

Calidad de la Energía en Usuarios con Alta Concentración de Cargas no Lineales

Juan Antonio Suárez¹, Guillermo di Mauro¹, Guillermo Murcia¹, Rubén di Mauro¹ y Jorge Strack¹

¹Grupo de Investigación LAT, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Juan B. Justo 4302, Mar del Plata, Argentina.

E-mail: jsuarez@fi.mdp.edu.ar, gdimauro@fi.mdp.edu.ar, gjmurcia@fi.mdp.edu.ar, rdimauro@fi.mdp.edu.ar, jlstrack@fi.mdp.edu.ar

Resumen. Este trabajo evalúa el impacto que provoca sobre los índices de calidad de la energía eléctrica, un número importante de cargas no lineales conectadas a una red trifásica. Se utiliza una metodología computacional simple que puede ser utilizada para analizar los efectos provocados por cargas con índices importantes de distorsión. El programa ATP (Alternative Transient Program) fue utilizado para la simulación de modelos equivalentes de equipos ensayados conectados en un sistema trifásico, evaluando los diferentes fenómenos que provocan los componentes armónicos de corriente.

Los efectos de atenuación y diversidad son analizados considerando distintos escenarios de combinación de cargas. A efectos de contrastar los resultados obtenidos con el ATP, se analizaron las mediciones en un Centro de Cómputos con 120 PCs distribuidas en una red trifásica. Se comprueba 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.

Palabras clave: Atenuación, ATP, cargas no lineales, cancelación, componentes armónicos, distorsión de corriente, diversidad, índices de calidad, modelado y simulación.

1. Introducción

La introducción de nuevas tecnologías electrónicas en los componentes de electrodomésticos, procesos, maquinaria industrial e iluminación, convierten a éstas en cargas del tipo no lineal. Por la característica de su funcionamiento provocan la aparición de corrientes con contenidos armónicos que conllevan también, a la distorsión de la onda de tensión en los sistemas de distribución. Esta problemática, enmarcada en lo que se conoce como "Calidad de la Energía" ha provocado en los últimos años especial atención entre los investigadores de la ingeniería eléctrica.

Muchas de las cargas mencionadas 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.

En centros administrativos, de estudios, bancos y ámbitos de alta concentración de personal, es común encontrar gran cantidad de unidades de PCs conectadas a un mismo sistema de distribución. Las PCs, utilizan fuentes conmutadas para alimentar a las placas madres y sus periféricos. Estas fuentes 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. En sistemas trifásicos se espera normalmente que la corriente de neutro sea inferior al 20% de la corriente de línea, si las cargas están medianamente balanceadas. Sin embargo, este porcentaje puede ser significativamente mayor si las fases del sistema trifásico alimentan cargas con alto contenido de armónicos (computadoras, monitores, lámparas fluorescentes, etc.). A raíz de esto, 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 consiste en analizar la incidencia que tiene la conexión simultánea de un alto número de unidades de procesamiento central (CPU) en la distorsión final de corriente de alimentación a las mismas. Distintos regímenes de funcionamiento son analizados con las mismas unidades, así como también combinaciones de sus periféricos (monitores, impresoras, etc.).

2. Índices de mitigación

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

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_k) se define para cualquier armónico k y un conjunto "n" de 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].

$$FD_k = \frac{\left| \sum_{(n)} I_{k(t)} \right|}{\sum_{(n)} |I_{k(t)}|} \quad [1]$$

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

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_k 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].

$$FA_k = \frac{I_{k(n)}}{nI_{k(1)}} \quad [2]$$

3. Ensayos de Laboratorio

Para realizar la simulación de diferentes escenarios de trabajo en el entorno del ATP, es necesario hallar el modelo equivalente de cada componente del sistema: fuentes, monitores, impresoras. Para ello, fueron realizados ensayos de laboratorio sobre cada una de las partes mencionadas a efectos de analizar sus respectivas ondas de corriente y posteriormente, con el análisis de Fourier, obtener las amplitudes y ángulos de fase de cada uno de los armónicos y sus índices de distorsión.

