

# PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN PC Y EN REDES, INFLUENCIA DE LA CORRIENTES EN LAS PROTECCIONES

Ing. Jorge Romanello\*  
Ing. Roberto Flores

## Introducción

Desde hace algunos años que asistimos al crecimiento masivo de las cargas electrónicas en todos los sectores de actividad. La necesidad de lograr cada vez mayor calidad de vida y mayor eficiencia en las industrias y servicios ha llevado a la utilización de equipos y sistemas que absorben, en su gran mayoría, *corrientes no lineales* con un alto contenido de armónicas.

Una de las principales consecuencias de estas corrientes es que aún siendo conectadas a una onda de tensión senoidal pura le producen a esta última una distorsión transformándola en una onda también deformada o no senoidal. Esta perturbación introducida a la energía distribuida por las compañías resulta en una verdadera contaminación de las redes eléctricas.

Obviamente, el impacto de la perturbación depende de la magnitud de la potencia en juego de la carga electrónica o *carga no lineal* respecto de la potencia disponible en la toma de la red.

Hasta mediados de los ochenta, la generación y distribución se planeaba sobre la base de cargas resistivas y/o reactivas que se pueden denominar cargas lineales. A partir de esa época el crecimiento de las cargas no lineales se ubicaba en un 20% de la demanda total esperando llegar a un 65 % para el año 2000.

\* El presente trabajo ha sido realizado con la colaboración de los siguientes estudiantes: Fastovsky, Ariel, Fastovsky, Diego, Rodríguez, Ariel, Ordovini, Sergio y Berruti, **Germán**.

En nuestro país, el crecimiento de las cargas no lineales está en plena evolución, esto significa que se utiliza cada vez más cargas no lineales y que afectan en mayor o menor grado a las redes eléctricas.

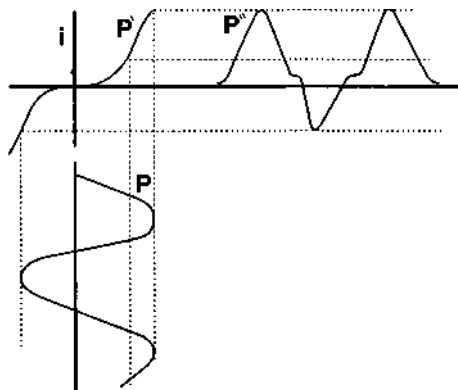
Este trabajo se lo ha dividido en varios capítulos donde primero se da una base teórica del tema, verificándola con las mediciones hechas en laboratorio, luego se diseña una instalación típica y por último se da una conclusión rescatando los factores más importantes estudiados.

### Las cargas lineales y no lineales

En la práctica existe una gran cantidad de cargas no lineales en las cuales la tensión instantánea no es proporcional a la corriente, a su derivada o a su integral. Sin tratarse de cargas electrónicas se encuentran cargas tales como resistencias, inductancias o capacitancias cuyos valores no son constantes y están en función de la corriente. A menudo la no linealidad de la carga es deseable y se la incluye en el diseño del circuito para alguna aplicación particular.

Un ejemplo común lo constituye bobinas con núcleo de hierro o aleaciones ferromagnéticas. El flujo magnético en el núcleo no es proporcional a la corriente de la bobina, ocurre la saturación magnética y la curva característica no es una línea recta sino una curva.

Considerando el ejemplo de una resistencia no lineal y viendo que ocurre cuando se le aplica una tensión senoidal, se observa que la



curva característica que relaciona la corriente y la tensión no es una línea recta como ocurriría en el caso de una resistencia lineal.

Trasladando punto a punto la onda de tensión se obtiene una onda de corriente que no es senoidal sino que está deformada. Si en cambio la curva característica fuese una línea recta, la onda de corriente sería una onda senoidal.

Se define como *carga lineal* aquellas cargas en las cuales las corrientes consumidas tiene la misma forma de onda que la tensión de alimentación. Si la carga es resistiva, la tensión y la corriente se hallan en fase. Si la carga es reactiva, la corriente estará atrasada respecto de la tensión (reactancia inductiva) o en adelanto (reactancia capacitiva). Es muy importante recordar que cualquier resistencia, inductancia o capacitor en los cuales circule una corriente senoidal, tiene en sus terminales una tensión senoidal y que *la suma o la diferencia de dos ondas senoidales de la misma frecuencia es otra onda senoidal*. Por lo tanto si la corriente o tensión en cualquier parte de una red lineal es senoidal, la corriente y tensión en todas sus partes también será senoidal.

Se define como *carga no lineal* aquellas cargas en las cuales la corriente consumida está deformada respecto de la onda de tensión senoidal de alimentación.

Esta deformación, se obtiene con cargas tales como computadoras y sus periféricos, rectificadores, variadores electrónicos de velocidad de motores, autómatas industriales y también con lámparas a descarga a las cuales se deben agregar los balastos inductivos, los balastos electrónicos y las lámparas fluorescentes compactas. Esto significa que un edificio de oficinas o una planta industrial es una fuente de cargas no lineales que debe analizarse cuidadosamente desde el punto de vista de sus redes eléctricas internas y externas, al igual que un centro de cómputos.

