

## **Análisis de la calidad de la energía en un centro de cómputos**

### *Analysis of power quality on data center*

Juan Antonio Suárez<sup>1</sup>    Guillermo di Mauro<sup>1</sup>    Daniel Anaut<sup>1</sup>  
Rubén di Mauro<sup>1</sup>    Jorge L. Strack<sup>1</sup>

Recibido 8 de diciembre de 2010, aceptado 9 de noviembre de 2012

*Received: December 8, 2010    Accepted: November 9, 2012*

### **RESUMEN**

Este trabajo analiza el impacto que provoca, sobre los índices de calidad de la energía eléctrica, un número importante de cargas no lineales pertenecientes a un centro de cómputos y conectadas a una red trifásica. Se presenta una metodología computacional simple que puede ser utilizada para analizar los efectos provocados por cargas con índices importantes de distorsión.

Distintos modelos de computadoras personales (PCs), monitores e impresoras fueron ensayados en laboratorio a los efectos de registrar las señales de corriente y sus principales parámetros eléctricos. Con estos resultados y con la asistencia del programa ATP (Alternative Transient Program) se simularon modelos equivalentes de los equipos para evaluar los diferentes fenómenos que provocan los componentes armónicos de corriente.

Los efectos de atenuación y diversidad son analizados considerando distintos escenarios: modelos de PCs idénticas pero en distintos regímenes de funcionamiento, PCs combinadas con monitores e impresoras. Se demuestra en las simulaciones que una importante mitigación natural de armónicos se produce debido a las variaciones en los índices de distorsión armónica de corrientes de los aparatos estudiados y a la propia impedancia de la línea de alimentación. Se han registrado en determinadas combinaciones de equipos reducciones del THD<sub>1</sub> del 14% y de un 40% en función de la relación reactancia inductiva-resistencia de la línea de alimentación.

Los resultados simulados fueron contrastados con mediciones en el centro de cómputos de una empresa de servicios públicos, con 120 PCs distribuidas en una red trifásica. El seguimiento se realizó con un analizador de redes a lo largo de una semana, registrando corrientes de líneas, índices de distorsión de corrientes y tensiones con sus correspondientes componentes armónicos.

Palabras clave: Cargas no lineales, índices de calidad, componentes armónicos, distorsión de corriente, cancelación, diversidad, atenuación, ATP, modelado, simulación.

### **ABSTRACT**

*This paper analyzes the impact it causes on the rates of electric power quality, a significant number of nonlinear loads belonging to a computer center and connected to a three-phase. A simple computational method is presented that can be used to analyze the effects caused by loads with a high level of distortion. Different models of personal computers (PCs), monitors and printers were tested in laboratory for the purpose of recording the current signals and the main electrical parameters. With these results and ATP (Alternative Transient Program) program assistance equivalent models of equipment were simulated to evaluate the different phenomena that cause the current harmonic components.*

*The effects of attenuation and diversity are analyzed considering different scenarios: models of PCs identical but on different operating systems, PCs, monitors and printers combined.*

---

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Eléctrica, Juan B. Justo 4302. CP 7600. Mar del Plata, Argentina. E-mail: jsuarez@fi.mdp.edu.ar; gdimauro@fi.mdp.edu.ar; danaut@fi.mdp.edu.ar; jlstrack@fi.mdp.edu.ar

*Simulations showed that a major natural harmonic mitigation occurs due to changes in rates of current harmonic distortion of the devices studied, and the impedance of the power line. For any combination of equipment there is a reduction THD<sub>1</sub> 14% and 40% depending on the inductive reactance-resistance ratio of the power line.*

*The simulated results were compared with measurements in the data center of a utility company with 120 PCs distributed in a three-phase network. The monitoring was performed using a network analyzer over a week, recording line currents, rates of current and voltage distortion with their harmonic components.*

*Keywords: Nonlinear loads, power quality, harmonic components, current distortion, cancellation, diversity, mitigation, ATP, modeling, simulation.*

## INTRODUCCIÓN

El uso cada vez más frecuente de cargas no lineales, tanto residenciales como industriales, ha provocado en los últimos años especial atención entre los investigadores de la ingeniería eléctrica a la problemática de la calidad de la energía y específicamente a la distorsión de la onda de tensión en los sistemas de distribución.

Muchas de estas cargas utilizan fuentes convertidoras, que en esencia consisten en diodos rectificadores de onda completa, que alimentan un capacitor en paralelo con el receptor. La continua carga y descarga del capacitor causa distorsiones en la forma de onda de la corriente provocando la aparición de crestas pronunciadas.

Entre las cargas no lineales con posibilidades de alta concentración de unidades conectadas, se encuentran las PCs, que utilizan fuentes conmutadas para alimentar a las placas madres y sus periféricos.

Las fuentes de las PCs originan armónicos impares de corriente, y a su vez, a causa de la impedancia de cortocircuito de la red, son responsables de la distorsión de la forma de onda de tensión en el punto de conexión común (PCC).

Muchos son los problemas que pueden provocar los armónicos en una red. Entre ellos, que los índices máximos de distorsión de corriente y tensión sean excedidos, provocando riesgos en equipos sensibles (computadoras personales, dispositivos de protección, banco de capacitores, motores, etc.) [1].

