SISTEMA DE DISTRIBUCION BAJO UN ENTORNO NO LINEAL

*José A. Salazar Paredes
Ingeniero eléctrico
Empresa Eléctrica Quito S.A.

Resumen

Desde el punto de vista de la ingeniería eléctrica las cargas eléctricas consideradas tradicionales desde hace algún tiempo han tenido un cambio significativo, pues si bien inicialmente eran de tipo resistivo, inductivo o capacitivo hoy en la actualidad se puede encontrar cargas con un comportamiento diferente a los esperados. Si bien con la electrónica de potencia se estableció prácticamente la carga no lineal esta ha contribuido a optimizar el uso de la energía, no obstante que la misma puede generar problemas de armónicas.

Este trabajo revisa ciertos parámetros eléctricos que se ven afectados en una red de Distribución típica debido al efecto de las cargas no lineales. Se hace una análisis de los diferentes tipos de armónicas encontradas a nivel de alimentador primario y a nivel de barras de subestaciones de distribución y generación, proponiendo adicionalmente ciertos métodos matemáticos para encontrar la característica de las diferentes armónicas. Se sugieren además ciertas recomendaciones tendientes a mejorar la calidad de la energía tanto en empresas de suministro eléctrico así como en las instalaciones de clientes de la red eléctrica, aprovechando equipos de tipo electromagnético con el objeto de reducir costos y condiciones peligrosas de resonancia.

Palabras claves: calidad de energía, armónicas, transformadores, factor de potencia, filtros.

Abstract

From the electrical engineering's point of view the electrical load recognized like traditional, since many years ago had changed significantly, because if from the first were resistive, inductive or capacitive, today can find loads with a diferent behavior with respect to indicated previously.
If well, with the power electronic born the nonlinear loads, this had given its contribution for utilize the energy in better state. Notwithstanding that the same electronic devices can cause harmonic problems.
This article make a study of several parameters that are influenced in a tipical utility due to non lineal loads. This analysis include study of different harmonics in feeders, substations and generation, moreover give some mathematic methods order to find its characteristic. Various recomendations are proposed to improve upon the power quality in facilities and utilities, using electromagnetic principles for reduce cost and dangerous conditions of resonance.

Introducción

Varios eventos durante el transcurso de este siglo han influenciado para que las cargas eléctricas y los servicios de los sistemas de distribución cambien radicalmente. El primero lo constituye la invención del transistor, donde nace la electrónica de potencia apareciendo como consecuencia inmediata la carga no lineal, un segundo evento lo constituye el problema de los energéticos ocurridos en los años setenta donde la electrónica se masifica con mas afán para producir equipos más eficientes con menor consumo de energía y una tercera influencia mundial ocurre afines de los ochenta donde que se busca mejorar la productividad con equipos mas eficaces, eficientes conjugando la reducción de costos y a su vez ofreciendo servicios de calidad.

A inicios de este siglo las cargas eléctricas consideradas típicas eran de tipo resistivo, inductivo o capacitivo es decir cargas lineales y resulta algo paradójico que a inicios del siglo XXI las nuevas cargas eléctricas lo constituyen en un alto porcentaje cargas no lineales. Si se revisa la tendencia actual del desarrollo tecnológico se encontrara que todo dispositivo tienen entre sus componentes internas algún dispositivo de control electrónico las mismas que en gran parte poseen fuentes de alimentación de modo conmutado o de otro tipo
Las empresas que suministran servicio eléctrico se mantuvieron durante mucho tiempo en una época en la que se podría llamar de la navegación tranquila, ya que estas solamente se preocupaban de satisfacer la creciente demanda de sus "usuarios" ya sea construyendo centrales de generación o subestaciones con mayor capacidad y por supuesto asumiendo que las cargas eléctricas eran las ya conocidas (resistivas - inductivas - capacitivas) las cuales a excepción de su tamaño no eran de preocupación técnica alguna para los profesionales de dichas empresas. Muchos de los estudios en la red eléctrica de distribución eran orientados solamente con fines de protección de los equipos de la red. Se daba además un marcado divorcio

(*) Correspondencia a: Ing. José A. Salazar Paredes
Av. 10 de Agosto y Las Casas- esquina E.E.Q. 3er.p.
Zip Code 1701473 – Quito –Ecuador
Phone: 593-2-520015 / 593-2-236915
e-mail: jaspsoft@yahoo.com

entre "abonado" y empresa eléctrica, ya que poco o nada en cuanto a información técnica cruzada existía.

Hoy en día en muchas empresas eléctricas en el ámbito mundial se habla mucho de la eficiencia, de la optimización de recursos, reducción de costos y la calidad en todos los aspectos que esta pueda estar involucrada. La época de la navegación tranquila para todas las empresas eléctricas ha llegado a su fin para abrir paso a una nueva época en la cual todo gira en función del ***cliente*** de la red eléctrica.