Con la introducción de los microchips han aparecido equipamientos que funcionan con niveles de tensión similares a los utilizados en el procesamiento de datos y que se denominan en forma general como equipamientos electrónicos sensibles y que requieren la misma calidad de alimentación. El problema consiste en manejar adecuadamente estas cargas sabiendo que ellas también pueden contribuir con sus propias perturbaciones a la calidad de alimentación que exigen Para su correcto funcionamiento.

En cuanto al servicio de la alimentación externa del establecimiento ésta se halla bajo la responsabilidad de las compañías de distribución. La calidad de energía que entregan debe estar dentro de los estándares de fiabilidad necesarios para las cargas sensibles que ya están o se están por incorporar.

Una caída de tensión entre el 10 y el 100 % con una duración comprendida entre 10 ms y algunos segundos, puede desencadenar una Serie de inconvenientes entre los cuales se pueden mencionar:

- Error o parada de computadoras
- Desenganche de contactores con posible parada de motores
- Apagado de las lámparas a descarga
- Defecto de conmutación en los puentes a tiristores
- Variación de velocidad de motores
- Funcionamiento anormal en los sistemas de regulación

Para un centro de procesamiento de datos las exigencias en cuanto a la alimentación pueden ser las siguientes:

- Tolerancia en frecuencia  $\pm 0.5$  Hz
- Tolerancia en tensión (régimen estático) + 9 %
- Tolerancia en tensión (régimen dinámico) + 1 5 % ó -1 8 % de la tensión nominal y con retorno a la tensión normal dentro de los 0.05 segundos
- Desbalance entre fases no mayor al 2,5 % del valor medio de las tres tensiones en cada fase
- Distorsión total de la tensión no mayor al 5 %

Se debe tener en cuenta que las perturbaciones eléctricas provienen tanto de la red como de las cargas conectadas a ella por lo tanto también hay que hablar de auto polución.

En la figura se observa que la corriente está deformada y no es senoidal. La idea de las armónicas es que *onda deformada puede descomponerse en la suma de una serie de ondas senoidales de diferentes frecuencias*. Para una carga no lineal se puede calcular la expre-

sión de la corriente si se conoce la ecuación que caracteriza la corriente en función de la tensión. Para simplificar:

$$i = K \cdot V \mathcal{E}$$

donde:  $K$  es una constante determinada experimentalmente

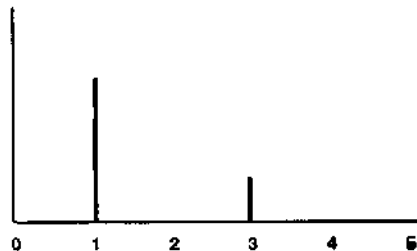
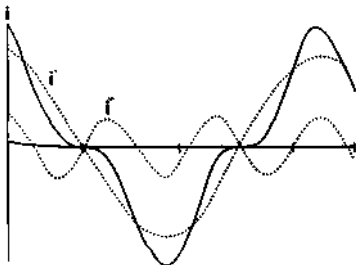
$$\text{pero } v = V_m \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Reemplazando resulta:

$$i = K [ V_m \cdot \cos(\omega \cdot t) ] \mathcal{E}$$

$$= K \cdot V_m \mathcal{E} [ \frac{1}{4} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{3}{4} \cdot \cos(3 \cdot \omega \cdot t) ]$$

Por lo tanto la onda de corriente deformada tiene un valor pico de  $i_m = K \cdot V_m \mathcal{E}$  y su forma surge de la suma de una onda senoidal de la misma frecuencia la tensión aplicada más una onda senoidal cuya frecuencia es tres veces la de la tensión. La siguiente figura muestra la suma de las dos ondas senoidales que da la onda de corriente deformada  $i = i' + i''$ . A la primera se la llama fundamental ya que tiene la misma frecuencia que la onda de tensión y a la segunda se la llama tercera armónica puesto que tiene una frecuencia tres veces mayor. La fundamental tiene una amplitud tres veces mayor que la tercera armónica y ambas tienen su valor pico en el mismo instante.



Una carga no lineal genera armónicas en la red cuya amplitud y frecuencia dependerá de la deformación de la onda de corriente cuando se aplica una tensión senoidal.

Si bien resulta más sencillo trabajar con ondas de tensión o de corriente senoidales de 50 Hz, en la práctica a menudo se encuentran ondas no senoidales entregadas por generadores, osciladores electrónicos, rectificadores y otros dispositivos que pueden generar tensiones alternas. Cuando la deformación no es importante se pueden utilizar los medios convencionales de cálculo. Pero si se trata de un generador de onda cuadrada que alimenta a un carga lineal, se consideran las componentes fundamental y armónicas cuya suma conforma la onda cuadrada aplicando la serie de Fourier.

Si la carga es no lineal y se aplica una tensión no senoidal es muy posible que se obtengan armónicas a la salida que no estaban presente en la entrada.

Para medir una corriente alterna senoidal se utiliza la relación entre el valor pico y  $\sqrt{2}$  que se denomina *valor eficaz* de la corriente, y que es lo mismo que decir que el valor eficaz de una corriente o tensión es 0.707 de su valor pico.