Entre otras de las consecuencias que acarrea la presencia de armónicos en la red, se encuentra el

impacto provocado en la corriente de neutro. La literatura técnica advierte que es probable encontrar como máximo una corriente de neutro igual a 1,73 veces la corriente de línea, conclusión demostrable desde el punto de vista teórico. Es evidente que si las fases de un sistema trifásico alimentan cargas con alto contenido de armónicos (computadoras, monitores, lámparas fluorescentes, etc.), la recomendación clásica de considerar una sección en el conductor del neutro inferior a las de las fases deja de tener sustento [2-6].

El objetivo del presente trabajo es analizar desde el punto de vista cuantitativo las influencias de los efectos diversidad y atenuación que tienen en la distorsión final de corriente la conexión simultánea de un alto número de unidades de procesamiento central (CPU) y la incidencia en la corriente de neutro. Las mismas unidades trabajando en distintos regímenes de funcionamiento y las combinaciones de sus periféricos (monitores, impresoras) son estudiadas.

## ÍNDICES DE EVALUACIÓN

A continuación se detallan los índices utilizados para evaluar los niveles de distorsión y factores de mitigación de armónicos.

### A. Índice de distorsión armónica total (THD)

Entre los distintos indicadores del grado de distorsión de la onda sinusoidal se utiliza a menudo el índice de distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion), THD, definido como la relación entre el valor eficaz de los armónicos y el de la componente fundamental. Este valor usualmente queda expresado como un porcentaje de la onda fundamental.

Para la corriente el THD<sub>I</sub> se define como:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} 100\% \quad (1)$$

k: número de armónico.

I<sub>k</sub>: valor eficaz de la corriente para el componente k.

I<sub>1</sub>: valor eficaz de la componente fundamental.

El THD<sub>I</sub> puede variar desde cero hasta superar el 100%, como ocurre en las fuentes de potencia conmutadas.

Aunque los armónicos de corriente de frecuencia elevada pueden tener valores pequeños, al ser las reactancias de línea y de los transformadores proporcionales a la frecuencia, los armónicos de tensión pueden tomar valores significativos.

En forma análoga se define el índice de distorsión para la tensión:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{K=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} 100\% \quad (2)$$

V<sub>k</sub>: valor eficaz de la tensión para el componente k.

V<sub>1</sub>: valor eficaz de la componente fundamental.

Los índices THD suelen ser medidos en analizadores de redes como THD-F y THD-R, este último referido al valor eficaz total y por ende con valor inferior al primero.

### B. Factor de diversidad (FD)

Las dispersiones en el ángulo de fase de los componentes armónicos de corrientes de cargas individuales provocan una disminución de sus valores cuando las cargas son combinadas. Este efecto, conocido como diversidad, se debe principalmente a diferencias en los parámetros del sistema de distribución y los de la propia carga [7].

El factor de diversidad de corriente (FD<sub>k</sub>) se define para cualquier armónico k y un conjunto de “n” cargas conectadas en paralelo, como el cociente entre la magnitud del fasor de la corriente de red y la suma de magnitudes de las corrientes individuales para el mismo orden de armónico [8].

$$FD_k = \frac{\left| \sum_{i=1}^n I_{k(i)} \right|}{\sum_{i=1}^n |I_{k(i)}|} \quad (3)$$

Este factor varía entre 0 y 1. Un bajo valor de este índice implica una cancelación importante para el armónico bajo análisis.

### C. Factor de atenuación (FA)

La atenuación es provocada por la propia impedancia del sistema de potencia y por la correspondiente distorsión de tensión que tiende a reducir los armónicos de corriente en las redes producidas por cargas no lineales.

El factor de atenuación FA<sub>k</sub> para el armónico k está definido como la magnitud de la corriente total del armónico k cuando “n” cargas idénticas están conectadas en paralelo, dividida por “n” veces la magnitud de la corriente de una única carga [9].

$$FA_k = \frac{I_{k(n)}}{nI_{k(1)}} \quad (4)$$

## ENSAYOS DE LABORATORIO

Para la correcta simulación en el ATP de los modelos equivalentes de PCs, monitores e impresoras, se realizaron previamente ensayos de laboratorio, a efectos de analizar las ondas de corriente para cada uno de ellos y posteriormente con el análisis de Fourier obtener las amplitudes y ángulos de fase de cada uno de los componentes armónicos y los correspondientes índices de distorsión de corriente.

Las señales de corriente fueron capturadas y grabadas con osciloscopio digital y posteriormente recuperadas y procesadas con la transformada rápida de Fourier (FFT) obteniendo el espectro armónico de frecuencias para cada una de las cargas.

### A. Análisis de un modelo de CPU con distintos regímenes de funcionamiento

Es sabido que en un centro de cómputos cada PC puede tener una actividad distinta a lo largo de la jornada. Algunas unidades estarán en *stand by*, otras en proceso de lectura y/o grabación de archivos,

impresión, etc. En este contexto se analizó cómo se comporta una CPU en los siguientes procesos:

- a) *Proceso 1*: Stand by.
- b) *Proceso 2*: Procesamiento matemático con lectura y escritura de información al disco.
- c) *Proceso 3*: Proceso de desfragmentación del disco rígido.
- d) *Proceso 4*: Proceso de grabado a CD/DVD.

