



EFFECTO DE LAS CARGAS DISTORSIVAS EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

Mario S. F. Brugnoni

Grupo Energía y Ambiente (GEA), Departamento de Electrotecnia
Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires
Paseo Colón 850, (C1063ACV) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, ARGENTINA
Tel/Fax (54 11) 4343-0891/3503 - email: mbrugno@fi.uba.ar

RESUMEN:

La contaminación armónica de las redes, es una preocupación creciente de las distribuidoras y las cooperativas que comercializan la energía eléctrica en nuestro país.

En este trabajo se analiza el efecto de los armónicos de la corriente sobre los distintos componentes de una red de distribución. Se estudia, en particular, el incremento en la corriente de neutro, la posible disminución de la capacidad de transporte de los alimentadores y la disminución de la potencia nominal de los transformadores.

Se presentan ejemplos prácticos concretos en redes altamente contaminadas comparándolos con aquellos que se sitúan en el límite de las exigencias del Ente Nacional Regulador de Electricidad en la Argentina (ENRE).

PALABRAS CLAVE:

Armónicas, Sistemas de Distribución, Declasado, Demérito, Derating, Pérdidas.

1. INTRODUCCIÓN

En la bibliografía especializada, es muy común encontrar referencias a los efectos de las armónicas de tensión y corriente sobre los sistemas de distribución. Éstas, en muchos casos, aparecen como un simple listado sin ponderación alguna, induciendo a posibles errores de evaluación. En la mayoría de los casos se hace mención a:

1. Aumento de la corriente de neutro.
2. Aumento de la diferencia de Potencial entre neutro y tierra.
3. Problemas con los capacitores shunt.
4. Recalentamiento de cables y transformadores.
5. Impacto sobre los equipos de protección y maniobra.
6. Incertidumbre en la medición de energía.
7. Estrés en las aislaciones provocados por picos repetitivos de tensión.
8. Desmejoramiento en la calidad de energía.

En esta ponencia se centra la atención en los ítems 1 y 4 desarrollando ejemplos numéricos que permiten evaluar la verdadera magnitud de esos fenómenos. Para ello se presentan escenarios en los que actúan cargas con distinto contenido armónico.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS

Se comienza con el estudio de un ejemplo en media distorsión, que se sitúa dentro de los límites que fija el ENRE para la tarifa 3. (*Res ENRE 99/97-“Base Metodológica para el Control de la Emisión de Perturbaciones Producto Técnico - Etapa 2”*). (Ver Figuras. 1 y 4). Se debe hacer notar que el THD excede el valor del 20% fijado por el Ente Regulador argentino para baja tensión.

Se estudia, luego, un caso con fuerte distorsión, donde la carga equilibrada en las tres fases responde al contenido armónico de lámparas fluorescentes compactas, Figuras 2 y 5. Para terminar se presenta un tercer caso, donde la carga corresponde a un variador de velocidad de seis pulsos sin filtro, también con fuerte contenido armónico, pero sin la presencia de armónicas triples, Figuras 3 y 6.

Se debe hacer notar que los dos últimos escenarios, se los ha tomado como eventos extremos que difícilmente se encuentren en una red de distribución pública, aunque sí resulta posible observarlos en tableros de donde parten circuitos que alimentan sistemas de iluminación, centros de cómputos o equipos de fuerza motriz.

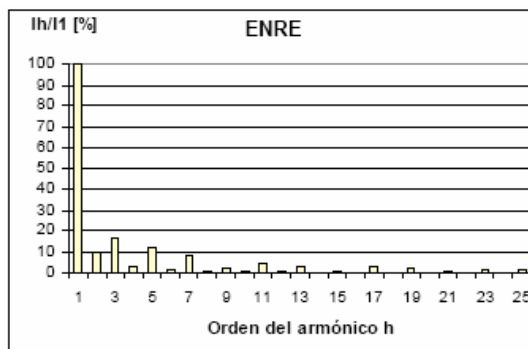


Fig. 1. Contenido armónico distribución "ENRE"