Para una onda no senoidal se utiliza la relación entre el valor pico y el valor eficaz que se denomina factor de *cresta*:

$$F_c = I_p / I_{ef}$$

Si la onda es senoidal el factor de cresta resulta igual  $\sqrt{2} = 1,414$ . Para otra forma de onda, deformada o no senoidal, el factor de cresta será mayor y por lo tanto indicativo de que se está en presencia de una carga no lineal. Una onda senoidal y una no senoidal pueden tener la misma corriente eficaz, sin embargo el factor de cresta de la primera será menor que el de la segunda.

La medición del factor de cresta es un primer paso para saber si se está en presencia de una corriente deformada, si bien no dice nada respecto a la composición armónica de la onda.

## Las armónicas en centros informáticos

Un centro informático está constituido por equipamientos tales como computadoras, discos magnéticos, modems, impresoras y otros periféricos que recortan la onda de tensión de alimentación de 50 Hz absorbiendo corrientes no senoidales.

Como consecuencia estos equipamientos se comportan como generadores de corrientes armónicas que circulan por la red y perturban al conjunto de los aparatos que se hallan conectados a ella. Toda corriente armónica generada por una carga no lineal atraviesa al generador de tensión, dado que éste no tiene una impedancia interna nula, cuanto mayor sea la misma, mayor será la tensión deformada en los terminales del generador y de las cargas.

### Mediciones realizadas en laboratorio:

Para una computadora: 486 DX2, 50 Mhz, 8 Mb Ram

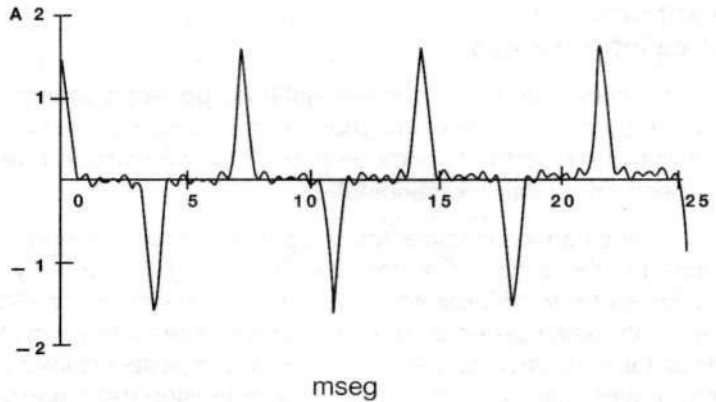
Tensión: 203 V

Corriente: 0,365 A

Potencia: 80 W (activa)

Resistencia: 0,43 8 ohm

Armónica	Frecuencia (Hz)	Tensión (V)	Corriente (A)
1 <sup>a</sup>	50	0,2	0,457
3 <sup>o</sup>	150	0,175	0,4
5 <sup>o</sup>	250	0,125	0,285
7 <sup>o</sup>	350	0,09	0,205
9 <sup>o</sup>	450	0,06	0,137
11 <sup>o</sup>	550	0,02	0,046
13 <sup>o</sup>	650	0	0
15 <sup>o</sup>	750	0,015	0,034
17 <sup>o</sup>	850	0,0075	0,017
19 <sup>o</sup>	950	0,001	0,002
21 <sup>o</sup>	11050	10,0005	0,001

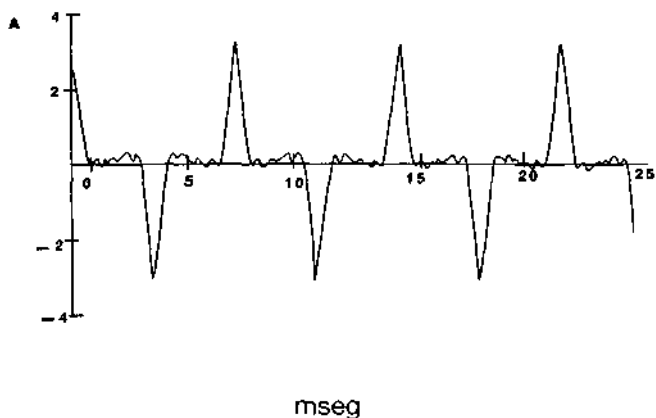


Para dos computadoras:

486 DX2, 50 Mhz, 8 Mb Ram  
 486 DX4, 100 Mhz, 16 Mb Ram  
 Tensión: 203 V  
 Corriente: 0,795 A  
 Potencia: 176 W (activa)  
 Resistencia: 0,43 8 ohm

Armónica	Frecuencia (I-E)	Tensión V	Corriente (A)
1°	50	0,4	0,913
3°	150	0,38	0,868
5°	250	0,225	0,5 14
7°	350	0,125	0,285
9°	450	0,050	0,114
11°	550	0,015	0,034
13°	650	0,045	0,103
15°	750	0,050	0,114
17°	850	0,035	0,08
19°	950	0,02	0,046
21°	1050	10,025	10,057





Se debe considerar que no todas las armónicas poseen la misma secuencia. Las armónicas 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, etc., son de secuencia positiva. Las armónicas 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, etc., son de secuencia negativa. Las armónicas 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, etc., son de secuencia cero u homopolar.

Las de secuencia positiva dan origen a campos que rotan en el mismo sentido que la fundamental, mientras que las de secuencia negativa originan campos en sentido contrario con lo cual la corriente en el neutro resulta nula.

Contrariamente a esto, las armónicas de secuencia cero no generan campos rotatorios.