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

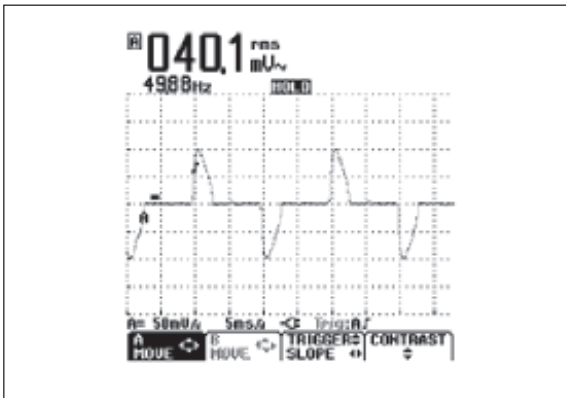
3.1 Análisis de un modelo de CPU con distintos regímenes de funcionamiento:

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 analizamos como se comporta una CPU en los siguientes procesos:

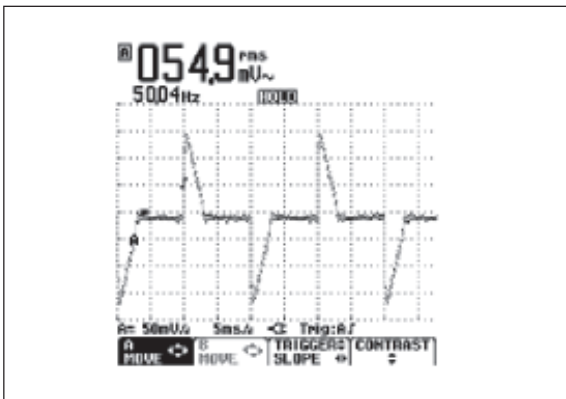
- Proceso 1:** Stand by.
- Proceso 2:** Procesamiento matemático con lectura y escritura de información al disco.
- Proceso 3:** Proceso de desfragmentación del disco rígido.

d) **Proceso 4:** Proceso de grabado a CD/DVD. En la Fig. 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 THDI% 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 THDI del 13%, como consecuencia del mayor aporte de los armónicos de orden superior cuando la CPU tiene más exigencia de trabajo.

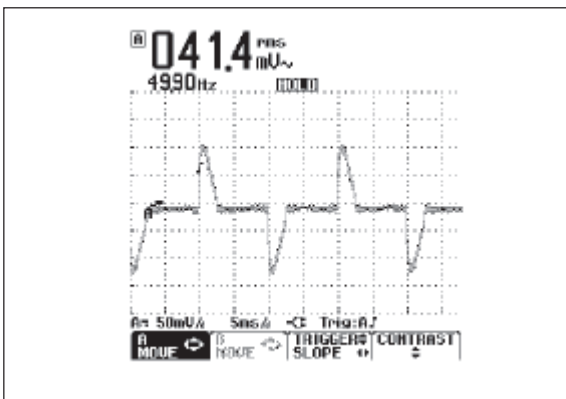
Proceso 1



Proceso 2



Proceso 3



Proceso 4

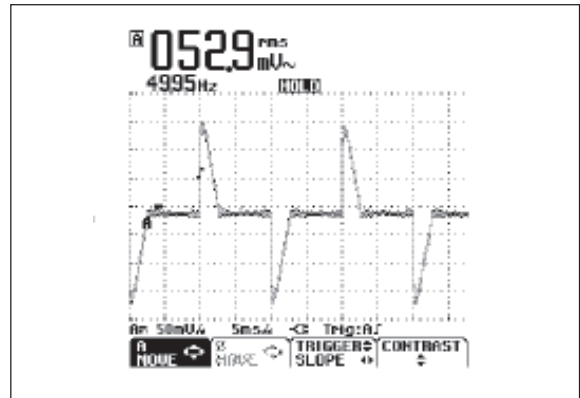


Figura 1. Capturas de los oscilogramas de corriente registrados con osciloscopio digital de una misma PC con distintos regímenes de funcionamiento, procesos 1 a 4, (1 mV=10 mA).

