

ARMÓNICOS Y PROBLEMAS DE “POWER QUALITY” EN EL CONDUCTOR DE NEUTRO DE SISTEMAS TRIFÁSICOS

RESUMEN

En este documento, se presentan algunos conceptos fundamentales para estimar la corriente en el conductor de neutro generada por cargas no lineales. Se muestran además algunos problemas y características de las corrientes armónicas en el neutro. Finalmente se analizan algunas medidas realizadas en dos centros de cómputo y en una instalación comercial.

DIEGO R. CADAVID C.
Ingeniero Electricista.
Profesor Auxiliar
Universidad de Antioquia
dcadavid@udea.edu.co

PALABRAS CLAVES: Carga no lineal, conductor de neutro, armónicos.

LUIS FERNANDO GALLEGO B.
Ingeniero Electricista.
Profesor Titular
Universidad de Antioquia
lgallego@udea.edu.co

ABSTRACT

This paper presents some fundamental concepts to estimate the current in the neutral conductor generated by non-linear loads. Harmonic current characteristics and associated problems in the neutral are also shown. Finally some measurements on two computer-centers and on a commercial building are reported and analyzed.

KEYWORDS: Non-linear loads, neutral conductor, harmonics.

1. INTRODUCCIÓN

En sistemas trifásicos de cuatro hilos, se espera que la corriente en el conductor de neutro sea inferior al 20% de la corriente de fase, si las cargas son razonablemente balanceadas. Sin embargo, la corriente en el neutro se puede incrementar debido al desbalance de cargas y la proliferación de equipos tales como: computadoras personales, impresoras, fax y en general, equipos electrónicos con fuentes monofásicas conmutadas.

El problema de la corriente en el neutro ha sido bastante estudiado en la literatura técnica. Los resultados de un estudio en U.S [1], mostraron que en el 22.6% de los sitios analizados (centros de cómputo), la corriente en el conductor de neutro excedía la corriente nominal del conductor de fase. Han sido reportados problemas de incendios por sobrecarga del conductor de neutro [2].

En este documento se analizan los problemas más comunes producidos por la corriente del neutro, tales como: la sobrecarga en dicho conductor, incremento del ruido en modo común (tensión neutro-tierra), distorsión de tensión y corriente, factor de diversidad y atenuación. Se presentan además medidas en dos centros de cómputo y en una instalación comercial.

2. CARACTERÍSTICAS DE LA CORRIENTE EN EL NEUTRO

Las características de la corriente en el neutro dependen básicamente del tipo de carga y la calidad de la potencia del circuito de alimentación. Las formas de onda de corriente que se pueden identificar en el neutro son:

2.1 Tipo I -Forma de onda debida a circuito balanceado

Las componentes armónicas de esta forma de onda corresponden a los armónicos de secuencia cero (3, 9, 15,...) únicamente. En el sistema trifásico balanceado, la corriente en el neutro está dada por la sumatoria de las corrientes de las tres fases. Si $I_A(t)$, $I_B(t)$ e $I_C(t)$ son las corrientes de la fase A , B y C respectivamente, la corriente en el neutro $I_n(t)$, está dada por la ecuación (5).

$$I_A(t) = \sum I_n \text{sen}(n\omega t + \Phi_n) \quad (1)$$

$$I_B(t) = \sum I_n \text{sen}(n(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \Phi_n) \quad (2)$$

$$I_C(t) = \sum I_n \text{sen}(n(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + \Phi_n) \quad (3)$$

$$I_n(t) = I_A(t) + I_B(t) + I_C(t) \quad (4)$$

$$I_n(t) = \sum 3 \cdot I_{6k+3} \text{sen}((6k+3)\omega t + \Phi_{6k+3}) \quad (5)$$

Donde: $n = 1, 3, 5, \dots$ es el orden del armónico y $k=0, 1, 2, \dots$

La ecuación 5, muestra que la corriente en el neutro bajo condiciones balanceadas, es producida por las componentes de secuencia cero (3, 9, 15,...) de las corrientes de fase. Si la carga es lineal, la corriente en el neutro es cero.

2.2 Tipo II – Forma de onda debida a un circuito desbalanceado

La corriente en el neutro de este tipo es causada por el desbalance de carga y a las componentes de secuencia cero. Si la carga es lineal, la corriente en el neutro sólo tiene el componente fundamental. Si la carga es no

lineal, la corriente en el neutro es debida al desbalance de carga y los armónicos de secuencia cero (3, 9, 15...).