Este trabajo revisa ciertos aspectos técnicos actuales que se ven afectados en la red de distribución eléctrica y propone cierto análisis matemáticos tendientes a reducir armónicas generadas ya sea desde cargas puntuales o como efecto del conjunto de cargas. El objetivo de este articulo es concientizar a los técnicos que forman parte de: empresas eléctricas, libre ejercicio, entidades de educación superior, entidades publicas relacionadas al sector eléctrico, fabricantes de equipos y a los clientes de la red, sobre los cambios que se han dado en la red de distribución eléctrica en el nuevo entorno bajo el cual se navega.

Cargas eléctricas

Muchos estudios se han realizado con respecto a la influencia de las armónicas de corriente y voltaje en aparatos eléctricos y electrónicos, los mismos que han mostrado que si existen efectos secundarios sobre el desempeño de muchos de estos equipos. El propósito de este ítem no es analizar nuevamente los efectos internos de las armónicas de corriente en los equipos eléctricos, si no mas bien revisar las nuevas clases de cargas eléctricas y las formas de onda típicas de corriente que se puede encontrar en acometidas de varios tipos de clientes.

Existe una gran diversidad de cargas eléctricas las mismas que debido a su función especifica generan formas de onda de corriente diferentes a la onda sinusoidal y varias inclusive afectan directamente a la forma de onda de voltaje. A continuación se muestran varias curvas de corriente de equipos de tipo residencial, industrial, comercial que se han podido capturar con equipos de análisis de calidad de energía.

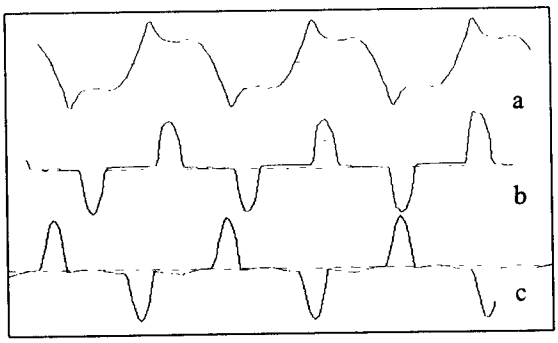

Figura 1. Corriente de: a) U.P.S. b) fotocopiadora c) computador personal

Tabla 1: Distorsión armónica individual y total (THD) en porcentaje de las cargas de la figura 1.

Armónicas impares	TDH (%) individual		
	Figura a	Figura b	Figura c
3	34.4	76.3	71.8
5	10	42.7	39.8
7	6.4	12.8	11.9
9	3.8	6.2	7.5
11	2.4	10.8	7.5
13	2	5.9	5
15	1.3	2.1	5.7
17	1	5.4	5.2
19	0.5	4.4	5.5
THD (%):	36.8	90	84.9

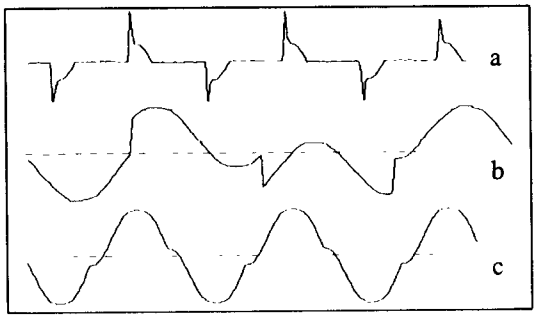

Figura 2. Corriente de lampara : a) compacta tipo I b) compacta tipo II c) fluorescente.

Tabla 2: Distorsión armónica individual y total (THD) en porcentaje de las cargas de la figura 2

Armónicas impares	TDH (%) individual		
	Figura a	Figura b	Figura c
3	78.4	1.3	7.9
5	47.7	9.2	6
7	25.8	5.2	2.4
9	28.2	0.8	1.5
11	31.4	4.2	0.8
13	26.5	2.9	0.6
15	24.4	0.9	0.4
17	25.9	2.9	0.4
19	23.2	2	0.2
21	20.4	1	0.3
23	19.7	2.6	0.3
THD(%):	124.9	27.7	10.4

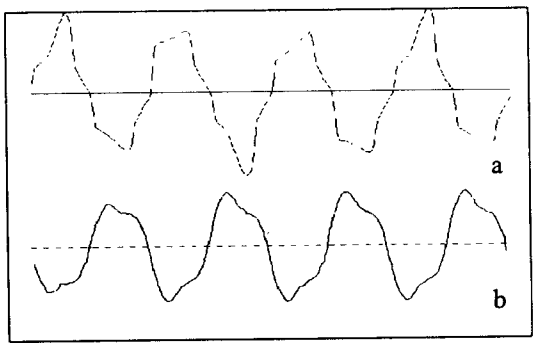

Figura 3. Corriente de: a) Torno industrial y soldadora eléctrica b) soldadoras eléctricas.