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

Parámetros	Procesos			
	1	2	3	4
% THDI	101.86	102.37	111.73	114.82
IRMS [A]	0.401	0.549	0.414	0.529
Fund.[A]	0.397	0.530	0.381	0.484
13 [A]	0.322	0.424	0.328	0.408
15 [A]	0.206	0.260	0.217	0.288
17 [A]	0.086	0.130	0.123	0.168
19 [A]	0.053	0.100	0.061	0.100
111 [A]	0.063	0.097	0.058	0.091
113 [A]	0.042	0.062	0.050	0.075
115 [A]	0.019	0.042	0.030	0.054
117 [A]	0.023	0.051	0.017	0.038
119 [A]	0.027	0.042	0.023	0.039
121 [A]	0.014	0.028	0.021	0.035

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 THDI del 85%, mientras que el convencional de tubo de rayos catódicos, 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.

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 THDI% 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 solo 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 dificultosos de ser tratadas con la FFT.

Tabla 2. Análisis armónico de monitores e impresora láser.

	Monitor CRT	Monitor LCD	Impresor
% THDI	95.91	85.04	16.14
RMS [A]	0.370	0.232	2.943
Fund. [A]	0.378	0.250	2.906
I3 [A]	0.300	0.175	0.382
I5 [A]	0.180	0.100	0.226
I7 [A]	0.072	0.055	0.114
I9 [A]	0.015	0.023	0.001
I11 [A]	0.041	0.020	0.063
I13 [A]	0.033	0.010	0.034
I15 [A]	0.012	0.015	0.026
I17 [A]	0.016	0.010	0.037
I19 [A]	0.019	0.011	0.030
I21 [A]	0.011	0.008	0.022

4. 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 una impedancia Z_1 correspondiente a la componente fundamental I_1 , asociadas a fuentes de corrientes que incluyen los armónicos obtenidos del análisis de Fourier, Fig. 2.

La resistencia R_1 y la reactancia X_1 conforman los componentes de la impedancia Z_1 , que sometida a la tensión de alimentación U_1 , expresan el consumo de la onda fundamental de corriente: $I_1=U_1/Z_1$. Las fuentes de corriente acopladas en paralelo representan los armónicos (desde el orden $k=3$ hasta el 21). El circuito se completa con la fuente de corriente alterna U_1 , la impedancia de la fuente Z_s y la propia impedancia de los cables de alimentación Z_c .

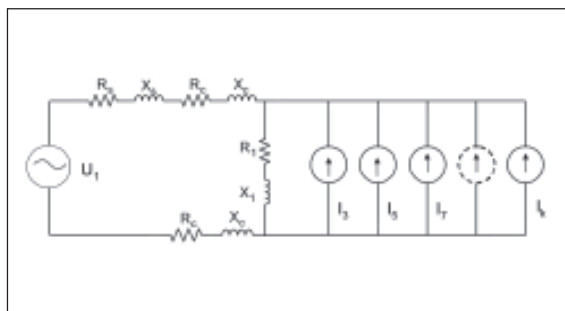


Figura 2. Modelo equivalente de cargas no lineales simuladas en el ATP.

5. Análisis del efecto diversidad

Con los modelos equivalentes similares a los de la Fig. 2, simulamos en el ATP y 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 solo se ha contemplado la impedancia de los cables de alimentación ($Z_c=0.015+j0.001\emptyset$), despreciando la impedancia de la fuente con el propósito de no superponer la distorsión de la tensión provocado por el efecto atenuación.

Escenario 1

Analizamos 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 simulamos 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).

Escenario 2

Examinamos 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

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

Parámetros	Combinación de cuatro CPU con distintos regímenes de funcionamiento	FD _k
% THDI	106.48	-
RMS [A]	1.850	-
Fund. [A]	1.791	0.999
I3 [A]	1.476	0.997
I5 [A]	0.965	0.994
I7 [A]	0.505	0.996
I9 [A]	0.304	0.967
I11 [A]	0.288	0.934
I13 [A]	0.218	0.949
I15 [A]	0.134	0.926
I17 [A]	0.106	0.826
I19 [A]	0.104	0.797
I21 [A]	0.083	0.845

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

Parámetros	CPU	Monitor LCD	Comb.	FD _k
%THDI	97.47	95.91	94.67	-
RMS [A]	0.398	0.370	0.760	-
Fund. [A]	0.403	0.378	0.781	0.999
I3 [A]	0.323	0.300	0.617	0.991
I5 [A]	0.191	0.180	0.367	0.989
I7 [A]	0.081	0.072	0.153	1.000
I9 [A]	0.041	0.015	0.026	0.469
I11 [A]	0.052	0.041	0.053	0.566
I13 [A]	0.037	0.033	0.046	0.659
I15 [A]	0.023	0.012	0.035	0.988
I17 [A]	0.017	0.016	0.006	0.195
I19 [A]	0.016	0.019	0.008	0.230
I21 [A]	0.010	0.011	0.003	0.126

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

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.