3. CÁLCULO DE LA CORRIENTE EN EL NEUTRO

Conociendo las corrientes armónicas de las tres fases con sus respectivos ángulos, el aporte de cada armónico a la corriente en el neutro puede ser calculado con las ecuaciones generales (independientes del grado de balanceo y del tipo de carga) que se relacionan a continuación [4]:

$$I_{n,i} = \sqrt{I_{x,i}^2 + I_{y,i}^2} \quad (6)$$

$$I_{x,i} = I_{A,i} \cdot \cos(\Phi_{A,i}) + I_{B,i} \cdot \cos(\Phi_{B,i}) + I_{C,i} \cdot \cos(\Phi_{C,i}) \quad (7)$$

$$I_{y,i} = I_{A,i} \cdot \sin(\Phi_{A,i}) + I_{B,i} \cdot \sin(\Phi_{B,i}) + I_{C,i} \cdot \sin(\Phi_{C,i}) \quad (8)$$

$$I_{n,rms} = \sqrt{\sum I_{n,i}^2} \quad (9)$$

Donde: $I_{n,i}$ es el valor rms de la corriente armónica de orden i en el neutro; $I_{A,i}$, $I_{B,i}$, $I_{C,i}$ es el valor rms de la corriente armónica de orden i en las fases A , B y C respectivamente; $\Phi_{A,i}$, $\Phi_{B,i}$, $\Phi_{C,i}$ es el ángulo de fase de la corriente armónica de orden i en las fases A , B y C respectivamente; $I_{n,rms}$ es la corriente rms del neutro.

Haciendo uso de una expresión dada en la referencia [5], y ejecutando algunas modificaciones, podemos expresar la corriente en el neutro de un circuito trifásico, en función de la corriente de fase más cargada (por ejemplo la fase A) así:

$$\frac{I_{n,rms}}{I_{fase}} = \sqrt{R + [(P+k+1)^2 - R] \cdot \frac{THD_i^2}{100^2 + THD_i^2}} \quad (10)$$

Donde: $0 \leq P \leq 1$, es la fracción de carga de la fase B respecto a la fase A ; $0 \leq k \leq 1$, es la fracción de carga de la fase C respecto a la fase A ; THD_i es la distorsión armónica total de corriente; y R está dado por la ecuación 11.

$$R = \left(\frac{2-P-k}{2} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{P-k}{2} \right)^2 \quad (11)$$

La ecuación 10, supone el mismo tipo de carga en cada fase, un THD_i máximo de 70.7% y un espectro en donde el tercer armónico siempre exista y sea predominante. En las figuras 1a hasta 1f, se ilustra la aplicación de la ecuación 10.

La figura 1a, muestra que si la carga es lineal ($THD_i=0\%$), el máximo valor que puede alcanzar la corriente de neutro es 1 pu. Cuando las tres fases están balanceadas, la corriente en el neutro es cero. Para sistemas bifásicos, contrario a lo que se cree, la corriente en el neutro es mínima cuando una fase está al 50% respecto a la otra.

Las figuras 1b hasta 1d, muestran que a medida que se incrementa el THD_i , la corriente en el neutro tiende a incrementarse. Si el THD_i es inferior al 10%, prácticamente la corriente en el neutro es inferior a 1 pu para cualquier condición de carga. Dependiendo del porcentaje de desbalance, la corriente en el neutro puede ser inferior a 1 pu si el THD_i es inferior a 70.7%. Cuando el THD_i es mayor o igual a 70.7%, la corriente en el neutro es mínimo 1 pu y se incrementa a medida que las fases incrementan la carga.

La figura 1e, muestra que cuando dos fases están al 100% de carga y la tercera fase se incrementa, la corriente en el neutro es inferior a 1 pu, para THD_i inferiores al 35%. Para THD_i superiores al 35%, la corriente en el neutro es superior a 1 pu.

La figura 1f, muestra que en sistemas balanceados, el THD_i mínimo para obtener un valor de 1pu en la corriente de neutro es 35% (aproximadamente) y cuando el THD_i tiene un valor 70.7%, la corriente en el neutro puede alcanzar un valor de 1.73 pu.