abla 3: Distorsión armónica individual y total (THD) en porcentaje de las cargas de la figura 3

Armónica impar	TDH (%) individual Figura a	Figura b
3	10.2	16.5
5	12.8	1.6
7	5.4	1.7
9	3.5	0.4
11	4.1	0.4
13	0.4	0.7
15	1.3	0.3
TDH %:	18.4	16.8

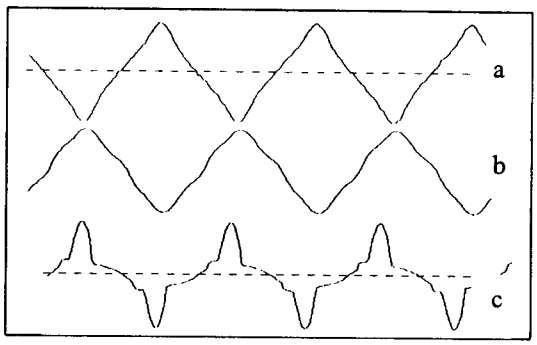

Figura 4. Corriente de: a) refrigeradora domestica 12 pies b) licuadora electrica domestica c) Televisor a color de 14 pulg. y lampara compacta.

Tabla 4: Distorsión armónica individual y total (THD) en porcentaje de las cargas de la figura 4

Armónica impar	TDH (%) individual Figura a	Figura b	Figura c
3	16.2	7.5	42
5	5.5	5.3	25.9
7	1	1.7	14.1
9	0.2	0.4	2.7
11	0.3	0.4	5
13	0.4	0.3	4.6
15	0.2	0	1.2
TDH (%):	17.2	9.6	52.1

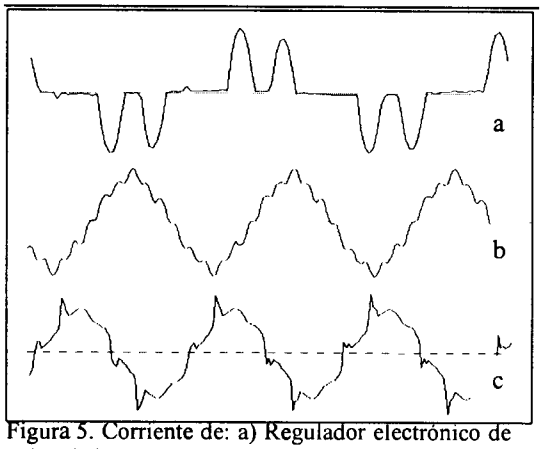

Figura 5. Corriente de: a) Regulador electrónico de velocidad - ASD b) Convertidor de doce pulsos AC/DC c) Control electrónico industrial.

Tabla 5: Distorsión armónica individual y total (THD) en porcentaje de las cargas de la figura 5

Armónicas impares	THD(%) individual figura a	Figura b	figura c
3	7.1	3.0	2.1
5	73.6	7.2	9.1
7	56.1	2.1	14.7
9	4	0.3	1.4
11	18.9	10.9	8.2
13	5.9	1.2	7.4
15	1.4	0.5	1.7
17	10.4	0.7	4.1
19	8.4	0.7	3.6
THD (%):	96.6	13.8	22.2

Las curvas mostradas anteriormente corresponden a los siguientes casos:

- Figura 1: Equipos comúnmente encontrados en oficinas.
- Figura 2: Luminarias electrónicas compactas y de tipo convencional (fluorescente) utilizadas en oficinas y hogares. Si bien las lampara de tipo compacto ayudan a reducir significativamente el consumo de energía en los hogares, sin embargo existen otros efectos secundarios que se deben tomar en cuenta como la distorsión armónica, el factor de potencia, efecto estroboscópico, el color del flujo luminoso.
- Figura 3. Curvas halladas en muchas pequeñas industrias, donde por lo general se utilizan soldadoras eléctricas y motores trifasicos.
- Figura 4. Los clientes residenciales constituyen la mayor parte del numero total de clientes de una empresa eléctrica. Las figuras son comúnmente encontradas en los hogares que poseen este tipo de equipos.
- Figura 5. Existen industrias con alto grado de automatización, entre estas se encuentran las industrias: de textiles, plásticos, cerámica, alimenticia, transporte. La figura muestra curvas típicas de controladores electrónicos de velocidad (ASD adjustable speed drive) de convertidores AC/DC y maquinas robotizadas.

Un altísimo numero de cámaras de transformación en edificios comerciales, de viviendas e industrias al igual que en transformadores trifásicos que alimentan a circuitos secundarios de redes e distribución tienen la conexión delta en el primario y estrella con conexión a tierra en el lado secundario. Si se observa en muchos de los espectros de frecuencia armónica de las figuras mostradas anteriormente se puede notar que las armónicas que más incidencia tiene en la forma de onda característica, además de la componente fundamental, son la tercera, quinta y séptima armónica.