En la Figura 1 se muestran las cuatro señales de corrientes para una misma CPU, con los respectivos estados de funcionamiento. En la Tabla 1 se resumen los datos del THD<sub>1</sub>% para las distintas actividades de la CPU, los valores eficaces de corriente total y los componentes armónicos (en valores picos) hasta el orden 21. Entre los procesos 1 y 4 aparecen variaciones de THD<sub>1</sub> del 13%, como consecuencia del mayor aporte de los armónicos de orden superior cuando la CPU tiene más exigencia de trabajo.

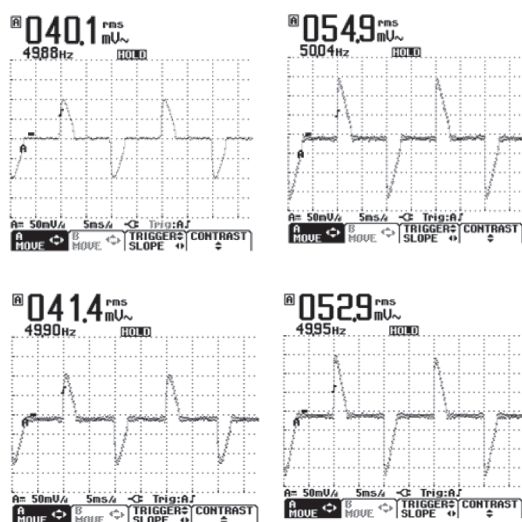


Figura 1. Capturas de la forma de onda de corrientes de los estados de actividad (1 a 4) de la CPU ensayada (1mV=1 mA). Arriba a la izquierda: proceso 1, a la derecha: proceso 2; abajo a la izquierda: proceso 3, a la derecha: proceso 4.

## B. Análisis de periféricos

### Monitores

Monitores convencionales de 19", de tubo de rayos catódicos (CRT) junto con los actuales de LCD (display de cristal líquido) fueron ensayados.

Para los modelos examinados, el LCD arrojó un THD<sub>1</sub> del 85%, mientras que el CRT alcanzó una distorsión del 96%.

En la Tabla 2 se resumen los componentes armónicos e índices de distorsión, obtenidos a partir del análisis de Fourier para ambos monitores.

Tabla 1. Análisis armónico para distintas actividades de la CPU.

Parámetros	Procesos			
	1	2	3	4
% THD <sub>1</sub>	101,86	102,37	111,73	114,82
IRMS [A]	0,401	0,536	0,404	0,521
Fund.[A]	0,397	0,530	0,381	0,484
I <sub>3</sub> [A]	0,322	0,424	0,328	0,408
I <sub>5</sub> [A]	0,206	0,260	0,217	0,288
I <sub>7</sub> [A]	0,086	0,130	0,123	0,168
I <sub>9</sub> [A]	0,053	0,100	0,061	0,100
I <sub>11</sub> [A]	0,063	0,097	0,058	0,091
I <sub>13</sub> [A]	0,042	0,062	0,050	0,075
I <sub>15</sub> [A]	0,019	0,042	0,030	0,054
I <sub>17</sub> [A]	0,023	0,051	0,017	0,038
I <sub>19</sub> [A]	0,027	0,042	0,023	0,039
I <sub>21</sub> [A]	0,014	0,028	0,021	0,035

Tabla 2. Análisis armónico de monitores e impresora láser.

	Monitor CRT	Monitor LCD	Impresora Láser
% THD <sub>1</sub>	95,91	85,04	16,14
RMS [A]	0,370	0,232	2,943
Fund. [A]	0,378	0,250	2,906
I <sub>3</sub> [A]	0,300	0,175	0,382
I <sub>5</sub> [A]	0,180	0,100	0,226
I <sub>7</sub> [A]	0,072	0,055	0,114
I <sub>9</sub> [A]	0,015	0,023	0,001
I <sub>11</sub> [A]	0,041	0,020	0,063
I <sub>13</sub> [A]	0,033	0,010	0,034
I <sub>15</sub> [A]	0,012	0,015	0,026
I <sub>17</sub> [A]	0,016	0,010	0,037
I <sub>19</sub> [A]	0,019	0,011	0,030
I <sub>21</sub> [A]	0,011	0,008	0,022

### Impresoras

El análisis de las impresoras láser arroja un comportamiento dispar en correspondencia con el tipo de tarea que está desarrollando. Así en el inicio de la impresión, en la etapa de calentamiento del difusor, alcanza el consumo máximo y su  $THD_I\%$  es mínimo. Luego en el proceso de impresión se registran fluctuaciones, el consumo baja y simultáneamente se eleva la distorsión de corriente a valores cercanos al 100%. En la Tabla 2 se anexan los datos para la etapa más estable, que se corresponde con la de calentamiento, previa a la de impresión, por cuanto en los siguientes ciclos las ondas de corriente son muy irregulares con valores erráticos imposible de ser tratadas con la FFT.

## METODOLOGÍA Y SIMULACIÓN

A partir de los ensayos analizados, es posible reemplazar en el ATP el circuito real de una CPU, monitor e impresora, por fuentes de corrientes que incluyen la componente fundamental y los componentes armónicos de corriente obtenidos del análisis de Fourier, Figura 2.