Escenarios 3

Para evaluar la incidencia de la impresora láser en combinación con PCs, realizamos 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.

6. Efecto de la atenuación

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

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

Parámetros	CPU	Monitor LCD	Comb.	FD _k
% THDI	97.47	85.04	73.09	-
RMS [A]	0.398	0.207	0.484	-
Fund. [A]	0.403	0.250	0.576	0.882
I3 [A]	0.323	0.175	0.378	0.760
I5 [A]	0.191	0.100	0.169	0.581
I7 [A]	0.081	0.055	0.024	0.175
I9 [A]	0.041	0.023	0.038	0.594
I11 [A]	0.052	0.020	0.022	0.300
I13 [A]	0.037	0.010	0.033	0.694
I15 [A]	0.023	0.015	0.027	0.707
I17 [A]	0.017	0.010	0.009	0.329
I19 [A]	0.016	0.011	0.027	0.999
I21 [A]	0.010	0.008	0.016	0.893

Para analizar como impactan en la atenuación la cantidad de unidades de PCs conectadas en un centro de cómputos, modelamos en el ATP un sistema trifásico de cuatro hilos, de 3x380V, manteniendo constantes los parámetros de la red: Zs=0.55+j0.05∅. A este sistema le iremos conectando modelos idénticos de PCs (combinación de CPU y monitor LCD), obteniendo para cada una de las simulaciones los índices de distorsión de corriente y tensión (THDI y THDU); se resumen en la Tabla 7.

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

Parámetros	Impres.	10 PCs	Comb.	FD _k
% THDI	14.69	103.45	61.96	-
RMS	3.07	5.62	7.12	-
Fund. [A]	4.30	5.53	8.56	0.87
I3 [A]	0.55	4.63	4.09	0.79
I5 [A]	0.23	2.97	2.91	0.91
I7 [A]	0.14	1.35	1.49	1.00
I9 [A]	0.08	0.33	0.34	0.83
I11 [A]	0.07	0.53	0.54	0.90
I13 [A]	0.08	0.36	0.44	0.98
I15 [A]	0.05	0.07	0.07	0.62
I17 [A]	0.06	0.15	0.18	0.86
I19 [A]	0.02	0.24	0.26	0.99
I21 [A]	0.01	0.11	0.10	0.89

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

Unidades de PCs	THDI %	THDU %
3	99.53	1.29
6	97.08	2.53
9	93.8	3.70
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 en las Tabla 7 que de un THDI inicial e individual superior al 100%, al conectar 39 unidades desciende al 64%. Esta disminución está estrechamente vinculada a la relación Xs/Rs.

La distorsión máxima de tensión THDU alcanza un valor superior al 11%.

En las Tabla 8 y 9, se resumen 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 la 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 I1 por lo que influirá significativamente en la elevación de la corriente de neutro, aun estando equilibradas las cargas. De los otros componentes

dominantes, el quinto alcanza el 50% y el séptimo el 25% de I1, 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 Cantidad	FA ₁	FA ₃	FA ₅	FA ₇	FA ₉
3	0.984	0.979	0.962	0.925	0.914
9	0.967	0.939	0.865	0.735	0.751
15	0.949	0.884	0.734	0.533	0.637
21	0.931	0.826	0.601	0.369	0.548
27	0.914	0.769	0.476	0.277	0.468
33	0.881	0.702	0.364	0.333	0.492
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 Cantidad	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
9	0.722	0.574	0.609	0.606	0.458	0.498
15	0.459	0.343	0.488	0.228	0.351	0.343
21	0.220	0.331	0.357	0.274	0.468	0.140
27	0.116	0.421	0.216	0.451	0.467	0.060
33	0.145	0.480	0.570	0.487	0.275	0.713
39	0.300	0.468	0.027	0.437	0.177	0.231

7. 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 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. Se programó en el equipo una medición cada 5 minutos durante una semana. Los registros fueron recuperados y procesados posteriormente en planillas de cálculo.