4. EFECTOS DE LA ASIMETRÍA Y EL DESBALANCE EN LA CORRIENTE DE NEUTRO

Con pruebas de laboratorio, se han logrado establecer los siguientes resultados [4]:

- Una asimetría hasta de 10°, o un desbalance hasta de 10% de tensión, tienen un pequeño efecto sobre el valor rms de la corriente en el neutro.
- Cuando la fuente de potencia contiene un solo armónico de tensión, se encontró que los de orden superior tienen un mayor efecto sobre la corriente en el neutro. El efecto manifestado como incremento o decremento de la corriente de neutro depende del ángulo del armónico en cuestión.

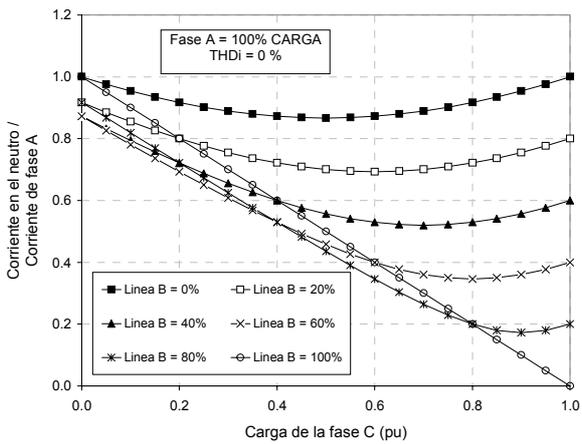


Figura 1a. Corriente en el neutro para cargas lineales en sistemas trifásicos.

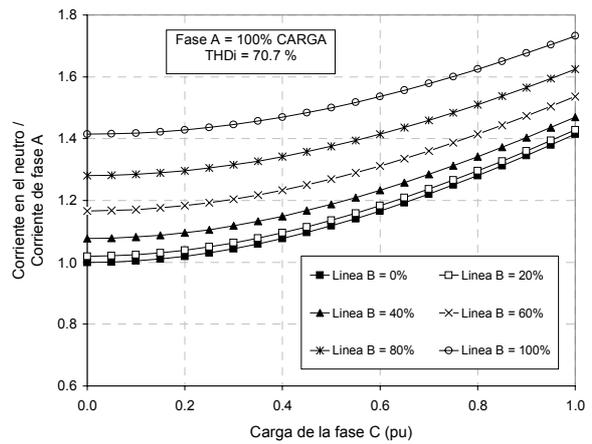


Figura 1d. Corriente en el neutro para cargas no lineales con THDi del 70.7% en sistemas trifásicos.

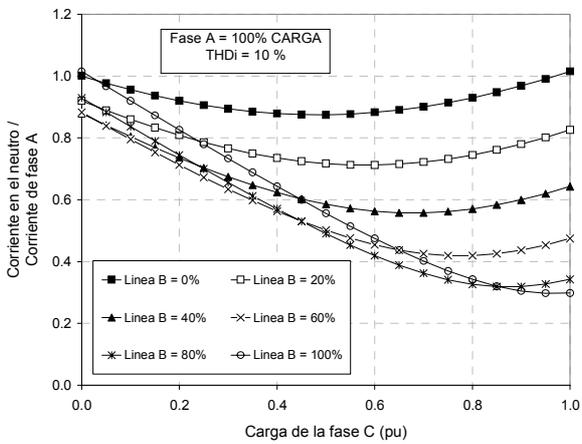


Figura 1b. Corriente en el neutro para cargas no lineales con THDi del 10% en sistemas trifásicos.

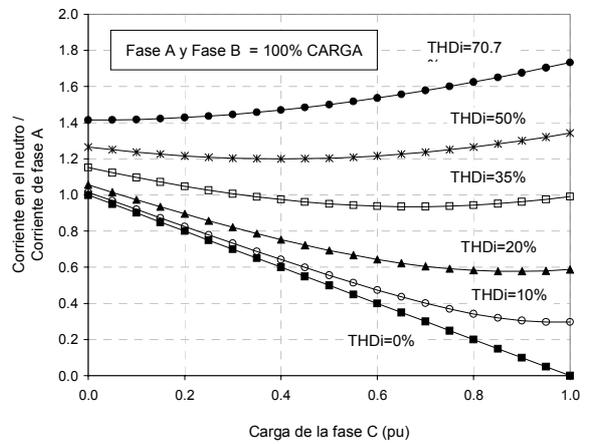


Figura 1e. Corriente en el neutro para cargas no lineales, teniendo las fases A y B al 100% en sistemas trifásicos.