Las fuentes de corriente acopladas en paralelo representan la componente fundamental ( $k=1$ ) y los armónicos (desde el orden  $k=3$  hasta el 21). El circuito se completa con la fuente de tensión alterna  $U_1$ , la impedancia de la fuente  $Z_s$  y la propia impedancia de los cables de alimentación  $Z_c$ .

### ANÁLISIS DEL EFECTO DIVERSIDAD

Con los modelos equivalentes de corrientes para cada una de las cargas, Figura 2, se simularon en el ATP en el dominio del tiempo distintos escenarios, con el propósito de analizar el efecto diversidad cuando más de una unidad se conecta a la red. Para este estudio y desde el punto de vista teórico es necesario despreciar la impedancia de la fuente y contemplar solo la impedancia de los cables con el propósito de

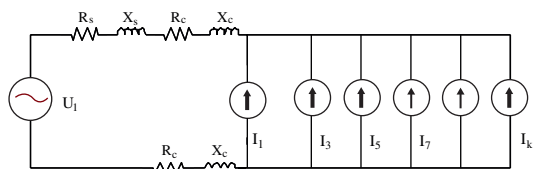


Figura 2. Modelo equivalente de cargas no lineales simuladas en el ATP.

aislar la distorsión de la tensión provocada por el efecto atenuación. En correspondencia con el caso real estudiado, un cable de  $4 \times 25 \text{ mm}^2$ , longitud 20 m resultó  $Z_c = 0,015 + j0,001 \Omega$ .

### Escenario 1

Se analizó el factor de diversidad y el  $THD_I$  resultante, combinando modelos idénticos de CPU trabajando en distintos regímenes de funcionamiento.

A partir de los ensayos analizados en el laboratorio se simuló en el ATP, en el dominio del tiempo, el comportamiento de cuatro CPU de características similares, pero cada unidad con un régimen distinto de actividad, en correspondencia con los procesos 1 a 4, definidos anteriormente. En la Tabla 3 se resumen los datos obtenidos de la simulación, concluyendo que el efecto tiene escasa importancia y solo a partir de armónicos muy altos (17, 19 y 21).

Tabla 3. Análisis armónico de cuatro CPU trabajando en forma combinada.

Parámetros	Combinación de 4 CPU con distintos regímenes de funcionamiento	$FD_k$
% $THD_I$	106,48	-
RMS [A]	1,850	-
Fund. [A]	1,791	0,999
$I_3$ [A]	1,476	0,997
$I_5$ [A]	0,965	0,994
$I_7$ [A]	0,505	0,996
$I_9$ [A]	0,304	0,967
$I_{11}$ [A]	0,288	0,934
$I_{13}$ [A]	0,218	0,949
$I_{15}$ [A]	0,134	0,926
$I_{17}$ [A]	0,106	0,826
$I_{19}$ [A]	0,104	0,797
$I_{21}$ [A]	0,083	0,845

### Escenario 2

Se examinó la combinación de CPU con monitores, primero con uno del tipo CRT y luego con uno de LCD, comprobando el efecto obtenido. El resultado de las simulaciones para ambos monitores se resume en las Tablas 4 y 5. Para la combinación con el CRT se observaron importantes disminuciones del  $FD$  en los armónicos 9, 11, 13, 17, 19 y 21. En la combinación con el monitor LCD las disminuciones se registran

en casi todos los armónicos a excepción del 19. Esta última conclusión se ve reflejada en el  $THD_I$  resultante: mientras los valores individuales alcanzan el 94% y 85% –CPU y monitor respectivamente–, la combinación arroja una distorsión del 73%.

Tabla 4. Análisis de la combinación de un modelo de CPU con monitor CRT de 19”.

Parámetros	CPU	Monitor CRT	Combinado	FD <sub>k</sub>
% THD <sub>I</sub>	97,47	95,91	94,67	–
RMS [A]	0,398	0,370	0,760	–
Fund. [A]	0,403	0,378	0,781	0,999
I <sub>3</sub> [A]	0,323	0,300	0,617	0,991
I <sub>5</sub> [A]	0,191	0,180	0,367	0,989
I <sub>7</sub> [A]	0,081	0,072	0,153	1,000
I <sub>9</sub> [A]	0,041	0,015	0,026	0,469
I <sub>11</sub> [A]	0,052	0,041	0,053	0,566
I <sub>13</sub> [A]	0,037	0,033	0,046	0,659
I <sub>15</sub> [A]	0,023	0,012	0,035	0,988
I <sub>17</sub> [A]	0,017	0,016	0,006	0,195
I <sub>19</sub> [A]	0,016	0,019	0,008	0,230
I <sub>21</sub> [A]	0,010	0,011	0,003	0,126

Tabla 5. Análisis de la combinación de un modelo de CPU con monitor LCD de 19”.