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

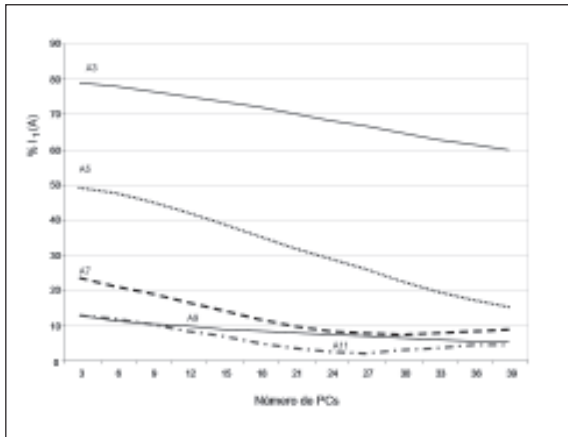


Figura 3. Evolución de los componentes armónicos (3 a 11) en porcentaje de la componente fundamental y en función del número de PCs conectadas.

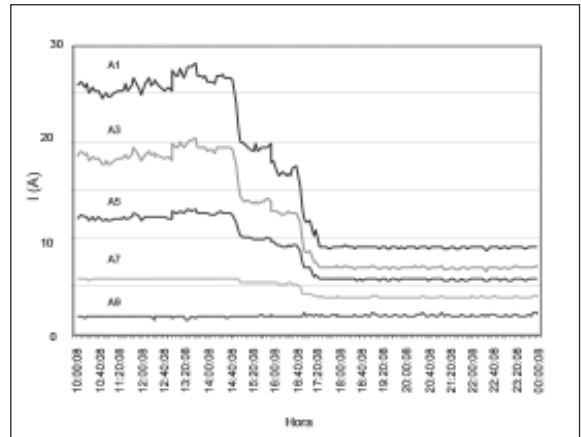


Figura 6. Evolución de los componentes armónicos (1 a 9) a lo largo de un día laboral 0,00E+00.

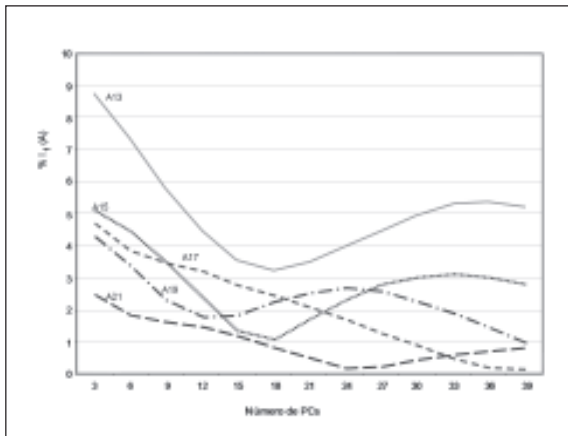


Figura 4. Evolución de los componentes armónicos (13 a 21) en porcentaje de la componente fundamental y en función del número de PCs conectadas. El horario habitual de trabajo de este centro de cómputos es de 9 a 17 hs. Fuera de este horario solo quedan unas pocas cargas conectadas (20%, aproximadamente), conformadas por unidades de PCs realizando trabajos programados.

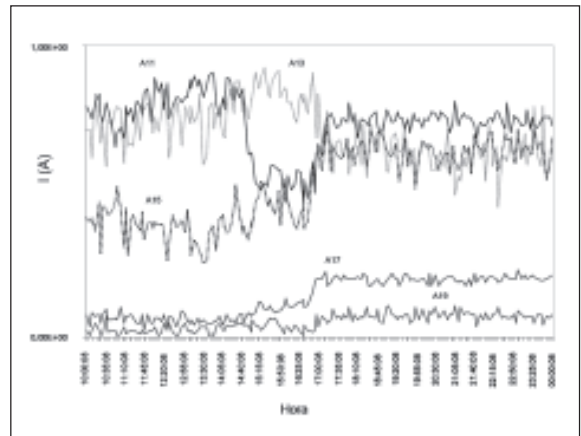


Figura 7. Evolución de los armónicos 11 a 19 a lo largo de un día laboral.