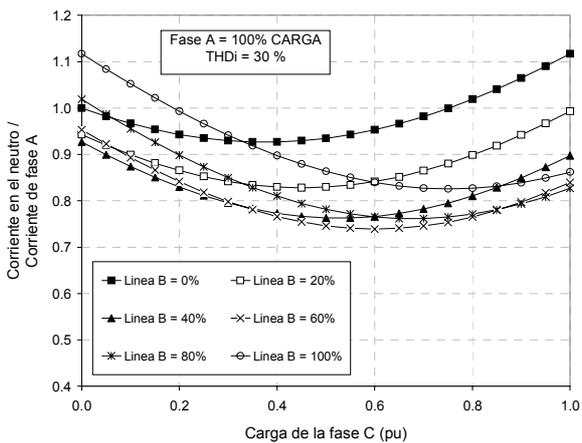


Figura 1c. Corriente en el neutro para cargas no lineales con THDi del 30% en sistemas trifásicos.

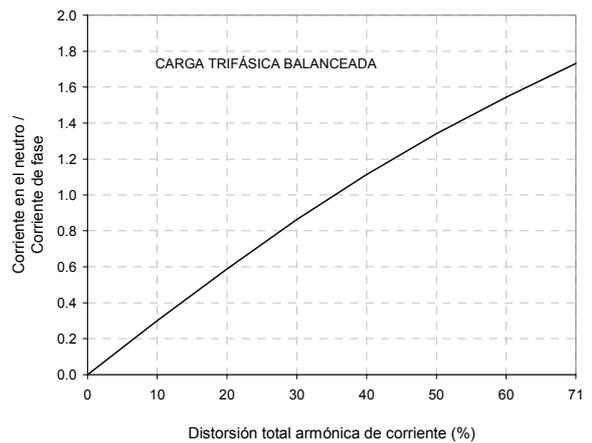


Figura 1f. Corriente en el neutro para cargas no lineales y diferentes THDi en sistemas trifásicos balanceados.

5. EFECTOS DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS EN EL NEUTRO

Las corrientes armónicas en el neutro generan los siguientes problemas: Incremento de la temperatura en el

conductor, aumentando las pérdidas óhmicas; disminución de la capacidad amperimétrica del conductor; incremento de la tensión neutro-tierra y distorsión de la onda de tensión de las fases; entre otros.

5.1. Capacidad amperimétrica del conductor de neutro

La presencia de corrientes armónicas en los conductores, afecta la ampacidad (capacidad amperimétrica) del conductor, debido a las pérdidas adicionales I^2R . La determinación de pérdidas óhmicas es compleja, por el hecho de que la resistencia de los cables depende de la frecuencia. Específicamente, la resistencia aumenta con la frecuencia debido al efecto superficial (skin) y al efecto de proximidad entre los conductores.

En la referencia [6] se explica el procedimiento para determinar la pérdida de capacidad del conductor de neutro en sistemas trifásicos con cuatro hilos.

5.2. Tensión neutro tierra

El efecto más notable de la corriente en el neutro es la generación de la tensión neutro-tierra, la cual es una forma de ruido en modo común, que depende de la corriente que circula por el conductor de neutro y de la impedancia de dicho conductor. El efecto de la tensión neutro-tierra es aún debatible, sin embargo, la Std IEEE 1100 [7] recomienda 3 Vrms para equipo normal y 0.3 Vrms para equipo electrónico sensible. Una expresión para estimar la tensión neutro tierra esta dada por [8]:

$$V_{nt} = m \cdot S \cdot L \tag{12}$$

Donde: m es una constante de proporcionalidad que depende del tipo de cable, dada en [Vrms/(VA*m)]; V_{nt} es la mínima tensión neutro tierra, dada en [Vrms]; S es la potencia trifásica total, dada en [VA] y L es la longitud del cable de neutro, dada en [m].

Por ejemplo, en la tabla 1, se muestra la longitud del cable que generaría una tensión neutro tierra de 3 Vrms, con una potencia trifásica total de 10.8 kVA.

Tipo de Cable	Longitud [m]
8 AWG	40.9
6 AWG	58.7
4 AWG	78.9
2 AWG	97.5

Tabla 1. Longitud del cable de neutro que genera una tensión de 3 Vrms neutro-tierra (carga trifásica 10.8 kVA)

6. MEDIDAS EN DOS CENTROS DE CÓMPUTO Y EN UNA INSTALACIÓN COMERCIAL

Las medidas de corrientes y tensiones armónicas son fundamentales para un adecuado diagnóstico del problema (calibre adecuado del neutro) y una correcta solución. A continuación presentamos las medidas realizadas en dos centros de cómputo y una instalación de tipo comercial.