Parámetros	CPU	Monitor LCD	Combinado	FD <sub>k</sub>
% THD <sub>I</sub>	97,47	85,04	73,09	–
RMS [A]	0,398	0,207	0,484	–
Fund. [A]	0,403	0,250	0,576	0,882
I <sub>3</sub> [A]	0,323	0,175	0,378	0,760
I <sub>5</sub> [A]	0,191	0,100	0,169	0,581
I <sub>7</sub> [A]	0,081	0,055	0,024	0,175
I <sub>9</sub> [A]	0,041	0,023	0,038	0,594
I <sub>11</sub> [A]	0,052	0,020	0,022	0,300
I <sub>13</sub> [A]	0,037	0,010	0,033	0,694
I <sub>15</sub> [A]	0,023	0,015	0,027	0,707
I <sub>17</sub> [A]	0,017	0,010	0,009	0,329
I <sub>19</sub> [A]	0,016	0,011	0,027	0,999
I <sub>21</sub> [A]	0,010	0,008	0,016	0,893

Por otra parte, mientras el monitor CRT posee casi la misma proporción de componentes armónicos que la CPU, el monitor LCD lo hace en una proporción mucho menor.

### Escenario 3

Para evaluar la incidencia de la impresora láser en combinación con PCs, se realizó la simulación con diez modelos idénticos de PCs (CPU, más monitor), considerando a la impresora en régimen de bajo  $THD_I$ .

En la Tabla 6 se resumen los valores de  $FD$  obtenidos para cada componente armónico, observando en el componente 15 una disminución relativamente importante. Se aclara que la simulación se corresponde en la práctica con un período muy breve de la etapa de impresión, reiterando que la impresora posee un oscilograma de corriente muy irregular.

### EFECTO DE LA ATENUACIÓN

El análisis del efecto atenuación dependerá del tipo de carga ( $THD_I$ , potencia), de la cantidad de unidades conectadas y además de la relación  $X_s/R_s$  (reactancia y resistencia equivalente del sistema de distribución) [10].

Para analizar como impactan en la atenuación la cantidad de unidades de PCs conectadas en un centro de cómputos, se modeló en el ATP un sistema trifásico de cuatro hilos, de 3x380V, manteniendo constantes los parámetros de la red:  $Z_s=0,55+j0,05\Omega$ . A este sistema se le fueron conectando modelos idénticos

Tabla 6. Análisis de la combinación de un modelo de CPU con impresora láser.

Parámetros	Impresora	10 PCs	Combinación	FD <sub>k</sub>
% THD <sub>I</sub>	14,69	103,45	61,96	–
RMS	3,07	5,62	7,12	–
Fund. [A]	4,30	5,53	8,56	0,87
I <sub>3</sub> [A]	0,55	4,63	4,09	0,79
I <sub>5</sub> [A]	0,23	2,97	2,91	0,91
I <sub>7</sub> [A]	0,14	1,35	1,49	1,00
I <sub>9</sub> [A]	0,08	0,33	0,34	0,83
I <sub>11</sub> [A]	0,07	0,53	0,54	0,90
I <sub>13</sub> [A]	0,08	0,36	0,44	0,98
I <sub>15</sub> [A]	0,05	0,07	0,07	0,62
I <sub>17</sub> [A]	0,06	0,15	0,18	0,86
I <sub>19</sub> [A]	0,02	0,24	0,26	0,99
I <sub>21</sub> [A]	0,01	0,11	0,10	0,89

de PCs (combinación de CPU y monitor LCD), obteniendo para cada una de las simulaciones los índices de distorsión de corriente y tensión ( $THD_I$  y  $THD_U$ ), que se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Evolución de los índices de distorsión en función del incremento de unidades de PCs conectadas.

Unidades de PCs	$THD_I$ %	$THD_U$ %
3	99,53	1,29
6	97,08	2,53
9	9,8	3,70
12	90,22	4,78
15	86,6	5,79
18	83,1	6,72
21	79,72	7,58
24	76,5	8,38
27	73,6	9,11
30	70,9	9,79
33	68,4	10,41
36	66	10,99
39	64	11,44

Se observa que de un  $THD_I$  inicial e individual superior al 100%, al conectar 39 unidades desciende al 64%. Esta disminución está estrechamente vinculada a la relación  $X_s/R_s$ .

La distorsión máxima de tensión  $THD_U$  alcanza un valor superior al 11%. Este incremento se debe al aumento de la corriente que circula por la impedancia de cortocircuito de la red. En consecuencia, la caída de tensión se distorsiona y es responsable de distorsionar la forma de onda de tensión en el punto de conexión común. Por lo mencionado, el aumento del  $THD_U$  está intrínsecamente relacionado al valor de  $Z_s$  y  $Z_c$ .

En las Tablas 8 y 9 se resume la variación de los índices de atenuación ( $FA_k$ ). El análisis se completa con la evolución de los componentes armónicos en función del número de unidades conectadas. Los armónicos se grafican en las Figuras 3 y 4 en valores porcentuales de la componente fundamental de corriente. El tercer componente armónico es el más dominante, entre un 60% y 80% de la corriente  $I_1$  por lo que influirá significativamente en la elevación de la corriente de neutro, aún estando equilibradas

las cargas. De los otros componentes dominantes, el quinto alcanza el 50% y el séptimo el 25% de  $I_1$ , valores iniciales que luego con las cargas se atenúan sensiblemente.

Tabla 8. Evolución de los índices  $FA_k$  ( $k=1..9$ ), en función del incremento de unidades de PCs conectadas.