Si consideramos que la conexión delta tiene la particularidad de cancelar la tercera armónica de corriente, entonces como consecuencia directa de este fenómeno se puede presumir que en los alimentadores

primarios existirá un alto grado de quintas, séptimas y otro orden superior de armónicas presentes en el espectro de la corriente que llega a las subestaciones de distribución. Experimentalmente se ha comprobado que efectivamente así sucede, la figura 6 es un ejemplo de esta tendencia, estas curvas se han encontrado en una subestación que alimenta a un sector comercial y donde existen también edificios de oficinas.

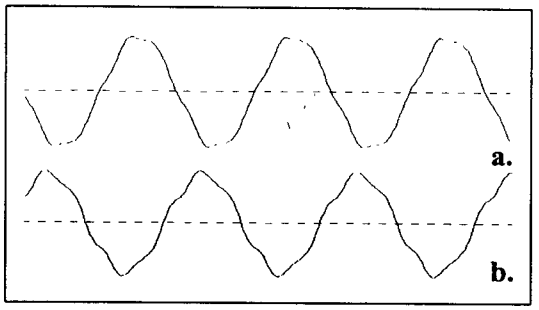

Figura 6. A) Voltaje en barra de subestación b) Cor b en transformador de subestación.

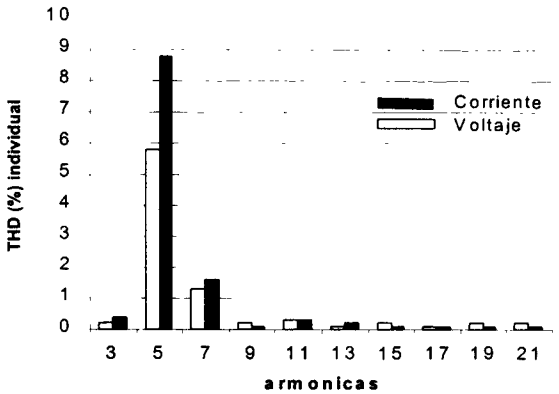

Figura 7. Espectro del voltaje y corriente de barra correspondiente a las curvas de la figura 6. THDv(%)=6.0, THDi(%)=9.0

Las corrientes en un primario conteniendo quintas, séptimas y otras armónicas a la larga producen distorsión en el voltaje, es decir se degrada la calidad de energía que se suministra al cliente.

En casi toda red de distribución la presencia de la quinta armónica es un factor común. La contaminación armónica en el voltaje es una gran preocupación por parte de las empresas eléctricas y es por ello que en la actualidad se recomienda realizan estudios de flujos de potencia considerando cargas no lineales, pues al existir frecuencias superiores a la fundamental se produce un caldo de cultivo para que se den nuevos problemas de orden técnico como la resonancia entre

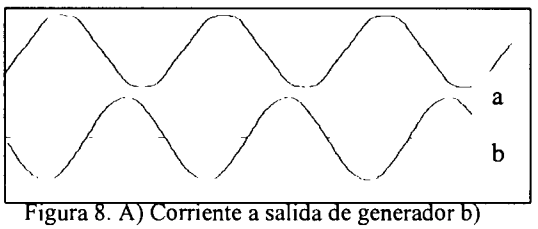

Figura 8. A) Corriente a salida de generador b) Voltaje en bornes de generador.

capacitores de las subestaciones, transformadores de potencia, el sistema de subtransmision y distribución. Es preocupante también que las armónicas producidas desde el sistema de distribución lleguen a las centrales de generación eléctrica cercanas al sistema. La figura 8 muestra un ejemplo de lo anterior.

Tabla 7: Distorsión armónica individual y total (THD) en porcentaje de la figura 8 - generador

Armónicas	THD(%) individuales	
Impares	figura a (i)	Figura b (v)
3	0.6	0.2
5	3.5	0.7
7	0.1	0.2
THD%:	3.6	1

corriente puede producir micro torques que reducen a la larga la vida útil de las unidades generadoras.

Factor de potencia

Durante mucho tiempo se han fabricado equipos que consideraban que todas las cargas eléctricas entregaban ondas sinusoidales similares a las del voltaje aplicado, bajo este supuesto el calcular el factor de potencia se constituía en una simple operación matemática.
Si se observan las corrientes generadas por varios equipos, se puede apreciar que la forma de onda de la corriente en muchos de los casos se diferencian sustancialmente de la sinusoide, por lo que el concepto de factor de potencia se muestra conflictivo con las consideraciones anteriores.