Para una red trifásica con neutro y cargas lineales e iguales (sistema equilibrado) las corrientes de las fases de 50 Hz son iguales y separadas por  $120^\circ$  y se cancelan unas con otras en el neutro con lo cual resulta  $I_n = 0$ .

Para la corriente de la 2<sup>o</sup> armónica también se completa la cancelación con lo cual la corriente en el neutro resulta nula. Esto es válido para las armónicas pares.

Para la tercera armónica ocurre que las tres corrientes en el neutro se hallan en fase. La razón es que si bien están desplazadas una de otra  $120^\circ$ , esto equivale a  $360^\circ$  de la 3<sup>o</sup> armónica.

Cada onda está desplazada de las otras por un ciclo completo de la 3<sup>o</sup> armónica de 360° lo que es equivalente a que no haya desplazamiento. Esto es también válido para los múltiplos impares de la 3<sup>o</sup> armónica (9, 15, 21, etc.). De aquí resulta que estas corrientes se suman en el neutro matemáticamente.

Las otras armónicas tales como las 5, 7, 11, 13, etc. se suman en el neutro en forma vectorial resultando en adiciones y cancelaciones parciales y por lo tanto su importancia no es apreciable frente a la suma matemática de las anteriores.

Como se puede imaginar en una oficina con una apreciable cantidad de computadoras resulta un serio problema si no se toman las precauciones necesarias para controlar estas fuentes generadores de armónicas y dimensionar adecuadamente las instalaciones eléctricas para la alimentación desde el punto de vista de las redes internas.

Los centros informáticos constituyen un doble problema dado la abundancia de electrónica sensible para lo cual se requiere una calidad de energía definida y por otro lado las mismas cargas constituyen fuentes de armónicas por su característica de carga no lineal que afectan a la calidad de la energía a suministrar.

### **3 - Consecuencias de las cargas no lineales**

Nos ocuparemos de las consecuencias que en general ocasionan este tipo de cargas en franco crecimiento y en todas las actividades. Algunas se manifiestan de forma casi instantánea y otras en plazos mayores. Por estas razones es conveniente realizar desde un principio el análisis si se trata de un proyecto nuevo o realizar una detallada inspección en el establecimiento con mediciones periódicas y en distintos puntos de la red.

En una medición de corriente sobre el neutro podemos observar una de las primeras consecuencias que nos pueden sorprender. Si partimos del supuesto de una carga equilibrada tendríamos que medir  $I_n = 0$  pero en realidad la corriente en el neutro no sólo no es nula sino que es mucho mayor que la de fase. Si como es habitual, la sección del neutro está dimensionada a la mitad de la sección de la fase nos halla-

remos frente a un sobrecalentamiento inmediato del conductor y a su casi segura fusión. Por esta razón, en centros informativos hay que dimensionar la red trifásica con un neutro de sección mayor a la de fase ya que las cargas informativas son importantes generadores de corriente de tercera armónica.

Como en general no se conoce la composición armónica, se recomienda utilizar para este tipo de cargas de pequeña y mediana potencia secciones de neutro iguales a las de fase.

Algunos organismos sugieren entre 1,5 y 1,73 veces la sección de la fase. Por los conductores de fase tenemos circulando la fundamental y las armónicas y su sección debe calcularse sobre dicha base. La impedancia del cable depende de la frecuencia de la corriente. Para un conductor dado, la resistencia aumenta con la frecuencia (efecto pelicular) y además la inductancia lo es directamente proporcional a la frecuencia. La caída de tensión en un conductor es:

$$Au = I \cdot (R \cdot \cos \phi + L \cdot \omega \cdot \sin \phi)$$

La combinación de ambas situaciones nos lleva a considerar el cálculo de las secciones de conductores con un margen de protección. En un centro informática y ante el eventual desconocimiento de la composición armónica es adecuado considerar una caída de tensión de 3 a 4 veces superior a la producida por una corriente de 50 Hz. Todo lo hemos considerado bajo la condición de carga equilibrada. En caso contrario hay que agregar las corrientes respectivas por el neutro. Estas consideraciones de sobre-dimensionamiento tienen como finalidad evitar el aumento de temperatura en los conductores a los fines de preservar la aislación de un envejecimiento prematuro o su fusión en el caso extremo que hemos señalado.

Otra consideración de importancia en estos centros son las radiaciones de la circulación de armónicas es importante ya que éstas pueden perturbar el ambiente. Puede ocurrir que en un ámbito cargado de PC o terminales estas radiaciones produzcan efectos tales como parpadeo en las pantallas. Para evitar esto es importante blindar todos los conductores de alimentación que atraviesan áreas de equipamiento sensible.

Los transformadores que alimentan cargas no lineales también presentan problemas de sobrecalentamiento. Las pérdidas magnéticas o pérdidas en el hierro debidas al flujo magnético variable son mayores que las calculadas con una onda senoidal. Tanto las pérdidas por histéresis como las pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault dependen de la frecuencia y por lo tanto se incrementan en presencia de corrientes armónicas.

A esto se debe agregar las pérdidas en los conductores de cobre por efecto pelicular. Por lo tanto un transformador de una determinada potencia en KVA conectado a una carga no lineal puede sobrecalentarse y llegar también en algunos casos a su punto de falla. Nuevamente es necesario sobredimensionar la potencia. Los transformadores más corrientes son del tipo triángulo (primario) - estrella (secundario) y aquí nuevamente el conductor de neutro de la estrella tiene que estar bien dimensionado con secciones entre 1,5 y 1,73 veces la sección de las fases.