PCs	$FA_1$	$FA_3$	$FA_5$	$FA_7$	$FA_9$
3	0,984	0,979	0,962	0,925	0,914
6	0,976	0,962	0,921	0,835	0,823
9	0,967	0,939	0,865	0,735	0,751
12	0,958	0,912	0,801	0,632	0,689
15	0,949	0,884	0,734	0,533	0,637
18	0,940	0,854	0,667	0,444	0,591
21	0,931	0,826	0,601	0,369	0,548
24	0,922	0,797	0,537	0,311	0,507
27	0,914	0,769	0,476	0,277	0,468
30	0,906	0,743	0,418	0,265	0,429
33	0,881	0,702	0,364	0,333	0,492
36	0,890	0,693	0,315	0,291	0,355
39	0,883	0,674	0,278	0,312	0,338

Tabla 9. Evolución de los índices  $FA_k$  (11..21) en función del incremento de unidades de PCs conectadas.

PCs	$FA_{11}$	$FA_{13}$	$FA_{15}$	$FA_{17}$	$FA_{19}$	$FA_{21}$
3	0,926	0,878	0,845	0,897	0,841	0,776
6	0,841	0,730	0,689	0,788	0,651	0,569
9	0,722	0,574	0,609	0,606	0,458	0,498
12	0,591	0,438	0,547	0,403	0,344	0,429
15	0,459	0,343	0,488	0,228	0,351	0,343
18	0,333	0,310	0,425	0,181	0,415	0,244
21	0,220	0,331	0,357	0,274	0,468	0,140
24	0,135	0,376	0,287	0,378	0,486	0,049
27	0,116	0,421	0,216	0,451	0,467	0,060
30	0,162	0,456	0,148	0,489	0,416	0,123
33	0,145	0,480	0,570	0,487	0,275	0,713
36	0,278	0,484	0,034	0,473	0,255	0,197
39	0,300	0,468	0,027	0,437	0,177	0,231

### MEDICIONES DE CAMPO

Con la pretensión de contrastar las distintas simulaciones realizadas en el ATP se procedió a realizar un monitoreo con mediciones reales en un

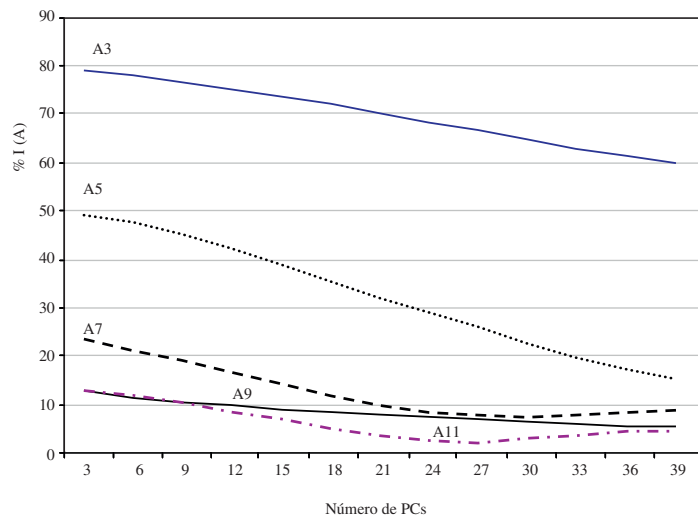


Figura 3. Evolución de los componentes armónicos (3 a 11) en porcentaje de la componente fundamental y en función del número de PCs conectadas.

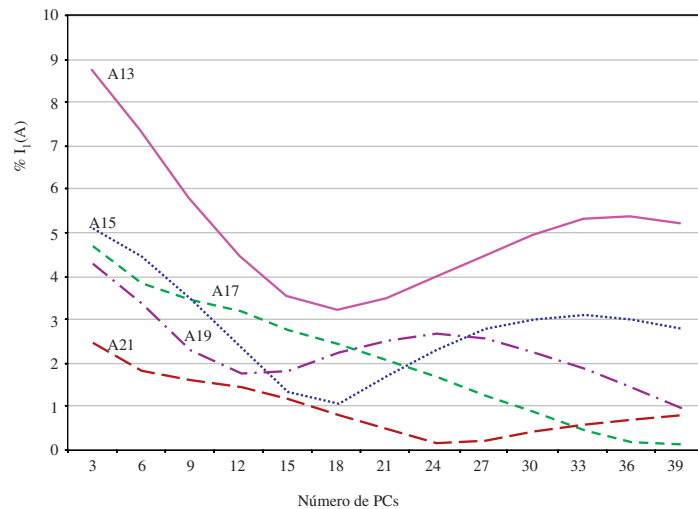


Figura 4. Evolución de los componentes armónicos (13 a 21) en porcentaje de la componente fundamental y en función del número de PCs conectadas.

centro de cómputos de una empresa de servicios públicos con 120 PCs conectadas. Las capturas de los distintos indicadores de calidad de energía fueron realizadas con un analizador de redes trifásico (HIOKI Modelo 3169), para determinar las características de los componentes armónicos de la corriente en cada una de las fases, realizando capturas programadas cada 5 minutos durante una semana. Los registros fueron recuperados y procesados posteriormente en planillas de cálculo, tipo Excel.

