contadores y el QUAME conectados al circuito, para así efectuar la medición a la vez. También se conecta un amperímetro en serie en una fase y un voltímetro entre fase y neutro. Los contadores, a través de los impulsos de su LED frontal permiten calcular la potencia activa y, en el caso del contador 3, también la potencia reactiva que se está demandando instantáneamente. Por último, comprobamos si coincide esta medida con los cálculos teóricos y con los resultados del medidor QUAME basado en el estándar IEEE1459 - 2010.

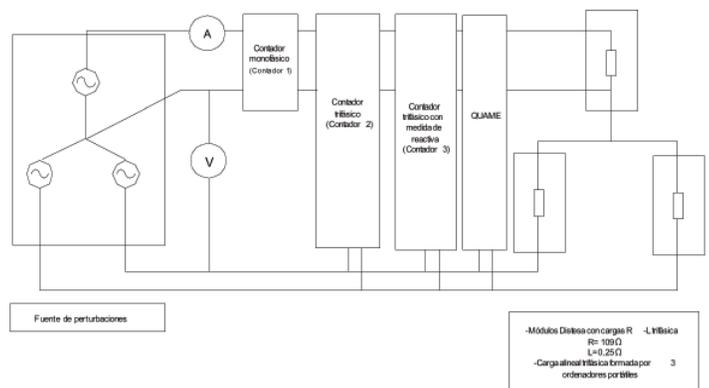


Fig. 9: Esquema del montaje utilizado en los ensayos

3. RESULTADOS

Antes de someter los contadores a las situaciones de no idealidad que interesa estudiar, los conectamos a un sistema senoidal (Tabla 4) equilibrado con carga *R-L* equilibrada, con el objetivo de comprobar si todos los contadores muestran la misma lectura en estas condiciones. En este ensayo previo, la tensión fase-neutro de alimentación tiene un valor eficaz de 230 V, siendo los parámetros de la carga conectada $R = 109 \Omega$ y de $L = 0,25 H$. Las lecturas de los contadores, en este caso, fueron las mostradas en la Tabla 5.

THD_u	0%
THD_i	0%

Tabla 4: Tasas de distorsión del ensayo de calibración

	Contador 1	Contador 2	Contador 3	QUAME
$P (W)$	319	958	958	958
$Q (VAr)$			690,5	690,48
$S_e (VA)$				1180,91

Tabla 5: Medidas de potencia de los contadores y del QUAME en casos de sistemas senoidales equilibrados con carga lineal *R-L*

El sistema de la Fig. 9 se somete a continuación a tres ensayos, el primero con tensión de alimentación distorsionada equilibrada, mientras que en el segundo, la tensión no contiene armónicos, pero sí existe desequilibrio, siendo en ambos casos la carga lineal. En el tercer ensayo, la tensión es senoidal, pero las cargas conectadas demandan corrientes distorsionadas.

ENSAYO 1

En el primer ensayo los contadores se encuentran conectados a un sistema trifásico equilibrado con componente fundamental y un 50% de 5º armónico, (Fig. 10 en trazo azul). Como carga para este ensayo se ha conectado la carga lineal mostrada en la Fig. 9. En la Tabla 6 se indican las tasas de distorsión armónica de las señales de tensión y corriente medidas por el contador, calculadas según la norma UNE-EN 50160 [12] y [13]. Por último, en la Tabla 7 se recogen las lecturas de los tres contadores y del medidor QUAME.

THD _U	50%
THD _I	16,16%

Tabla 6: Tasas de distorsión armónica del ensayo 1

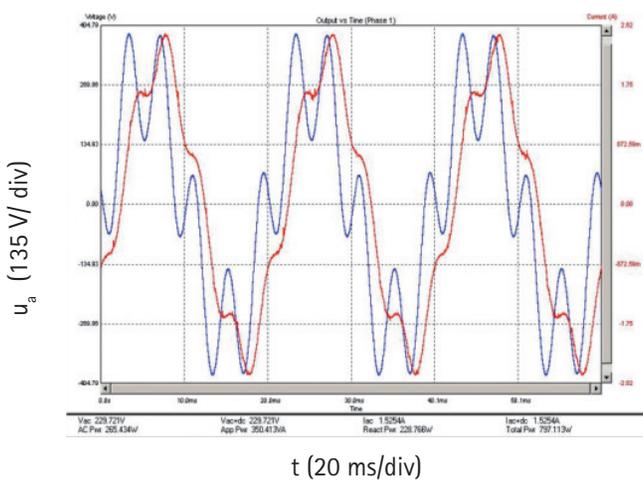


Fig. 10: Forma de onda de la tensión fase-neutro de alimentación (azul) y de corriente (rojo) en la fase a en el ensayo 1

	Contador 1	Contador 2	Contador 3	QUAME
P (W)	259	777,5	777,5	777,5
Q (VAR)			512,1	477,7
S _e (VA)				1071

Tabla 7: Medidas de potencia de los contadores y QUAME en el ensayo 1

ENSAYO 2

En el segundo ensayo, los contadores se encuentran conectados a un sistema desequilibrado en tensión (Fig. 11) siendo la carga conectada es la misma que la del ensayo 1. En la Tabla 8 se muestran las tasas de desequilibrio de las señales de tensión y corriente medidas por el contador, calculados según [12] y [13].