Una utilización muy conveniente en centros informativos es un transformador de aislación del tipo descrito anteriormente. Estando la carga no lineal conectada a la estrella (secundario) es posible evacuar por el neutro las terceras armónicas y evitar su propagación a la red (lado primario). Para reducir la impedancia homopolar en el secundario se suele utilizar un bobinado zig-zag Dz0 ó Dz6.

Esto permite también en un centro informático crear un circuito de neutro a tierra mientras que el resto del edificio será de neutro impedante. Como beneficio adicional, se reducen las perturbaciones mutuas a las cargas vecinas y las caídas de la tensión en líneas de recorrido largo.

Cuando en un centro informática se utiliza un UPS como sistema más efectivo para acondicionar la energía que alimentará toda la electrónica sensible, es importante no olvidarse que dicho sistema puede hallarse sobre su by-pass estático (falla o sobrecarga) o sobre su by-pass de mantenimiento. Si se coloca un transformador triángulo-estrella con neutro a tierra se mantendrán las consideraciones anteriormente descriptas aún con el UPS fuera de servicio.

Dada la importancia de las terceras armónicas en régimen desequilibrado, es recomendable poner el neutro de la red de un centro informática directamente a tierra. Toda resistencia que ofrezca el neu-

tro crea tensiones importantes con relación a la masa y limita la evacuación de las altas frecuencias generadas por los sistemas. El circuito de tierra debe ser sobredimensionado y es recomendable que las masas de los equipos se conecten en forma radial al punto común de tierra, es decir un conductor de tierra individual desde cada equipo.

Los dispositivos tales como interruptores, contactores, disyuntores, etc. son afectados por corriente muy cargadas en armónicas. Nuevamente se producen sobrecalentamientos producidos por efecto pelicular, radiaciones y pérdidas en el hierro con efectos mecánicos más importantes que en 50 Hz. Cuando se suponga que los mismos serán atravesados por corrientes cargadas de armónicas hay que sobredimensionar.

Los medidores de energía también se ven afectados por la presencia de armónicas en las redes con cargas no lineales. Ocurre que el disco de inducción gira más lento o más rápido que si estuviera siendo utilizado con una onda de 50 Hz dependiendo del contenido específico de las componentes armónicas con lo cual resulta imposible saber si marca por exceso o defecto.

Los rectificadores constituyen una de las principales fuentes generadores de armónicas y reinyectan hacia la red corrientes armónicas principalmente la quinta (H5 de 250 Hz) y la séptima (H7 de 350 Hz), dependiendo de su diseño.

A continuación haremos un análisis de algunos tipos de rectificadores:

- Rectificador de 6 pulsos resultan las siguientes armónicas  
\* H5, H7, H 11, H 13, H17, H19, etc. con un THD de corriente  $\leq 30\%$  con un factor de potencia  $\geq 0,82$ .
- Rectificador de 12 pulsos: las armónicas resultan H11, H13, H23, H25, etc. con un THD  $< 11\%$  con un factor de potencia  $> 0,85$ .
- Rectificador de 24 pulsos: las armónicas resultan H23, H25, etc. con un THD  $< 4\%$  y un factor de potencia  $> 0,85$  es obvio que a medida que aumentamos los pulsos, disminuye la reinyección de armónicas y por lo tanto su distorsión total.

Las pérdidas en el hierro por histéresis dependen de la frecuencia y las pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault dependen del cuadrado de la frecuencia. La presencia de las armónicas H5 y H7 incrementarían las pérdidas de 25 a 49 veces más que lo normal. Si las máquinas no están holgadamente dimensionadas en potencia, la circulación de estas armónicas pueden producir serios problemas de sobrecalentamiento o quemado.

Otra de las consecuencias de los rectificadores es la propagación de perturbaciones causadas por los pulsos de conmutación de los tiristores. Las frecuencias de las oscilaciones se ubican en algunos KHz pudiendo afectar equipamientos audiovisuales, contadores electrónicos y también producir algunos ruidos audibles. Para el caso de rectificadores en áreas industriales, centrales telefónicas e incluso en un UPS para un centro informática es indispensable reducir o eliminar la reinyección de armónicas.

Un método económico es utilizar un filtro de armónicas sintonizado a las armónicas que se desea eliminar. Sin embargo esta solución tiene algunas desventajas tales como la presentación de una antirresonancia que puede amplificar algunas armónicas de la red, el factor de potencia global se puede volver capacitivo con riesgo para el transformador de B.T. o para el G.E. (grupo eléctrico).

Por lo visto anteriormente la mejor manera de eliminar las armónicas H5 y H7 es aumentar los pulsos del rectificador. Un rectificador dodecafásico (12 pulsos) resulta adecuado para un UPS ya que elimina las armónicas H5 y H7 además de las H 17, H 19, H 29 y H 31.