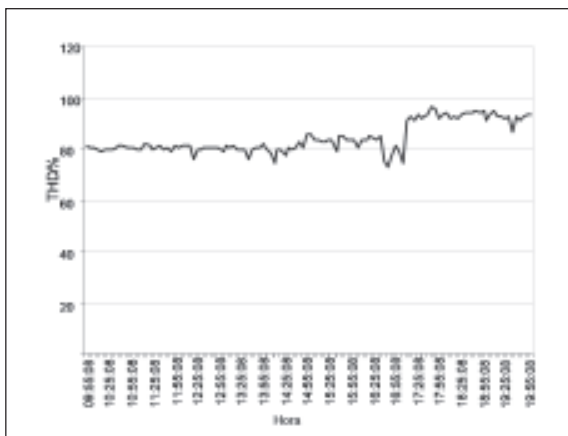


Figura 5. Evolución del THDI de una fase a lo largo del día.

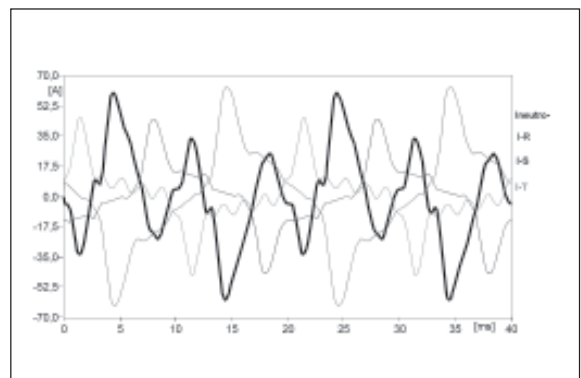


Figura 8. Oscilogramas de las corrientes de líneas y neutro en el horario de máxima carga.

Los valores eficaces máximos medidos y registrados en las tres fases fueron: 29.5A, 18.9A y 16.5A. Con estos datos la corriente de neutro alcanzó un valor de 27A, registro cercano a la corriente de la fase más cargada.

8. Conclusiones

En este trabajo se han analizado distintos modelos de cargas no lineales que comúnmente hallamos 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 para uso compartido, 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 son 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. Por otro lado, 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 (armónicos 13). Esta aseveración resultante de las simulaciones efectuadas en el ATP fueron comprobadas en las mediciones de campo.

h) 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 diversidad (Tabla 5), mientras que en la práctica nos encontramos con combinaciones mayoritariamente (90%) conformadas con CPU y CRT, con altos valores de FD (Tabla VI).

i) 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.

j) La corriente de neutro medida arrojó una relación de 0.93 veces la corriente de línea de la fase más cargada. Este valor si bien es alto está lejos del máximo teórico (1.73) en virtud del desequilibrio de las cargas [4] y [10].

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 ($THDI$, $THDU$, 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 y W. T. Jewell. Effects of harmonics on equipment, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 8, pp. 672-680, Abril 1993.
2. D. Paraiso, É. Ngandui, M. de Montigny y P. Siccard; Characterization of neutral and line current harmonics in three-phase computer power systems, Industrial Electronics Society, Actas del 31º Conferencia Anual de la IEEE- IECON, Raleigh, USA 6 al 10 de noviembre 2005.
3. Sainz L., J. Pedra, J. y 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. Cadavid D y L. Gallego; Armónicos y problemas de “power quality” en el conductor de neutro en sistemas trifásicos, Scientia Et Technica; Volumen 22, pp.19-24, 2003.
5. Desmet J. y otros cuatro autores; Analysis of the neutral conductor current in a three phase supplied network with non-linear single phase loads, Actas del Electric Machines and Drives Conference, IEMDC IEEE International, Cambridge, USA Junio 2001.
6. C. Demoulias C, Z. Kampouri y K. Gouramanis; Natural canceling of current harmonics in office loads and its effect upon the transmission capacity of distribution cables, Actas del IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, Reino Unido, 30 de junio al 2 de julio, 2008.
7. A. Mansoor, W.M. Grady, A. H Chowdhury, M. J Samoty, An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 10, pp. 467 – 473, Enero 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, Volumen 131, pp. 81-84, Mayo 1984.
9. A. Mansoor A. y 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 on, Volumen: 2, pp 883-889, Octubre 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, Nº 1 – 2010, pp 77-89.