6.1. Medidas en el primer centro de cómputo

En este centro de cómputo, la medición se realizó en un tablero de distribución (de segundo nivel) dedicado exclusivamente a la alimentación de siete PC por fase. La figura 2a, muestra la forma de onda de corriente de la fase A y la figura 2b, muestra el espectro de armónicos correspondiente.

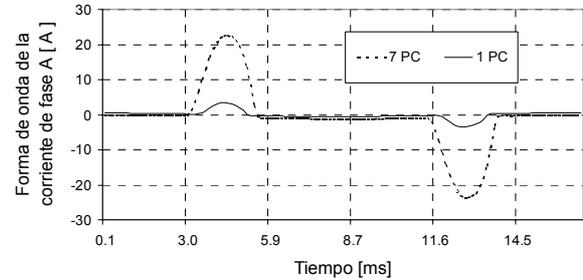


Figura 2a. Formas de onda de corriente de la fase A, para uno y siete PC por fase.

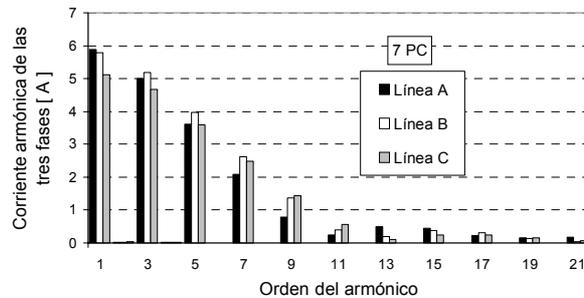


Figura 2b. Espectro de la corriente (de las fases A, B y C) para siete PC por fase.

En la figura 3a, se muestra la forma de onda de corriente en el neutro y en la figura 3b, su correspondiente espectro de armónicos para siete PC por fase. Se observa claramente que la corriente en el neutro es debida a los armónicos triples. En la figura 2b, se observa que el tercer armónico tiene un valor promedio de 5A y el tercer armónico en el neutro fue 14.8A. Con lo cual queda claro que la corriente en el neutro es aproximadamente tres veces la magnitud del tercer armónico de la corriente de fase, lo cual verifica la ecuación (5).

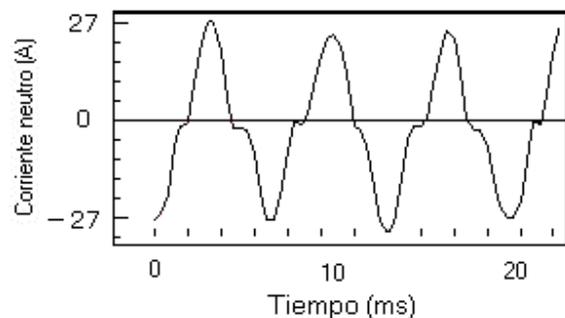


Figura 3a. Forma de onda de la corriente de neutro para siete PC por fase.

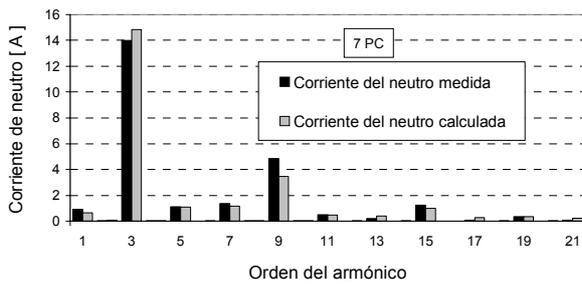


Figura 3b. Espectro de corriente del neutro para siete PC, medido y calculado con la ecuación 6.