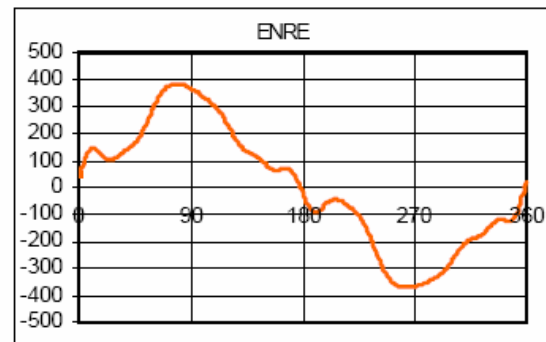


Fig. 4. Forma de onda distribución "ENRE"

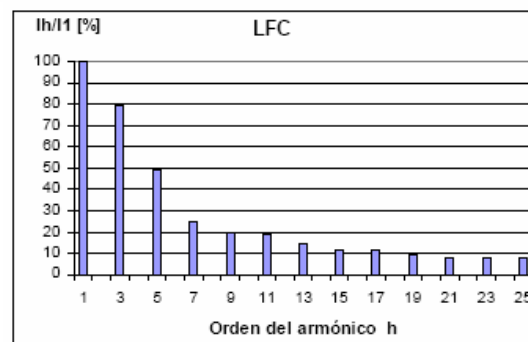


Fig. 2. Contenido armónico distribución "LFC"

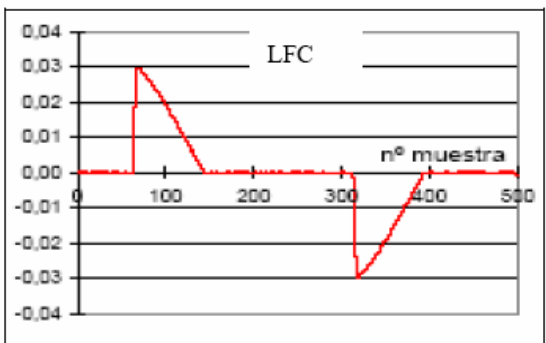


Fig. 5. Forma de onda distribución "LFC"

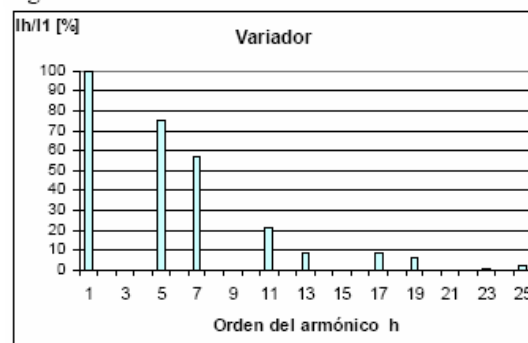


Fig. 3. Contenido armónico distribución "variador"

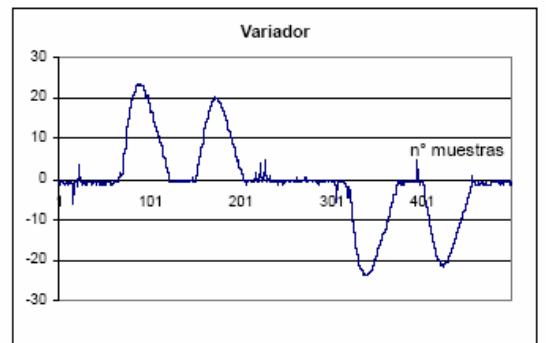


Fig. 6. Forma de onda distribución "variador"

3. AUMENTO DE LA CORRIENTE DE NEUTRO

Para la determinación de la corriente de neutro se ha supuesto un sistema de cargas equilibradas. Se presenta, en primer lugar, un escenario donde los armónicos responden a la “distribución ENRE”. La Tabla I muestra los valores de la corriente en % hasta la armónica 25. También se han calculado los valores de la corriente en amperes para un valor eficaz de la corriente de 350 A.

Tabla I. Determinación de la relación entre los valores eficaces de las corrientes de fase y neutro

DISTRIBUCIÓN ENRE			THD [%]	97,68	I Triples [A]	In[A]	
h	Ih [%]	Ih [A]	Ief(fase) [A]	350			170,53
1	100,00	339,15					
2	10,00	33,92					
3	16,60	56,30			56,30		
4	2,50	8,48					
5	12,00	40,70					
6	1,00	3,39					
7	8,50	28,83					
8	0,80	2,71					
9	2,20	7,46			7,46		
10	0,80	2,71					
11	4,30	14,58					
12	0,40	1,36					
13	3,00	10,17					
14	0,30	1,02					
15	0,60	2,03			2,03		
16	0,30	1,02					
17	2,70	9,16					
18	0,30	1,02					
19	1,90	6,44					
20	0,30	1,02					
21	0,40	1,36			1,36		
22	0,30	1,02					
23	1,60	5,43					
24	0,30	1,02					
25	1,60	5,43					
					Ineutro/Ifase	0,49	