Considérese un voltaje y corriente armónica representadas por las series de Fourier siguientes [1]:

$$v(t) = \sum_{k=1}^{\infty} V_k \operatorname{sen}(k\omega_o t + \delta_k) \quad (1)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \operatorname{sen}(k\omega_o t + \theta_k) \quad (2)$$

El factor de distorsión armónica total (THD - total harmonic distorsión) esta definido por:

$$THD_x = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} X_{k\,rms}^2}{X_{1rms}} \bullet 100\% \quad (3)$$

de donde se puede relacionar el valor rms de la corriente y el voltaje con el THD correspondiente como:

$$X_{rms} = X_{1rms}\sqrt{1+(THD_x/100)^2} \quad (4)$$

El conocido factor de potencia (verdadero) se lo define como la relación entre la potencia promedio y la potencia aparente o:

$$fp_{verdadero} = \frac{P_{promedio}}{S} = \frac{P_{promedio}}{V_{rms} I_{rms}} \quad (5)$$

antes de proceder a hacer los reemplazos, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- En muchos casos las potencias promedios de las componentes armónicas son muy pequeñas en comparación a la de la fundamental por lo que:

$$P_{promedio} \approx P_{1\ promedio} \qquad (6)$$

- Puesto que el TDH del voltaje se encuentra por lo general bajo un 10%, entonces de (4) se tiene:

$$V_{rms} \approx V_{1\,rms}$$

se obtiene entonces que

$$fp_{verdadero} \approx \frac{P_{1\,promedio}}{V_{1rms}\ I_{1rms}} * \frac{1}{1+\left(\frac{THD_i}{100}\right)^2} \qquad (8)$$

de donde

$$fp_{verdadero} \approx fp_{desplazamiento} * fp_{distorsion} \qquad (9)$$

en (9) se define como *desplazamiento del factor de potencia* al aporte de la componente fundamental y como factor de potencia de la distorsión armónica al segundo termino de la relación propuesta. De (9) se puede ver que al anteriormente conocido "factor de potencia" se ha transformado en el *desplazamiento del factor de potencia* (Dpf) y al factor de potencia total ahora se le denomina simplemente *factor de potencia (fp)* o también *verdadero factor de potencia* (Tpf - True power factor).
Experimentalmente se ha podido comprobar que en muchos de los casos el factor de potencia (TPf) de cargas no lineales es menor al desplazamiento del factor de potencia (Dpf).

El factor de potencia de las cargas eléctricas consideradas anteriormente ha arrojado los siguientes resultados:

Tabla 8. Factores de potencia de cargas no lineales.

Elemento	Dpf	Tpf	THDi (%)	
U.P.S.	0.639	0.598	36.8	*
Regulador electrónico de velocidad - ASD	0.662	0.454	96.6	
Fotocopiadora	0.089	0.104	90.0	*
Computador personal	1	0.758	84.9	*
Lampara electrónica compacta tipo I	0.97	0.591	124.9	*
Fluorescente (1)	0.956	0.95	10.4	*
Torno-suelda eléctrica	0.999	0.971	22.8	
Refrigeradora (1)	0.793	0.785	17.2	*
Televisor-lamp. Comp.	0.995	0.873	52.1	
Licuadora	0.664	0.661	9.6	
Convertidor AC/DC	0.938	0.929	13.8	*
Trafo subestación	0.874	0.872	9.0	

(*) desplazamiento del factor de potencia en adelanto

Tabla 9. Factores de potencia de otras cargas no lineales [1].

Elemento	Dpf	Tpf	THDi (%)	
Ventilador	0.999	0.999	1.80	
Refrigeradora (2)	0.875	0.867	13.4	
Horno microondas	0.998	0.982	18.2	
Aspiradora domestica	0.951	0.921	26.0	
Fluorescente (2)	0.956	0.889	39.5	*
Televisor 14 pulg.	0.988	0.629	121.0	*
Computador-impresora	0.999	0.580	140.0	*
Equipo de sonido moderno (1000W sal.)	0.811	0.735	45.8	*

(*) desplazamiento del factor de potencia en adelanto

De los resultados obtenidos con respecto al verdadero factor de potencia se observa que la relación (8) se ajusta significativamente.
Muchos equipos de medición entre los cuales se encuentran medidores de KWh o KVARh y relés de protección de disco de inducción son utilizados en alto grado en sistemas de distribución tradicionales. Muchos de estos equipos de medición solamente registran la presencia de la componente fundamental (Dpf) dejando de lado las componentes armónicas, por lo que de existir corrientes armónicas generadas desde cargas no lineales se estaría incurriendo en registros erróneos del verdadero factor de potencia (Tpf), magnitudes de corriente y/o voltaje y los kilovatios-hora o kvar-hora que consume el cliente.

Caracterización armónica

En todo sistema trifásico siempre se considero que las fases involucradas se encontraban desplazadas 120 grados entre sí y se asumía además que las componentes de secuencia positiva, negativa y cero no coexistían simultáneamente en el sistema, por lo que el análisis de componentes simétricas se lo hacia separadamente.

Como se ha podido comprobar experimentalmente cuando existen cargas no lineales las componentes de secuencia positiva, negativa y cero si pueden coexistir al mismo tiempo. Las corrientes de secuencia cero no necesariamente pueden aparecer por efecto de cargas desbalanceadas.