El horario habitual de trabajo de este centro de cómputos es de 9 a 17 hs, fuera del cual quedan unas pocas cargas conectadas (20%, aproximadamente), conformadas por unidades de PCs realizando trabajos programados.

Del análisis de los datos obtenidos con el analizador de redes, se grafica la evolución de la distorsión de corriente en una de las fases a lo largo de la jornada (Figura 5). En las Figuras 6 y 7 se muestra



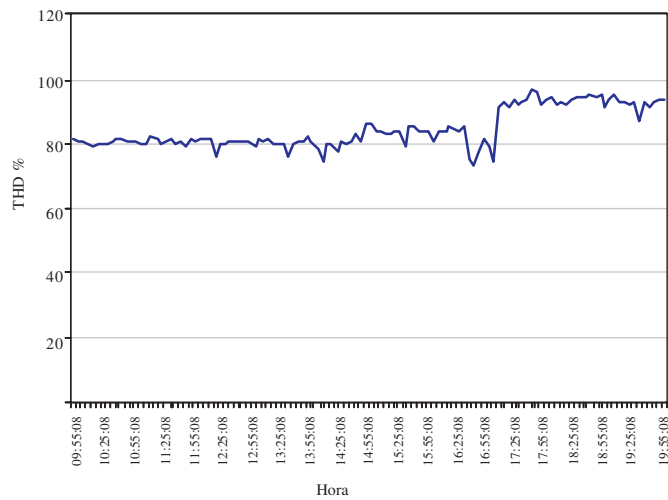


Figura 5. Evolución del THDI de una fase a lo largo del día.

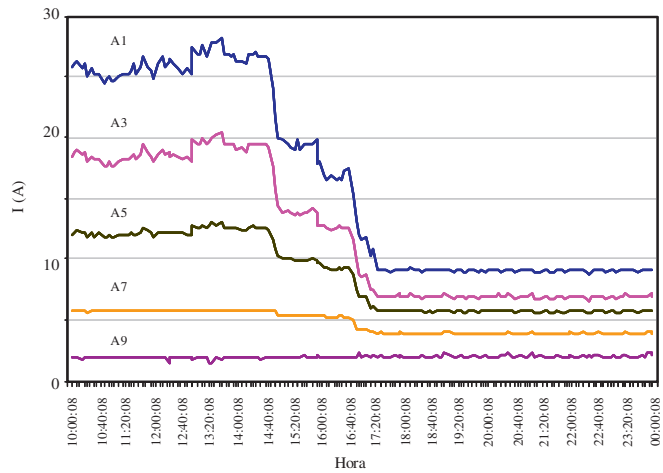


Figura 6. Evolución de los componentes armónicos (1 a 9) a lo largo del día.

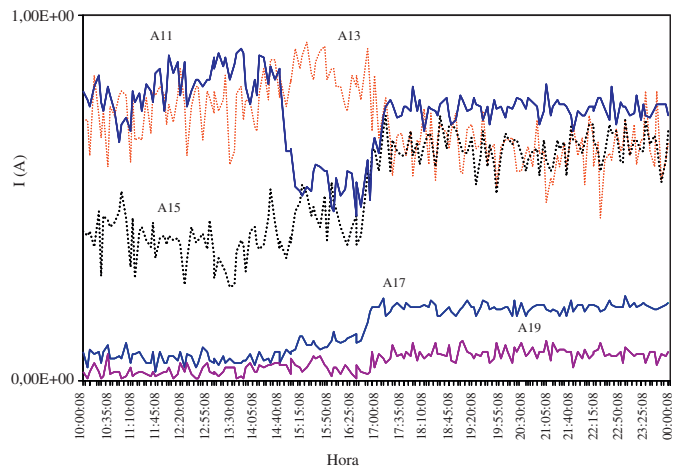


Figura 7. Evolución de los componentes armónicos (11 a 19) a lo largo del día.

la variación de los componentes armónicos, de 1 a 9 y de 11 a 19 respectivamente.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado distintos modelos de cargas no lineales que se hallan comúnmente en un centro de cómputos.

Las simulaciones realizadas en el ATP y luego completadas con mediciones de campo permiten inferir las siguientes observaciones:

- a) Tanto las CPU como los monitores analizados individualmente mostraron índices de distorsión de corriente superiores al 85%. Las impresoras muestran registros fluctuantes de  $THD_I$  desde un 15% a valores superiores al 100%.
- b) La diversidad entre cuatro CPU en distintos regímenes de tareas muestra alteraciones poco significativas en armónicos altos.
- c) La combinación entre distintas cargas no lineales pueden presentar en algunas ocasiones valores significativamente bajos de  $FD$ , tal es el caso de la combinación de una CPU con un monitor de LCD, en donde el  $THD_I\%$  resultante ha sido un 14% inferior al menor de los índices individuales.
- d) En el centro de cómputos analizado se hallaron pocas impresoras por el hecho de estar conectadas en red, y por ende la potencia de las mismas frente a la del total de las PCs instaladas es sustancialmente inferior, concluyendo que su repercusión en los armónicos inyectados en la red es de bajo impacto.
- e) Se observa que el efecto atenuación tiene mayor incidencia que el efecto diversidad. El factor  $THD_I$  disminuye a medida que se incrementa el número de unidades conectadas. La disminución de la distorsión de corriente será tanto más importante cuanto mayor sea la relación de  $X_s/R_s$ , [10]. Para el ejemplo de red simulado en el ATP se obtuvo una disminución del 40%. Esta baja viene acompañada con el incremento del  $THD_U\%$ , puesto que al aumentar el consumo se incrementa la caída de tensión en la impedancia de la red.
- f) La corriente de fase posee un componente armónico de orden 3 con un valor que varía desde el 80% al 60% de  $I_1$ . Esta componente repercute fuertemente en el valor de la corriente de neutro.
- g) De la observación de la gráfica de evolución de los componentes armónicos bajos (3, 5 y 7) en función del aumento de unidades conectadas, se concluye que todos responden a una tendencia decreciente, mientras que, de los componentes armónicos más altos, algunos permanecen medianamente estables (armónicos 9) mientras que otros, primero disminuyen alcanzando un mínimo y luego vuelven a aumentar (ejemplo armónicos 13). Esta aseveración resultante de las simulaciones efectuadas en el ATP fue comprobada en las mediciones de campo.
- h) Los registros tomados en el centro de cómputos mostraron que el sistema se encuentra desequilibrado mostrando variaciones en las corrientes de fase entre valores mínimos desde 18 A en una fase y un máximo de 32 A en otra. La corriente en el neutro no ha superado en los registros relevados con el analizador de redes a la corriente de fase, por los distintos parámetros que afectan a la corriente de neutro [10].
- i) La distorsión de corriente  $THD_I$  medida en la fase más cargada fue del 80% en el horario de mayor consumo. Este valor es más alto que el simulado ( $THD_I$  del 64%). Esta diferencia se apoya en parte en que las simulaciones fueron realizadas con la combinación de CPU y LCD, que como se analizó presentan bajos factores de distorsión (Tabla 5), mientras que en la práctica nos encontramos con combinaciones mayoritariamente (90%) conformadas con CPU y CRT, con altos valores de  $FD$  (Tabla 4).
- j) El  $THD_U$  medido es del 5,75%, valor más bajo que el obtenido en la simulación. Entre las causas de la diferencia debe buscarse en la relación  $X_s/R_s$  en un sistema de cargas que está fuertemente desequilibrado.

Finalmente a partir de ensayos previos de laboratorio es posible analizar en el ATP –utilizando modelos equivalentes– el comportamiento de los armónicos junto con los distintos índices de evaluación ( $THD_I$ ,

$THD_U$ ,  $FD$ ,  $FA$ , etc.) en lugares con alta concentración de cargas no lineales. Si bien el trabajo expuesto se ha concentrado en el análisis de PCs, puede ser extendido a cualquier otro tipo de carga no lineal con alto número de unidades concentradas, por ejemplo, lámparas fluorescentes compactas en centros comerciales.

### REFERENCIAS

- [1] V.E. Wagner, J.C. Balda, D.C. Griffith, A. McEachern, T.M. Barnes, D.P. Hartmann, D.J. Phileggi, A.E. Emmanuel, W.F. Horton, W.E. Reid, R.J. Ferraro and W.T. Jewell. "Effects of harmonics on equipment". IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. 8, pp. 672-680. April, 1993.
- [2] D. Paraiso, É. Ngandui, M. de Montigny and P. Siccard. "Characterization of neutral and line current harmonics in three-phase computer power systems". Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE, Raleigh, USA. November 2005.
- [3] L. Sainz, J. Pedra and J. Mesas. "Study of neutral conductor current in three-phase networks with single-phase converters". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 21, pp. 1466-1476. 2006.
- [4] D. Cadavid y L. Gallego. "Armónicos y problemas de "power quality" en el conductor de neutro en sistemas trifásicos". Scientia Et Technica. Vol. 22, pp. 19-24. 2003.
- [5] J. Desmet, I. Sweertvaegher, G. Vanalme, K. Stockman and J.M. Belmans. "Analysis of the neutral conductor current in a three phase supplied network with non-linear single phase loads". Electric Machines and Drives Conference, IEMDC, pp. 448-453. IEEE International, Cambridge, USA. June 2001.
- [6] C. Demoulias, C.Z. Kampouri and K. Gouramanis. "Natural canceling of current harmonics in office loads and its effect upon the transmission capacity of distribution cables". Industrial Electronics, pp. 2264-2269. Cambridge, U.K. 2008.
- [7] A. Mansoor, W.M. Grady, A.H Chowdhury and M.J Samotyi. "An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 10, pp. 467-473. January, 1995.
- [8] P. Crnosija. "Determination of voltage distortion factor for a network loaded with several DC motor drives". IEE Proceedings C. Generation, Transmission and Distribution. Vol. 131, pp. 81-84. May 1984.
- [9] A. Mansoor and W.M. Grady. "Analysis of compensation factors influencing the net harmonic current produced by single-phase nonlinear loads". Harmonics and Quality of Power, 1998. Proceedings 8th. International Conference. Vol. 2, pp. 883-889. October, 1998.
- [10] J.A. Suárez, G.F. di Mauro, D. Anaut y C. Agüero. "Parámetros que afectan la corriente de neutro en presencia de armónicos". Revista Información Tecnológica. Vol. 21 N° 1, pp. 77-89. 2010.