$\frac{U_1^-}{U_1^+}$	21,46%	$\frac{I_1^-}{I_1^+}$	21,46%
$\frac{U_1^0}{U_1^+}$	12,22%	$\frac{I_1^0}{I_1^+}$	12,22%

Tabla 8: Tasas de desequilibrio en tensiones y corrientes del ensayo 2

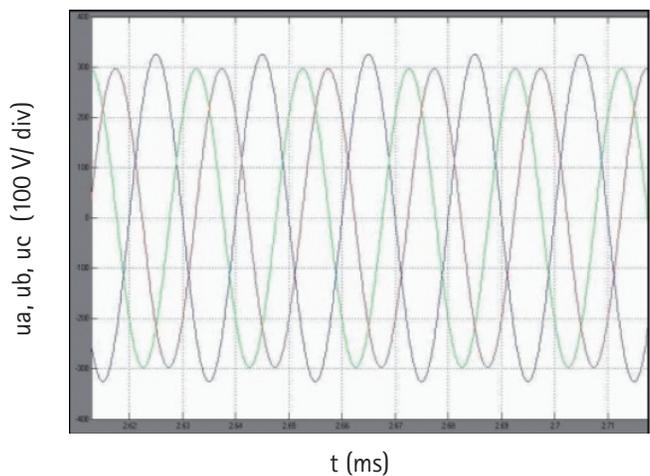


Fig. 11: Formas de onda de las tensiones fase-neutro de alimentación en el ensayo

Para este caso, las lecturas de los contadores, así como las potencias calculadas con el QUAME, se muestran en la Tabla 9.

	Contador 1	Contador 2	Contador 3	QUAME
P (W)	-	843	844	843
Q (VAR)			576,2	610,4
S _e (VA)				1067

Tabla 9: Lecturas de los contadores y medición del QUAME en el ensayo 2

ENSAYO 3

En el tercer ensayo, los contadores se encuentran conectados en un sistema trifásico senoidal equilibrado, con cargas no lineales muy frecuentes en instalaciones domésticas (Fig.9) que demandan corrientes con un alto contenido armónico. También se ha conectado al montaje el medidor de calidad Topas 1000 de Lem (Fig.8) para registrar las formas de onda de tensión y de corriente y obtener un mayor número de datos durante el ensayo.

Para la realización del ensayo, se ha utilizado la tensión disponible en el laboratorio con un valor eficaz de 230 V y un valor de THD_U medido por el QUAME del 2,4%. Esta distorsión se debe a la caída de tensión en la impedancia de red, ocasionada por corrientes no lineales demandadas por otros receptores, que provocan que la tensión en el punto de conexión común (PCC) (Fig. 12) no sea perfectamente senoidal. El valor de THD_U medido es del 162,4%. La forma de onda de las corrientes demandadas durante este ensayo la podemos ver en la Fig. 13.

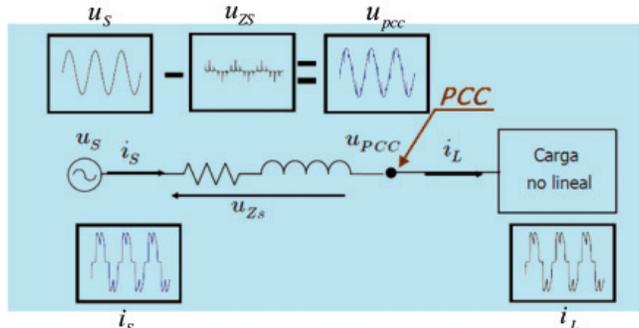


Fig. 12: Efecto en el PCC de una carga no lineal

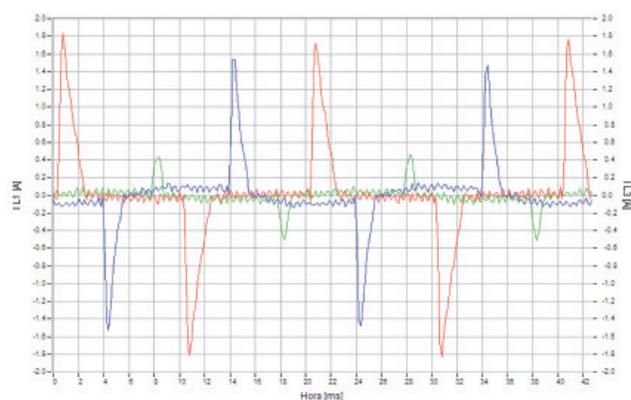


Fig. 13: Corrientes demandadas durante el ensayo 3

En este caso, las lecturas de los contadores, así como las potencias calculadas con el QUAME, se muestran en la Tabla 10.