Considérese los fasores de secuencia positiva como se muestra a continuación:

$$va_h = V_h \angle 0^0 * h \qquad (10)$$

$$vb_h = V_h \angle -120^0 * h \qquad (11)$$

$$vc_h = V_h \angle 120^0 * h \qquad (12)$$

donde h es el orden de armónica a considerar. Para la componente fundamental (h=1) y se tiene las componentes de secuencia positiva.

ejemplo para la quinta armónica (h=5) se tiene:

$$va_5 = V_5 \angle 0^0 * 5 = V_5 \angle 0^0$$

$$vb_5 = V_5 \angle -600^0 = V_5 \angle 120^0$$

$$vc_5 = V_5 \angle 600^0 = V_5 \angle -120^0$$

Estos fasores obtenidos con respecto a las componentes de secuencia positiva (h=1) corresponden a unas componentes de secuencia negativa, lo que significa que de existir esta armónica en la corriente o voltaje este actuara de acuerdo a su característica eléctrica. En un motor alimentado con voltaje conteniendo la quinta armónica creara un campo electromotriz contrario al generado por la frecuencia fundamental el cual se encontrara presente en el entrehierro produciendo un efecto de frenado. Como se menciona al analizar las cargas eléctricas, la quinta armónica (v, i) se encuentra presente a casi todo sistema de distribución tradicional por lo que un análisis del sistema de distribución bajo estas condiciones se torna algo complejo e interesante. La tabla 10 muestra otros casos de armónicas.

Tabla 10. Relación armónica entre las componentes simétricas.

Armónica	Secuencia
1	Positiva
2	Negativa
3	Cero
4	Positiva
5	Negativa
6	Cero
7	Positiva
8	Negativa
9	Cero

Las armónicas de orden par por lo general no se presentan a menudo por lo que casi en todo los análisis armónico estos se circunscribe a analizar las armónicas impares.

Si se analiza el caso de una corriente armónica conteniendo terceras armónicas (h=3) se obtiene:

$$I_{a3} \angle 0^0 + I_{b3} \angle 0^0 + I_{c3} \angle 0^0 = 3(I_{a3} \angle 0^0)$$

De existir una conexión estrella con aterramiento, todas las corrientes de secuencia cero fluirán hacia el neutro donde en el peor de los casos pueden sobrepasar el limite térmico del conductor. El voltaje neutro tierra en estas condiciones se vuelve preocupante, además de que se produce ruido electromagnético que pueden afectar a circuitos de comunicación.

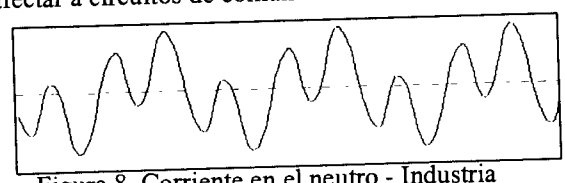

Figura 8. Corriente en el neutro - Industria

Tabla 11. THD individual y total en porcentaje de la corriente de la figura 8.

Armónicas	THD(%) individuales
3	120.5
5	12.6
7	1.3
9	7.3
THD(%):	121.4

Longitud de Primarios y perdidas técnicas

La longitud del alimentador primario es un parámetro importante en el diseño de las redes de distribución que sirven a los diferentes tipos de clientes. Las cargas no lineales al final de primarios de longitud relativamente larga (>5 Km) influyen en forma mas sustancial en incremento de las perdidas técnicas, en la distorsión armónica del voltaje y corriente que llegan a la barra de una subestación y en el comportamiento mismo del sistema.

La tabla 12 muestra un ejemplo de la variación de la distorsión armónica del voltaje y corriente para diferentes longitudes de un alimentador primario.

Tabla 12. Datos del análisis armónico de la figura 9, se muestran los datos del THD de voltaje en %.

Cargas		Subestación				
Barra (3) THDv (%)	No lineal THDv (%)	L. de Baja (B.V.) THDv (%)	(%) *	Lado Alta THDv (%)	Capac. 0.55 MVAR En (2)	Longt. (Km)
47.3	47.2	5.1	[5]=4.4	0.2	SI	25.0
41.3	41.3	5.5	[5]=4.0	0.2	SI	20.0
38.8	39.0	6.7	[7]=5.8	0.3	SI	15.0
25.9	26.1	6.3	[7]=5.5	0.3	SI	10.0
14.0	14.4	5.6	[11]=3.7	0.2	SI	5.0
27.1	27.6	3.0	[7]=1.8	0.1	NO	25.0
22.0	22.5	3.0	[7]=1.8	0.1	NO	20.0
.1	17.5	3.0	[7]=1.8	0.1	NO	15.0
12.3	12.7	3.0	[7]=1.9	0.1	NO	10.0
7.7	7.9	3.1	[7]=1.9	0.1	NO	5.0