Para este caso donde hemos supuesto carga equilibrada, la corriente de neutro estará formada sólo por las armónicas triples de las corrientes de fase como se destaca en la Tabla I. Su valor eficaz se calcula como:

$$I_n = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + I_{21}^2} = 3\sqrt{56,30^2 + 7,46^2 + 2,03^2 + 1,36^2} = 170,53A \quad [1]$$

La relación con la corriente de fase resulta casi un 50%, valor que lo sitúa en el límite de lo admitido por las instalaciones calculadas con sección de neutro mitad.

Procediendo de igual forma que en el caso anterior, manteniendo el valor eficaz de la corriente $I = 350A$, pero con un contenido armónico que responde al segundo escenario: LFC Figura 2, se tiene que el valor eficaz de la corriente de neutro resulta $I = 604,37 A$, dando lugar a una relación aproximadamente igual a 1,73 con la corriente de fase. Este resultado que muestra una corriente de neutro superior en un 73% a la corriente de fase, se debe a la fuerte presencia de terceras armónicas. Cuando se prevé la existencia de estos casos se recomienda colocar una sección del conductor neutro que duplique a la de los conductores de fase.

En la práctica pueden darse casos, como el presentado en la Tabla N° II, en alimentadores de tableros seccionales, donde las cargas repartidas en las tres fases correspondan, por ejemplo, a computadoras personales. También es común encontrar situaciones como la descrita en alimentadores de tableros de sistemas de alumbrado. En estas situaciones es previsible un recalentamiento del neutro si éste no fue dimensionado convenientemente. Para alimentadores de mediana longitud pueden aparecer, además, molestas diferencias de potencial entre el conductor neutro y tierra.

Aunque es notorio el incremento de las cargas monofásicas alineales en los sectores comercial, residencial y público, es poco probable que situaciones semejantes se den en las redes de distribución pública.

No se efectúa el análisis correspondiente al tercer escenario ya que como se observa en la Figura 3 la poliarmónica carece de armónicos triples.

4. INCREMENTO DE LAS PÉRDIDAS EN LOS ALIMENTADORES

La distribución uniforme de la densidad de corriente en la sección de un conductor, solamente se presenta en corriente continua. La corriente alterna tiende a circular hacia la periferia de los conductores. Así en conductores circulares la densidad de corriente aumenta del centro a la superficie. Este fenómeno, denominado efecto pelicular (*skin* en inglés), se torna más evidente para altas frecuencias y para los conductores de mayor sección.

La distribución de la densidad de corriente en la sección de un conductor, también resulta afectada por los campos magnéticos debidos a la presencia de otros conductores vecinos, lo cual se conoce con el nombre de “efecto de proximidad”.

Estos fenómenos son normalmente ignorados, debido a que son poco perceptibles a la frecuencia de 50 Hz, pero por encima de los 300 Hz, (7ª armónica y superiores), se vuelven significativos, causando pérdidas adicionales por calentamiento. Ello se debe a que el incremento de resistencia es proporcional al cuadrado de la frecuencia.

Existen en la bibliografía numerosas fórmulas, tablas y curvas que muestran la variación de la resistencia que presenta un conductor para corrientes de distinta frecuencia.

Por ejemplo la norma UNE 21-144 recomienda las siguientes expresiones de cálculo de la resistencia en corriente alterna a la temperatura T del conductor

$$r_o(T)_{ca} = r_o(T)_{cc} [1 + Y_s + Y_p] \quad [2]$$

Donde: Y_s es el incremento de la resistencia debido al *efecto pelicular*, e Y_p es el debido al *efecto de proximidad*. Estos se calculan de manera suficientemente aproximada como:

$$Y_s = 3,28 \cdot \frac{f^2 \cdot F^2}{\rho_T^2 \cdot 10^8} \quad [3]$$

Siendo: f la frecuencia en Hz, F la sección efectiva en mm^2 , y ρ_T la resistividad del conductor a la temperatura T expresado en $[\text{Ohm mm}^2/\text{km}]$.

$$Y_p = Y_s \cdot 29 \cdot a^2 \quad [4]$$

Donde: a es la relación entre el diámetro del conductor y la distancia media geométrica entre los ejes de los conductores próximos.