La tabla 2, muestra el cálculo del aporte del desbalance de carga (ecuación 13) y los armónicos (ecuación 14) a la corriente de neutro [1]. Para este centro de cómputo, la relación de la corriente en el neutro y la de fase, independiente del número de computadoras por fase fue 1.71; lo que conduce a seleccionar un conductor de neutro con mayor capacidad que el conductor de fase.

$$I_D = \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 - (I_A \cdot I_B + I_A \cdot I_C + I_B \cdot I_C)} \quad (13)$$

$$I_H = \sqrt{I_{n_{rms}}^2 - I_D^2} \quad (14)$$

Donde: I_A, I_B, I_C son las corrientes rms de la fase A, B y C respectivamente; I_D es la corriente de desbalance en el neutro; I_H es la corriente armónica en el neutro y $I_{n_{rms}}$ es la corriente rms en el neutro

PC por Fase	CORRIENTES PROMEDIO MEDIDAS (Arms)		Aportes del desbalance (D) y los armónicos (H) a la corriente de neutro (Arms)		$\frac{I_{neutro}}{I_{fase}}$
	Fases A, B y C	Neutro	D	H	
1	1.4	2.4	0.32	2.33	1.68
2	2.8	4.7	0.60	4.70	1.71
3	4.5	7.7	0.33	7.67	1.71
4	5.2	9.0	1.41	8.89	1.72
5	6.5	11.1	1.02	11.06	1.72
6	7.6	13.02	0.72	13.00	1.72
7	8.8	15.01	0.35	15.006	1.70

Tabla 2. Aportes de las componentes armónicas y del desbalance a la corriente de neutro

6.2. Medidas en el segundo centro de cómputo

En este centro de cómputo, la medición se realizó en un tablero de distribución (de segundo nivel) dedicado exclusivamente a la alimentación de 16 PC por fase. En la figura 4, se observa que a medida que se aumenta el número de PC, disminuye la distorsión total armónica de corriente por un lado y por el otro, aumenta la distorsión total armónica de tensión. El incremento del THD_v es

debido a que el barraje no es infinito y la disminución del THD_i es debido al cambio en la forma de onda de la tensión. Este fenómeno es conocido como: efecto diversidad y atenuación. La tabla 3, muestra la atenuación de la corriente armónica debido a la distorsión de tensión, cuando el número de PC se incrementa de uno a dieciséis.

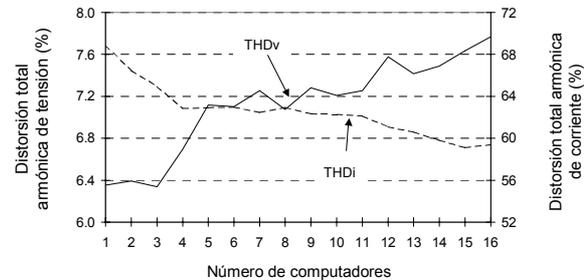


Figura 4. Distorsión armónica total de tensión y corriente en función del número de PC.

Armónico	Corriente armónica PC=1 (Arms)	Corriente armónica PC=16 (Arms)	Factor de Atenuación
3	1.15	11.885	0.648
5	0.62	4.339	0.436
7	0.24	1.008	0.261
11	0.25	0.567	0.144
13	0.18	0.762	0.272
15	0.15	0.606	0.247
17	0.12	0.173	0.092
19	0.06	0.459	0.450

Tabla 3. Corrientes armónicas para 1 PC y 16 PC, con su correspondiente factor de atenuación

6.3. Medidas en la instalación comercial

La medición se realizó en un tablero de distribución (de primer nivel), que alimenta un grupo de cargas mixtas tales como: computadoras, impresoras, fax, fotocopiadoras, entre otros. El espectro de corriente armónica de las tres fases y del neutro se ilustran en las figura 5 y 6 respectivamente.

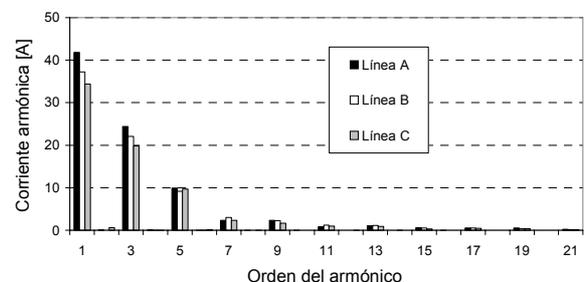


Figura 5. Espectro de corriente armónica en las fases A, B y C.

La aparición de la componente fundamental en la corriente de neutro, es debida al desbalance de las

corrientes de fase. La forma de onda de la tensión neutro-tierra y su espectro de armónicos se ilustran en las figuras 7a. y 7b respectivamente. Se observa que la tensión neutro-tierra es prácticamente debida al tercer armónico de corriente que circula por el conductor de neutro. La tensión neutro-tierra calculada con la ecuación 12, es de 3.6 V para un cable No. 6 con 50 metros de longitud, valor muy aproximado al valor medido.