Otro de los inconvenientes de los filtros sintonizados es su inflexibilidad frente a las variaciones de la carga en la red o envejecimiento, temperatura, etc. de los componentes del filtro. El aumento de pulsos en un rectificador es una solución que tolera ampliamente las variaciones que puede presentar la red cuando se la modifica. Es decir que tanto frente a la baja impedancia de la red o a la impedancia de un G.E. de emergencia, cuya impedancia puede ser tres o más veces mayor que la de la red, un rectificador de 12, 18 o 24 pulsos resulta una solución definitiva. Por supuesto se la debe prever desde el inicio de la instalación. Para un centro informática donde se piensa utilizar un UPS resulta muy importante desde ahora y no sólo por los problemas mencionados, considerar la perturbación de su reinyección de armónicas.

Debemos agregar una consideración importante. Cuando en un centro informática se instalan UPS en redundancia a los fines de aumentar la fiabilidad o el crecimiento en potencia, dos rectificadores de 12 pulsos actuarán como uno de 24 pulsos, mientras que dos rectificadores de 6 pulsos en paralelo y con filtro H5 mantendrán el mismo nivel de reinyección de armónicas.

Para solucionar los problemas de armónicas se proponen distintas soluciones basadas en filtros pasivos y nuevas tecnologías como los filtros activos o la combinación de ambos. Estos últimos conectados en paralelo entre la carga y la red de alimentación inyectan corrientes armónicas que se oponen a las generadas por la carga. Conectados en serie con la red la compensación se realiza por la tensión armónica en el punto de conexión a la carga. Existen, por lo tanto, distintas configuraciones de filtros activos usando los principios de serie o paralelo. Una de las configuraciones más usuales es la de un inversor trifásico de tensión o de corriente, con modulación por ancho de pulso y un filtro de salida.

#### 4 - La potencia activa de las ondas poliarmónicas

La potencia entregada a un circuito en cualquier instante, se define por medio de la relación:  $p = e \cdot i$  y la potencia activa está dada por la relación:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e \cdot i \cdot da$$

donde:

$$e = E_0 + E_{m1} \cdot \sin(a + \alpha_1) + E_{m2} \cdot \sin(2 \cdot a + \alpha_2) + \dots + E_{mn} \cdot \sin(n \cdot a + \alpha_n) \cdot 0$$

$$i = I_0 + I_{m1} \cdot \sin(a + \alpha_1 + \beta_1) + I_{m2} \cdot \sin(2 \cdot a + \alpha_2 + \beta_2) + \dots + I_{mn} \cdot \sin(n \cdot a + \alpha_n + \beta_n) \cdot 0$$

Reemplazando en la fórmula de la potencia, resulta:

$$P = E_0 \cdot I_0 + E_{m1} \cdot I_{m1} \cdot \cos(\beta_1) + \frac{1}{2} \cdot E_{m2} \cdot I_{m2} \cdot \cos(\beta_2) + \dots + \frac{1}{2} \cdot E_{mn} \cdot I_{mn} \cdot \cos(\beta_n)_0$$

que en valores eficaces es:

$$P = E_0 \cdot I_0 + E1 \cdot I1 \cdot \cos(\beta_1) + E2 \cdot I2 \cdot \cos(\beta_2) + \dots + En \cdot In \cdot \cos(\beta_n)_0$$

siendo:

$E_0$  e  $I_0$  los valores constantes de tensión y corriente.

$E1, E2, \dots; En$  los valores eficaces de las tensiones que componen la onda de tensión poliarmónica

$I1, I2, \dots; In$  los valores eficaces de las corrientes que componen la onda de corriente poliarmónica.

$\beta_1; \beta_2; \dots, \beta_n$  los ángulos de fase de la impedancia para cada armónica.

Como sólo quedan los términos de frecuencias iguales, la potencia activa producida por las ondas de tensión y corriente de distinta frecuencia es nula. La potencia total activa resulta igual a la suma de las potencias activas de cada una de las armónicas que la componen siempre y cuando sean de la misma frecuencia. Es decir que, por ejemplo, la componente fundamental de la tensión y la componente fundamental de la corriente producen potencia activa mientras que la componente fundamental de la tensión y la tercera armónica de corriente no producen potencia activa.

Otro tema a considerar es el cálculo del factor de potencia para ondas poliarmónicas. La potencia aparente se define como:

$S = E \cdot I$  donde  $E$  es el valor eficaz de cualquier onda no senoidal y se expresa:

$$E = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} (En)^2}$$



e I es el valor eficaz de cualquier onda no senoidal y se expresa:

$$I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} (I_n)^2}$$

La potencia activa se define como:

$$P = E_0 \cdot I_0 + \sum_n E_n \cdot I_n \cdot \cos(\beta_n)$$

El factor de potencia se define como la relación entre la potencia activa y la potencia aparente. Dado que actualmente se utiliza para el caso de poliarmónicas el símbolo  $\lambda$ , el factor de potencia resulta:

$$\lambda = P/S$$

Dado que  $\beta$  es el ángulo de la impedancia para cada armónica lo podemos denominar como lo hacemos tradicionalmente, es decir  $\phi_n$  de este modo, el factor de potencia que lo denominaremos  $\lambda$  resulta:

$$\lambda = \frac{E_0 \cdot I_0 + \sum_n E_n \cdot I_n \cdot \cos(\beta_n)}{\sqrt{\sum_n (E_n)^2} \cdot \sqrt{\sum_n (I_n)^2}} \cdot \cos(\phi_n)$$

Esto nos indica que para la potencia activa los subíndices para E e I siempre serán iguales, es decir que sólo las armónicas comunes generan potencia activa mientras que para la potencia aparente intervienen todos los valores eficaces presentes de E e I.