Las dos fórmulas precedentes son aplicables a cables unipolares. Para cables tripolares deberá sustituirse el 3,28 por 5. Además no debe utilizarse para conductores de secciones superiores a los 300 mm^2 .

A continuación se aplican estas expresiones, a un caso concreto, para poder analizar cuantitativamente el incremento de las pérdidas Joule en los alimentadores de un sistema de distribución. Para ello se estudia el comportamiento de los cables cuando el contenido armónico de las corrientes responde a cada uno de los escenarios mostrados en el ítem 2, contando además con los siguientes datos:

- Frecuencia fundamental: 50 Hz
- Sección de los conductores de fase: 240 mm²; material aluminio; longitud 200 m = 0,2 km
- Resistividad del aluminio a $\rho_{70^{\circ}\text{C}} = 33 \Omega \text{ mm}^2/\text{km}$
- Se tomará una corriente cuyo valor eficaz sea igual a 350 A independientemente de su distribución armónica.

La resistencia para corriente continua de cada uno de los conductores que forman el cable será:

$$R_{\text{fase}} = \rho \frac{l}{F} = 33 \times 0,2 / 240 = ,0275 \Omega \quad [5]$$

Las pérdidas por efecto Joule en las tres fases pueden calcularse usando:

$$P_j = 3 \sum_{h=1}^{\infty} R_h I_h^2 \quad [6]$$

Donde:

I_h es el valor eficaz de la corriente para la armónica h .

R_h es la resistencia del cable para la armónica h .

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla II

Tabla II. Incremento de las pérdidas Joule en los conductores de fase

	ENRE	LFC	Variador
THD [%]	25	104	98
I_{ef} [A]	350	350	350
Pérdidas Joule (poliarmónica) [W]	10302	11593	11541
Pérdidas Joule (50 Hz) [W]	10173	10173	10173
Incremento pérdidas [%]	1,27	13,96	13,45

Se observa que sólo en los escenarios extremos es posible notar un incremento apreciable en las pérdidas en los conductores de fase.

Debe destacarse la fuerte dependencia de la sección del conductor y su resistividad, ambas elevadas al cuadrado, como se observa en la expresión que permite evaluar la variación de la resistencia en función de la frecuencia, fórmula [3]. En la Tabla III se muestran algunos valores comparativos calculados para el “escenario variador”

Tabla III. Incremento de las pérdidas Joule en los conductores de fase

Comparación variando F y $\bar{\delta}_0$	Incremento [%]
Aluminio 240 mm ²	13,46
Alumino 100 mm ²	3,38
Cobre 240 mm ²	32,91
Cobre 120 mm ²	8,33

En los ejemplos anteriores no se ha considerado el aporte al incremento de las pérdidas, debido a la circulación de la corriente de neutro, cuyo valor no es nada despreciable para los “escenarios LFC y ENRE”. Tampoco se ha tenido en cuenta la influencia de la temperatura, que afecta en forma notable a la resistividad.

5. DEMÉRITO DE LOS TRANSFORMADORES

Los problemas fundamentales que provoca el contenido armónico de la corriente sobre el transformador son:

- Aumento de las pérdidas adicionales en los conductores activos.
- Aumento de las pérdidas por corrientes parásitas en partes conductoras.

El aumento de pérdidas adicionales en los conductores activos para una corriente poliarmónica, respecto de las provocadas por una corriente senoidal de frecuencia fundamental e igual valor eficaz, puede interpretarse como el resultado del aumento de la resistencia efectiva de corriente alterna para las componentes de frecuencia superior.

La norma IEEE Std. C57.110-1998 provee una metodología relativamente sencilla que permite, bajo ciertas suposiciones, y a través de los resultados de ensayo de rutina de un transformador, determinar la capacidad de un transformador para abastecer una corriente con un contenido armónico determinado.