(*) THDv individual en porcentaje

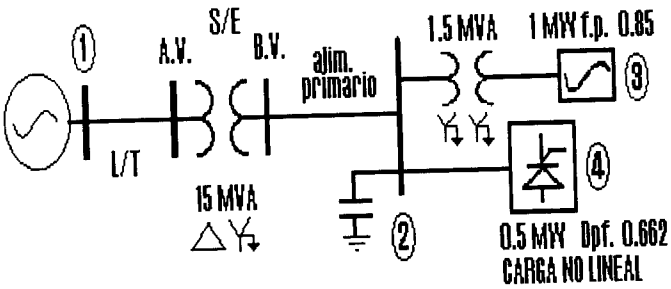

Figura 9. Diagrama unifilar de un circuito que alimenta a una carga no lineal y una convencional.

Tabla 13. Distorsión armónica Total de la corriente en porcentaje (THDi %) del análisis del circuito de la figura 9.

Trafo 15 MVA		Primario		Trafo 1.5 MVA	Capact. 0.55 MVAR en (2)	Longtd. (Km)
A.V. - B.V. THDi %	(*)	B.V. - (2) THDi %	(*)	THDi %		
25.1	[5]=78.5	85.1	[5]=78.5	38.2	SI	25.0
25.4	[5]=73.2	88.0	[5]=73.2	34.4	SI	20.0
28.0	[7]=76.3	99.0	[7]=76.3	33.4	SI	15.0
25.3	[7]=73.9	91.3	[7]=73.9	22.9	SI	10.0
19.9	[7]=47.0	72.4	[7]=47.0	12.7	SI	5.0
13.5	[5]=26.0	32.8	[5]=26.0	20.1	NO	25.0
13.4	[5]=26.5	33.6	[5]=26.5	17.1	NO	20.0
13.3	[5]=27.0	34.4	[5]=27.0	13.9	NO	15.0
13.3	[5]=27.5	35.3	[5]=27.5	10.5	NO	10.0
13.3	[5]=28.0	36.1	[5]=28.0	6.8	NO	5.0

(*) TDHi individual en porcentaje

Los datos del circuito de la figura 9 se encuentran en el apéndice.

Los datos obtenidos del análisis de la figura 9 muestran que:

- A medida que la longitud del primario se incrementa la distorsión de la corriente así como de voltaje lo hacen en igual tendencia.
- La presencia del capacitor en el punto de común acoplamiento de la red y las cargas en estudio, produce una resonancia armónica para cierta longitud del primario, en el caso analizado estas se producen para una longitud de primario de 15 Km (7° armónica) y 5 Km (11° armónica) (ver figura 11).
- Es de esperarse que las perdidas por efecto piel se incremente por efecto de la amplificación de la distorsión armónica. Experimentalmente en [2] se han obtenidos datos que relacionan la resistencia DC y la resistencia en condiciones AC, la tabla 14 muestra algunos datos.

Tabla 14. Valores Rac/Rdc de cables a frecuencias armónicas [2].

Calibre	Armónicas Fundamental	5°	7°
1/0 AWG	1.00	1.09	1.17
2/0 AWG	1.01	1.15	1.26
3/0 AWG	1.01	1.22	1.38
4/0 AWG	1.02	1.33	1.53
250 MCM	1.02	1.41	1.64
350 MCM	1.05	1.67	1.97
Datos de corriente de prueba:			
Armónica	5	7	11
Ih-valor p.u.	0.175	0.110	0.045

Cables de prueba tipo THWN o THHN code NEC

La figura 10 muestra la corriente encontrada experimentalmente en un primario de gran longitud (> 100 Km.) la cual llega a una subestación de distribución.

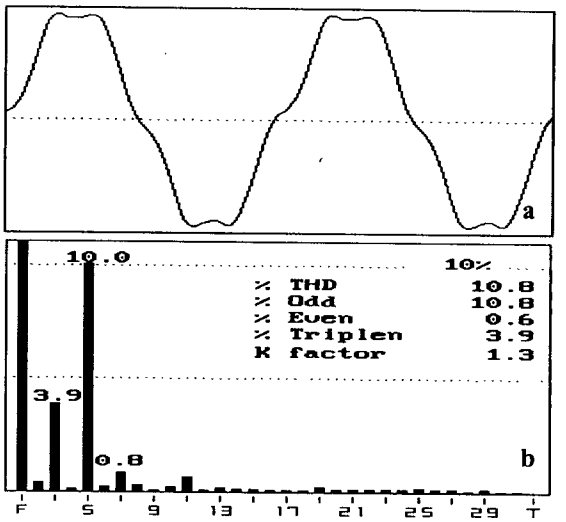

Figura 10. a) Corriente de primario de gran longitud (>100 Km) b) espectro de corriente.