Un caso particular y bastante frecuente en la práctica es considerar que la onda de tensión es senoidal y que la onda de corriente está deformada por la carga no lineal. En ese caso el valor eficaz de E resulta igual al de su fundamental, es decir a  $E_1$  y la expresión de  $\lambda$  se reduce a:

$$\lambda = \frac{E_1 \cdot I_1}{E \cdot \sqrt{\sum_n (I_n)^2}} \cdot \cos(\phi_1)$$

y simplificando:

$$\lambda = \frac{I_1}{I} \cdot \cos(\Phi_1) \text{ o}$$

donde  $I_1$  es el valor eficaz de la fundamental que es la única que entrega potencia mientras que  $I$  es el valor eficaz de toda la onda no senoidal de corriente. A la relación  $I_1/I$ , se la suele denominar como factor de contracción  $K$  y nos indica en cuanto se reduce o contrae el factor de potencia por el hecho de tratarse de una onda de corriente deformada. Si por el contrario, la onda de corriente fuese senoidal, la relación sería igual a uno ya que sólo tendríamos el valor eficaz de la corriente fundamental que es la misma que  $I$  y en ese caso resulta:

$$\lambda = \cos(\Phi_1) \text{ o}$$

Como podemos apreciar, este es el caso de las ondas senoidales puras. El factor de potencia de una carga no lineal es el producto del factor de fase 50 Hz ( $\cos \Phi$ ) y del factor  $K$  de contracción dado por la distorsión de la onda de corriente. Si la tensión se mantiene senoidal, la potencia activa absorbida por una carga no lineal depende sólo de la tensión y de la corriente fundamental de 50 Hz pura. Es decir que las armónicas aumentan la corriente eficaz pero no la potencia activa absorbida.

Esto explica el bajo valor del factor de potencia que presentan las cargas no lineales informáticas y el apreciable error que se puede cometer en la medición de la potencia activa si sólo medimos el valor eficaz de la corriente y la fase por medio de un fasímetro.

Las mediciones efectuadas sobre PC 486 DX2, con un  $\Phi = 15^\circ$  y correspondiente  $\cos \Phi = 0.966$ , comprueban la disminución de este factor de potencia. Esta disminución se expresa a través del coeficiente de contracción  $K$ . Considerando la onda de tensión senoidal el coeficiente  $K$  se calcula:

Para una sola PC conectada se obtuvo:

$$K = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_n (I_n)^2}} \text{ o}$$

$$K = 0.637$$

luego:

$$1 - K \cdot \cos(\Phi)$$

$$\lambda = 0.615$$

Para dos PC's:

$$K = 0.649$$

$$\lambda = 0.626$$

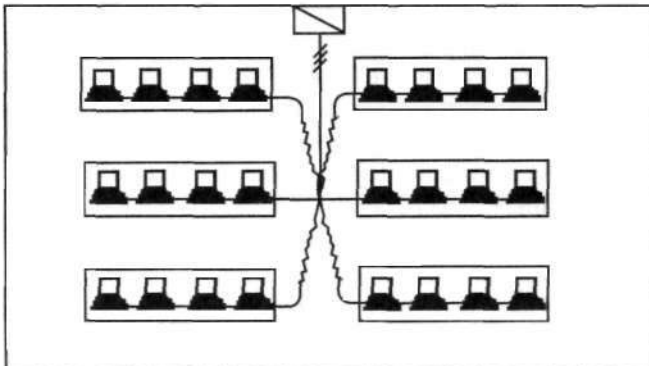
Resultando una disminución de un 36% respecto del factor de potencia que hubiéramos medido con un fasímetro.

## 5 - Instalación.

### Tendido del distribuidor

Al realizar el tendido del distribuidor en un centro de computo se tratará que su longitud como la de los conductores que alimentan a las cargas sea la menor posible para: disminuir la caída de tensión y la impedancia que presenta los conductores para evitar que las corrientes armónicas a través de esa impedancia genere tensiones armónicas que pueden producir por sí misma perturbaciones sobre los equipamientos eléctricos.

Por ejemplo: Para el siguiente centro de computo el distribuidor se lo llevó hasta el centro del mismo y de allí se alimentarán las PC's.



## Elección de los conductores

Como estamos tratando con cargas no lineales el conductor neutro deberá tener una sección superior a los conductores de las fases. Por esta razón se utilizará conductores unipolares para cada una de las fases y el neutro o conductor tripolar para las fases y unipolar para el neutro.

El cálculo del conductor se realiza de la siguiente manera:

$$I = \frac{P_t}{U \cdot \lambda}$$

siendo:

$P_t$  la potencia consumida por las cargas de la fase y que se calculará de acuerdo a lo establecido en el capítulo 4.

$U$  es la tensión de fase.

$I$  es la corriente de fase.

Conociendo la corriente de fase ya podemos elegir el conductor de fase. Debido a la presencia de las cargas no lineales la intensidad del conductor neutro será:

$$I_n = 1,7 \cdot I$$

Y con ella dimensionar el conductor neutro.

## Protecciones

Se dispondrá de una protección termomagnética tripolar con característica 'C' para que los valores máximos de la onda poliarmónica no hagan actuar la protección magnética.