	Contador 1	Contador 2	Contador 3	QUAME
P (W)	36,5	109,27	110,26	109,97
Q (VAr)			-30,41	-37,97
S_e (VA)				244,67

Tabla 10: Lecturas de los contadores y medición del QUAME en el ensayo 3

	Ensayo 1 (Sistema distorsionado)		Ensayo 2 (Sistema desequilibrado)		Ensayo 3 (Cargas alineales)	
	Contador 3	QUAME	Contador 3	QUAME	Contador 3	QUAME
Potencia reactiva (VAr)	512,1	477,7	576,2	610,4	-30,41	-37,97
Factor de potencia	0,83514	0,72596	0,82589	0,79006	0,45	0,408

Tabla 11: Tabla comparativa de valores mostrados por los contadores y por el medidor de calidad

Se puede apreciar que la lectura que realizan los contadores corresponde a potencia reactiva negativa, debido a la naturaleza capacitiva de las cargas conectadas. Este fenómeno supondría una sobrecompensación de energía reactiva que daría lugar a sobretensiones que pudieran afectar negativamente a otros usuarios.

4. DISCUSIÓN

4.1. CONCLUSIONES OBTENIDAS TRAS LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS A LOS CONTADORES

A partir de los ensayos efectuados ante diferentes condiciones de alimentación con armónicos o desequilibrios y cargas lineales o alineales, se puede concluir lo siguiente:

- La medida de energía activa efectuada por todos los contadores es correcta, a pesar de que existan armónicos y/o desequilibrios en la alimentación y demanda de corrientes armónicas. Esto significa que a aquellos abonados a los que se les facture exclusivamente por consumo de energía activa, se les está realizando una adecuada tarificación con los contadores ensayados.
- En cuanto a la medida de energía reactiva que realiza el tercer contador, ésta es correcta cuando la tensión de alimentación es perfectamente senoidal y equilibrada. Sin embargo, ante armónicos o desequilibrios en la tensión de red y/o en la corriente demandada, la medida que realiza es inadecuada. Los resultados se resumen en la Tabla 11.
- Si para calcular el término de facturación de energía reactiva se tiene en cuenta exclusivamente el $\cos \varphi$ (véase ecuaciones (1) y, teniendo en cuenta que este parámetro en aquellos contadores que miden energía reactiva (como es el caso del contador número 3 que ha sido ensayado), suele calcularse como:

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}}, \quad (4)$$

siendo W_a la energía activa registrada en kWh y W_r la energía reactiva en KVAh, si la lectura de la potencia reactiva no es correcta, el cálculo del $\cos \varphi$ no sería adecuado y, por tanto, tampoco la facturación de energía reactiva.

- A partir de los resultados obtenidos en la Tabla 11 puede apreciarse que, en los tres ensayos, el valor del $\cos \varphi$ calculado con la lectura del contador a partir de (4) es superior al valor teórico del PF , calculado con el QUAME a partir de (3) siguiendo el estándar

IEEE 1459-2010 que tiene en cuenta los términos de potencia que no producen potencia activa (potencia no activa). Esto implica que la facturación utilizando el $\cos \varphi$ es inferior a la que se obtendría utilizando el PF en las ecuaciones (1). En este caso, se trataría de un nuevo término, que podríamos denominar “término de facturación de energía no activa”, suponiendo nuevos valores de precio unitario en las ecuaciones (1).

4.2. NUEVO PARÁMETRO PROPUESTO PARA LA FACTURACIÓN

- El grupo de investigación PE&ES propone como factor a tener en cuenta para la facturación un nuevo parámetro que denominamos *Quality Factor (QF)* y que se calcula como:

$$QF = \frac{P_1^+}{S_e} = \frac{P_1^+}{S_1^+} \frac{S_1^+}{S_{e1}} \frac{S_{e1}}{S_e} = PF_1^+ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{S_{U1}}{S_1^+}\right)^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{S_{eN}}{S_{e1}}\right)^2}}, \quad (5)$$

siendo PF_1^+ el factor de potencia fundamental de secuencia directa, $\left(\frac{S_{U1}}{S_1^+}\right)$ el ratio de polución por desequilibrio y $\left(\frac{S_{eN}}{S_{e1}}\right)$ el ratio de polución armónica. Los términos que intervienen en estos ratios pueden obtenerse fácilmente a partir de las expresiones (3). De este modo, el nuevo factor propuesto, que sustituiría al actual $\cos \varphi$ en las expresiones (1), tendría en cuenta los tres ratios definidos en el estándar IEEE 1459 – 2010 [3] como factores que se alejan de la situación ideal, que consistiría en un sistema perfectamente senoidal, equilibrado, en el que la tensión y la corriente están en fase. En tal situación el valor del QF sería unitario. El término de facturación, en este caso, debería denominarse “facturación de energía no activa fundamental de secuencia directa”.