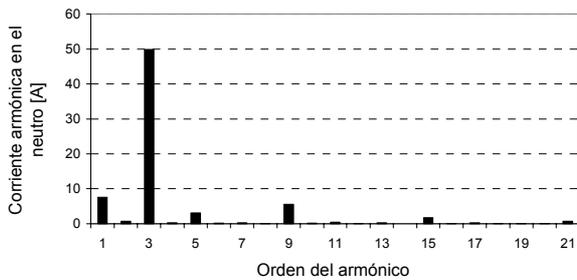


Figura 6. Espectro de corriente armónica del neutro para cargas mixtas.

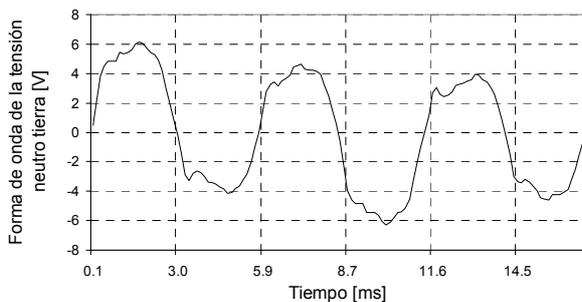


Figura 7a. Forma de onda de la tensión neutro-tierra para cargas mixtas.

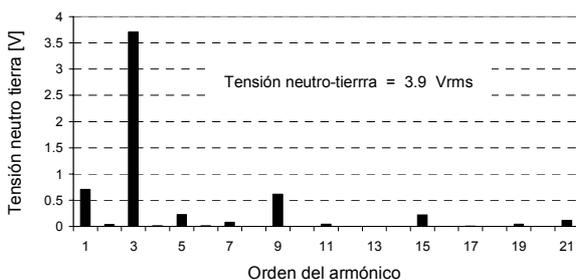


Figura 7b. Espectro de la tensión neutro-tierra para cargas mixtas.

7. CONCLUSIONES

Las cargas no lineales y sus correspondientes armónicos, ponen en cuestionamiento el paradigma o la norma clásica de considerar el calibre del neutro con una capacidad igual o menor a la de las fases.

La instalación de cargas monofásicas del tipo conmutadas, no exigen necesariamente, duplicar la capacidad del conductor de neutro, sería más conveniente

conocer el $THDi$ de dichas cargas antes de tomar una decisión.

Queda claro, que si la carga monofásica del tipo conmutada, tiene un $THDi$ menor al 10%, prácticamente la corriente en el neutro es a lo sumo la corriente de fase (para un mismo tipo de carga).

Si la carga monofásica del tipo conmutada, tiene un $THDi$ mayor al 70.7%, se recomienda duplicar la capacidad amperimétrica del conductor de neutro, aunque para algunos casos particulares quede dimensionado por exceso.

El tercer armónico de corriente en el conductor neutro, incrementa la tensión neutro-tierra y disminuye la capacidad amperimétrica de dicho conductor.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] GRUZS, Tomas M. A survey of neutral currents in three-phase computer power systems, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 4, pp. 719-725, July/August 1990.
- [2] LIEW, A. C., Excessive neutral currents in three-phase fluorescent lighting systems, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 4, pp. 776-782, July/August 1989.
- [3] MCGRANAGHAN, M. Controlling harmonics from nonlinear loads in commercial facilities, Harmonics and Quality of Power Proceedings, 1998. Proceedings. 8th International Conference On, Vo. 2, 1998, pp. 872-877.
- [4] DESMET, J., *et al*, Analysis of the neutral conductor Current in a three phase supplied network with non-linear single phase loads, Electric Machines and Drives Conference, 2000. IEMDC 2001. IEEE International, 2001, pp. 448-453.
- [5] ARTHUR, Robert. *et. al*, Neutral Currents in three-Phase Wye Systems, Square D Company, WI, 0104ED9501R8/96, August 1996.
- [6] HIRANANDANI, Ajit, Calculation of cables ampacities including the effects of harmonics, IEEE Industry Application Magazine, March/April 1998.
- [7] IEEE recommended practice for powering and grounding sensitive electronic equipment (Emerald book), IEEE standard 1100, 1999.
- [8] WIECHMANN, Eduardo P., *et al*, High reliability and improved power quality in low voltage distribution systems for nonlinear critical loads: an evaluation, Industrial Electronics Society, 1998. IECON'98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, Volume: 2, 1998, pp. 848-853.