Con respecto al interruptor por corriente de defecto (ICD) no se recomienda su aplicación en centros de cómputos debido a que las componentes armónicas ocasionadas por las cargas no lineales harán circular por el conductor neutro una intensidad bastante mayor que en las fases.

Si el ICD esta dimensionado de acuerdo a la corriente de las fases se producirá un sobrecalentamiento de los contactos del conductor neutro.

## 6 - Conclusión

Luego de haber analizado la instalación, observamos que siempre que alimentamos cargas no lineales, es importante el sobredimensionamiento de los conductores y aparatos de protección. Esto trae como consecuencia mayor costo de materiales.

Las causantes de este problema son las corrientes armónicas que son generadas por cargas no lineales, por ejemplo los circuitos rectificadores de los aparatos electrónicos, entre ellos las computadoras.

Es muy importante el hecho de tener en cuenta que el método fasorial clásico para analizar circuitos lineales se ve impotente ante uno no lineal. Pero para poder seguir aplicando introducimos coeficientes de sobredimensionamiento que permiten realizar los cálculos en forma bastante aproximada.

Cuando se proyecta un centro de cómputos se deben tener en cuenta las siguientes características:

- Corriente del neutro: Como observamos del análisis anterior, si el sistema tiene cargas en equilibrio, las corrientes armónicas 3<sup>a</sup>, 6<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, 12<sup>a</sup>, ... de las fases, se suman escalarmente en vez de anularse en el conductor neutro. Pero por las características del sistema, no hay armónicas pares, luego nos quedan las: 3<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, 15<sup>a</sup>, ... De todas ellas la más importante es la tercera y representa alrededor de un 50% de la corriente total nominal. Luego por el neutro, en un sistema trifásico, circularán las corrientes terceras armónicas de cada fase adicionadas escalarmente. Esto es aproximadamente 1,5 veces la corriente nominal de fase, pero como también tenemos que considerar el aporte de la novena, la decimoquinta, etc., se puede decir con bastante aproximación que la corriente que circulará por el conductor neutro será entre 1,5 á 1,7 veces la corriente nominal de fase.

- Caída de tensión: Siempre que calculamos un conductor debe verificar dos puntos, el primero es la densidad de corriente que ya se habló del tema. El segundo es que verifique la caída de tensión. Para un sistema no lineal este factor es importante ya que en general se pide que la onda de tensión no se deforme (estrictamente se habla de que la distorsión armónica porcentual, o THD, sea menor que un 5%). Recordemos que por el conductor circularán corrientes de distinta frecuencia y como la caída reactiva del conductor es proporcional a la frecuencia, si ésta es muy grande producirá la deformación de la onda de tensión. En un centro de cómputos este  $\Delta U$  debe ser menor que un 3% para obtener resultados óptimos.

Factor de potencia: Este es otro detalle a tener muy en cuenta, ya que realizando la medición con un fasímetro, generalmente en un centro de cómputos este desfase no es mayor de  $15^\circ$  lo que nos daría en primera instancia un  $\cos \varphi = 0,97$ . Valor totalmente incierto ya que sólo se ha tenido en cuenta el aporte de la primer corriente armónica (porque se realiza una aproximación lineal que es el método de la función descriptiva). Debido a que las no linealidades producidas por las computadoras son grandes, debemos tener en cuenta la influencia de las demás corrientes armónicas. Como consecuencia del análisis hecho en el punto 4, a este  $\cos \varphi$  medido, debemos afectarlo por un factor de contracción  $k$ , que lo definimos como la relación entre la magnitud de la primer armónica y la raíz cuadrada de la sumatoria de los cuadrados de todas ellas. Este factor  $k$  para un centro de cómputos vale alrededor de 0,65. Con esto definimos el factor de potencia de ondas poliarmónicas como  $\lambda = k \cdot \cos \varphi$  (para el caso de tensión senoidal pura). Luego  $\lambda = 0,65 \cdot 0,97 = 0,63$ . Se observa la gran diferencia con el valor calculado anteriormente.

Hemos analizado brevemente la importancia que adquiere el incremento de las cargas no lineales y las consecuencias sobre equipamientos y redes eléctricas.

Como hemos dicho estas cargas se presentan cada vez más en todas las áreas y ello se debe principalmente al equipamiento electrónico y en particular a los de mayor potencia.

Los centros informáticos nos presentan un doble problema. Por un lado, como toda electrónica sensible requieren una energía "limpia" y por otro lado como cargas electrónicas son generadores de alto contenido de armónicas. Es importante para la adecuación de la energía de estos centros prestar especial cuidado a los dimensionamientos de toda la instalación eléctrica, integrar los sistemas de tierra para la potencia y las altas frecuencias y asegurar la protección a transitorios imprevistos.

Lo cierto es que debemos tomar un mayor conocimiento de estas cargas no lineales y estudiar en cada caso la mejor manera de reducir o eliminar sus perturbaciones. Dada su vinculación con nuestras actividades y nuestra calidad de vida, se están analizando nuevas propuestas para reducir los efectos perturbadores. Nuestro acceso a este mundo moderno donde la electrónica domina gran parte de nuestros medios nos debe alentar a tomar conciencia desde ahora. De este modo lograremos administrar nuestra energía y su transformación de la manera más limpia y sin contaminar nuestro medio eléctrico.