Si se aplica este nuevo factor a los tres casos no ideales analizados, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 12.

	Ensayo 1 (Sistema distorsionado)	Ensayo 2 (Sistema desequilibrado)	Ensayo 3 (Cargas alineales)
<i>QF</i>	0,7158	0,7507	0,395

Tabla 12: Valores del coeficiente *QF* propuesto por PE&ES en cada una de las pruebas

Se demuestra, a partir de los resultados obtenidos, que el QF es un parámetro aún más exigente que el PF propuesto en el estándar IEEE 1459 - 2010 e incluso, que los factores propuestos por otros grupos de investigación, como son el “factor de potencia equivalente” [14] y el “factor de calidad” [5]. La facturación a partir del QF penalizaría todo aquel consumo que no fuera potencia activa fundamental de secuencia positiva, es decir, el consumo de potencia reactiva fundamental, y potencia debida a componentes armónicas y potencia debida a componentes de desequilibrio.

Si este factor propuesto fuera tenido en cuenta en las tarifas eléctricas, obligaría a los consumidores a tomar medidas tales como el empleo de filtros activos, acondicionadores de potencia, etc. que cancelarían la demanda de armónicos y/o desequilibrios provocando una mejora de la calidad de red y una reducción de pérdidas en las líneas, incrementando la eficiencia del flujo de potencia en el sistema eléctrico.

5. AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración y financiación de *Endesa de Distribución SL*. También ha formado parte en el desarrollo de los ensayos D. Víctor Manuel Miñambres Marcos, Becario FPU del grupo de Investigación PE&ES.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martínez García S. “Descripción, causas, efectos y solución de las perturbaciones en la red eléctrica”, XI Reunión de Grupos de Investigación en Ingeniería Eléctrica, ETSI Industriales, Badajoz, Abril-2001.
- [2] Akagi H. “New Trends in Active Power Line Conditioners”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.33, No. 3, pp. 263- 268. Mayo 1994.
- [3] Standard IEEE 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 19 March 2010.
- [4] Orden ITC/3519/2009, de 28 de diciembre, por la que se revisan los peajes de acceso a partir de 1 de Enero de 2010 y las tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial
- [5] Egúiluz LI. “Potencia en Régimen no-sinusoidal”, Servicio de publicaciones de la Universidad de Cantabria.2003.
- [6] Gherasim C, Van den Keybus J; Driesen J, Belmans R. “DSP Implementation of Power Measurements According to the IEEE Trial- Use Standard 1459”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 53, No 4, pp. 1086- 1092. Agosto 2004.
- [7] Arseneau R. “Calibration System for Power Quality Instrumentation”, Power Engineering Society Summer Meeting, 2002. Vol. 3, , Page(s):1686 – 1689. Julio 2002.
- [8] Arseneau R. “What is measured by digital revenue meters? Power Engineering Society General Meeting 2005 IEEE, pp.1384-1386, 12-16 Junio 2005.
- [9] Emanuel AE, “Summary of IEEE Standard 1459: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 3, pp. 869- 876. Mayo /Junio 2004.
- [10] Gunther EW, McGranaghan MF. “Power Measurement in Distorted and Unbalanced Conditions – An Overview of IEEE Trial- Use Standard 1459- 2000”, Power Engineering Society Summer Meeting 2002 IEEE, ol.2; pp. 930-934. 21-25 Julio 2002.
- [11] Milanés-Montero MI, Miñambres-Marcos VM, Romero-Cadaval E, Barrero-González F. “Quality Meter of Electric Power Systems based on IEEE Standard 1459-2000”. Compatibility and Power Electronics CPE2009, 6th International Conference-Workshop. Actas de Congreso. Badajoz (España). Mayo, 2009.
- [12] AENOR “UNE-EN 50160: Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución”. 2001.
- [13] AENOR, “UNE-EN 61000. Compatibilidad electromagnética”.
- [14] Egúiluz LI. “Facturación de la electricidad: Calidad y eficiencia”, Seminario Nuevo Marco Energético. Universidad Internacional Menéndez Pelayo. Julio 2003.