El método se basa en la estimación de las pérdidas adicionales en los conductores y en otras partes conductoras, para el espectro armónico de las corrientes, considerando que las primeras varían con el cuadrado de la frecuencia, y las segundas con la frecuencia elevada a un exponente 0,8. A tal efecto se aplican los coeficientes de aumento de pérdidas adicionales a igual corriente eficaz en los conductores F_{HL} y en otras partes conductoras F_{HL-STR} :

$$F_{HL} = \frac{P_{adc}}{P_{adc-0}} = \frac{\sum_h I_h^2 \cdot h^2}{\sum_h I_h^2} \quad [7]$$

$$F_{HL-STR} = \frac{P_{adoc}}{P_{adoc-0}} = \frac{\sum_h I_h^2 \cdot h^{0,8}}{\sum_h I_h^2} \quad [8]$$

Donde: P_{adc} y P_{adc-0} son respectivamente las pérdidas adicionales en los conductores para una corriente poliarmónica y para una corriente senoidal, de frecuencia fundamental y de igual valor eficaz.

P_{adoc} y P_{adoc-0} son respectivamente las pérdidas adicionales en otras partes conductoras para una corriente poliarmónica y para una corriente senoidal de frecuencia fundamental y de igual valor eficaz. I_h es el valor de la corriente para un armónico de orden h .

A continuación se presenta un ejemplo para determinar la reducción de la potencia aparente de un transformador seco utilizando los tres escenarios de distribución de armónicas que se analizaron en el ítem 1. Para efectuar el cálculo se considera que las pérdidas adicionales en los conductores a 50 Hz representan el 5% de las pérdidas por efecto Joule a plena carga. El porcentaje utilizable de la S_n se calcula mediante la expresión:

$$\% S_n = 100 * \text{RAIZ} [(1+0,05)/(1 + F_{HL} * 0,05)] \quad [9]$$

La aplicación de la expresión [9] para cada uno de los escenarios considerados conduce a los siguientes resultados, Tabla IV.

Tabla IV Demérito de un transformador seco

	%Sn
LFC	70,50
ENRE	95,71
Variador	71,15



En la Tabla IV se puede observar que para la distribución de armónicos que fija como límite el ENRE se obtiene un demérito que no supera el 5%. Éste es el valor en el que se debe reducir la capacidad del transformador y el que deberá aplicarse al mismo en el supuesto que funcione permanentemente a plena carga. En los transformadores utilizados en la redes de distribución la carga responde típicamente a un perfil que presenta un pico pronunciado de pocas horas manteniéndose el resto del día con valores bastante inferiores. Este resultado explica la razón por la cual para la mayoría de los transformadores de distribución el efecto de la contaminación armónica de las redes puede considerarse despreciable. No sucede lo mismo para los otros dos escenarios extremos considerados, donde el demérito resulta del orden del 30%.

6. CONCLUSIONES:

Los resultados obtenidos en el desarrollo de esta ponencia pueden considerarse como una referencia en el momento de evaluar los posibles efectos de los armónicos sobre una red de distribución.

Se pudo observar, que salvo para eventos considerados extremos, el efecto de las armónicas es despreciable para cables y transformadores. No obstante deberá cuidarse la posible influencia del incremento en la corriente de neutro.

Se observó también la influencia que tiene, en la determinación de las pérdidas, el material del conductor y su sección. Este fenómeno es observable tanto en los conductores como en el cálculo del demérito por aumento de las pérdidas adicionales en un transformador.

En los transformadores en conexión triángulo/estrella con neutro, utilizados en la mayoría de las redes de distribución de nuestro país, deberá observarse también la presencia de la corriente de neutro debida a las armónicas triples del lado de Baja Tensión. Estas se reflejan al primario cerrándose en el triángulo, no propagándose a la línea de media tensión. Esto puede ocasionar problemas en la evaluación del estado de carga del transformador.

Se puede concluir diciendo que el efecto del calentamiento armónico en conductores y transformadores de distribución, normalmente, no es materia de gran preocupación. Un diseño prudente, sin embargo, requerirá su verificación.

BIBLIOGRAFÍA:

1. *La distorsión Armónica y la Corriente de Neutro*. Brugnoli, M.S., Asociación Internacional del Cobre, Buenos Aires, diciembre, 1999
2. *La Eficiencia Energética y la Calidad de la Energía Eléctrica*. Lemozy, N., Brugnoli, MS y Almeida, C. VIII Encuentro Regional Latinoamericano de la CIGRÉ (VIII ERLAC), Ciudad del Este, Paraguay, 30 mayo al 3 junio, 1999
3. *Simulación de cargas trifásicas deformantes utilizando MAT-LAB*; Mario Brugnoli, Norberto Lemozy; VICLAGTEE – Congreso Latinoamericano de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica. Mar del Plata, Argentina, noviembre de 2005
4. *Análisis del efecto de las cargas alineales en los transformadores de distribución*, Norberto A Lemozy, Edgardo G Vinson, Alejandro Jurado: CIDEL 2006, Buenos Aires, Argentina, noviembre
5. *Característica de la demanda residencial y su incidencia sobre la calidad de servicio de la Energía Eléctrica*. Brugnoli, M.S., C.G. Tanides y G.S. Dutt. 9º Congreso y Exposición Internacional de la Energía Eléctrica (CEDE/96), Buenos Aires, setiembre, 1996.
6. *Nuevos Criterios para el Dimensionamiento de Conductores Eléctricos*. Pirelli Cables



7. *Calidad de Potencia*. Juan Carlos Gomez Tarragona. Universidad Nacional de Río Cuarto
8. *A Time-Domain Approach to the Measurement Of K-Factor*. Shyh-Chyang Wang, Student Member, IEEE Michael Devaney, Member, IEEE Department of Electrical & Computer Engineering. University of Missouri – Columbia.
9. *Corrected Harmonic Loss Factor for Transformers Supplying Nonsinusoidal Load Currents*. Sergey N. Makarov Alexander E. Emanuel. Worcester Polytechnic Institute
10. *Harmonic Nonlinear Transformer Modeling*. Joaquín Pedra, Member, IEEE, Felipe Córcoles, Luis Sainz, and Ricardo López. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 2, april 2004
11. *Harmonics--Transformer Derating*. Daniel W. Egolf, Student Member, IEEE Washington State University Pullman, Alfred J. Flechsig, Senior Member, IEEE Washington State University Pullman.
12. *IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*. ANSI/IEEE C57.110-1986
13. *IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*. IEEE Std C57.110-1998. (Revision of IEEE Std C57.110-1986).
14. *IEEE Standard Practices and Requirements for Semiconductor Power Rectifier Transformers*. IEEE Std C57.18.10-1998. (Revision and redesignation of ANSI/IEEE C57.18-1964)
15. *Measurement of Harmonic Losses in Transformers Supplying Nonsinusoidal Load Currents*. Lorenzo Peretto, Member, IEEE, Renato Sasdelli, Member, IEEE, and Giovanni Serra, Member, IEEE. IEEE Transactions Instrumentation and Measurement, vol. 49, No. 2, april 2000
16. *Optimized Design of Transformers for Application in Silicon Controlled Rectifier Extinction and Ignition Circuits*. RONALD J. HRUBY, MEMBER, IRE. IEEE Transactions on component parts.
17. *Selection of Transformers for Commercial Buildings*. Rory Dwyer, Member IEEE. David R. Mueller, Member IEEE. Electrotek Concepts, Inc.
18. *Temperature Rise of Small Oil-Filled Distribution transformers Supplying Nonsinusoidal Load Currents*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996 283. A. W. Galli, Student Member, IEEE. M. D. Cox, Senior Member, IEEE. Department of Electrical Engineering. Louisiana Tech University Ruston, LA 71272
19. *Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load Currents*. IEEE Transactions on industry applications, vol. 32, no. 3. Linden W. Pierce, Member, IEEE.
20. *Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento*. Christian Collombet, Jean-Marc Lupin, Jacques Schonek. Cuaderno Técnico n° 152. Schneider
21. *Survey of harmonics level on the American Power Distribution System*. TC Shuter, HT Vollkommer Jr, TL Kirkpatrick. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 4, N° 4 october 1989
22. Dugan-Mc Granaghan-Beaty: *Electrical Power System Quality*. 1996.
23. Arrillaga J. et al: *Power System Harmonics*. 1985.
24. Grötzbach, M. et al: *Line Current Harmonics of VSI-Fed Adjustable Speed Drives*, IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 36, No. 2, March/April 2000, pp. 683-690.
25. IEC 60354 Loading Guide for immersed power transformer. 1991
26. Linden W. Pierce *Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load Currents*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, May/June 1996