Capacitores y filtros de armónicas

La utilización de capacitores como medio tradicional para mejorar el factor de potencia ha sido una practica común desde hace mucho tiempo. La presencia de cargas no lineales y en general de armónicas en la corriente como en el voltaje pueden ocasionar en muchos casos condiciones de resonancia entre la red y el capacitor que *aparentemente* corregirá el factor de potencia, lo cual hace que en muchos de estos casos el factor de potencia final sea igual o inferior al anterior.

En las tablas 12 y 13 se muestran datos de la condición de circuito de la figura 9 colocando un capacitor de 0.55 MVAR.

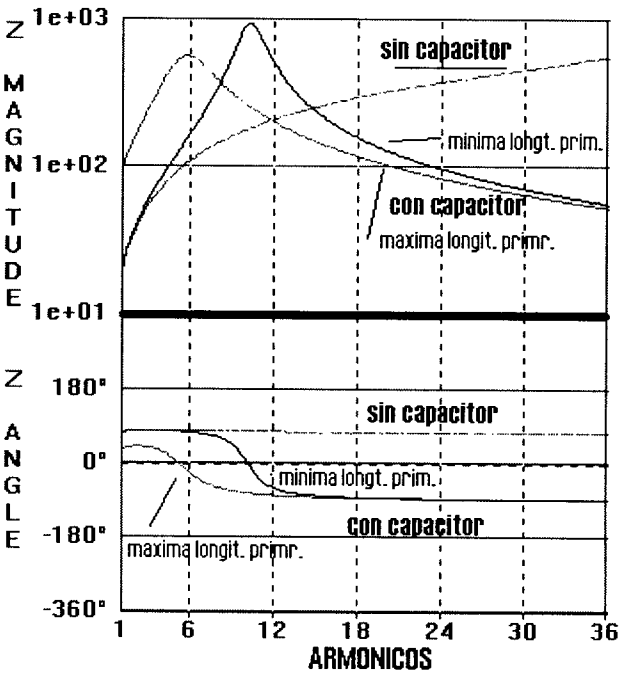

Figura 11. Efecto de colocar un capacitor en la barra 2 de la figura 9 para mínima (5 Km.) y máxima longitud del primario (25 Km.).

Muchas subestaciones de distribución poseen bancos de capacitores con el objeto de compensar caídas de voltaje y/o corregir el factor de potencia, las cuales ante corrientes o voltajes armónicos las hace candidatas a tener condiciones de resonancia.
Si en circuito de la figura 9 se coloca la unidad de 0.55 MVAR en la barra de la subestación (B.V.) se tendrían los siguientes resultados.

Tabla 15. THDi y THDv del análisis del circuito de la figura 9, con capacitor en barra B.V. (subestación).

Distorsión armónica total de corriente (THDi %)

Trafo 15 MVA		Primario		Trafo 1.5 MVA	Capact. 0.55 MVAR En B.V.	Longtd. (Km)
A.V. - B.V.		B.V. - (2)				
THDi %	THDi (%)*	THDi %	THDi (%) *	THDi %		
52.5	[5]=34.7	32.9	[5]=25.9	20.0	SI	25.0
54.5	[5]=35.4	33.8	[5]=26.5	17.0	SI	20.0
56.6	[5]=36.1	34.6	[5]=27.0	13.9	SI	15.0
58.7	[5]=36.7	35.4	[5]=27.5	10.7	SI	10.0
60.7	[5]=37.3	36.3	[5]=28.0	7.8	SI	5.0

Distorsión armónica total de voltaje (THDv %)

Cargas		subestación Lado de baja B.V.		Lado de alta A.V.	Capact. 0.55 MVAR en B.V	Longtd. (Km)
Barra (3) THDv (%)	No Lineal THDv (%)	THDv (%)	THDv (%) *	THDv (%)		
26.7	27.0	5.9	[17]=4.5	0.3	SI	25.0
21.6	22.0	6.1	[17]=4.8	0.3	SI	20.0
16.9	17.2	6.4	[17]=5.0	0.3	SI	15.0
12.5	12.7	6.6	[17]=5.3	0.3	SI	10.0
8.7	9.0	6.9	[17]=5.5	0.3	SI	5.0

(*) TDHi y THDv individual en porcentaje

Los datos muestran que para una longitud de 25 Km. la distorsión armónica del voltaje aplicado en las cargas se incrementa y se produce además una resonancia en la armónica 17°. Para este dato la corriente en el punto (3) (trafo 1.5 MVA) se torna mas distorsionada aun cuando el THD de la corriente como del voltaje en la subestación se reduce.

El punto de común acoplamiento (PCA) del cliente con la red de distribución es sitio a tener muy en cuenta al momento de suministrar el servicio, pues el tener cargas no lineales y capacitores implica un análisis armónico en el cual deben tomarse en cuenta entre otros parámetros los siguientes:

- Corriente de cortocircuito en el PCA
- Tamaño de la carga (MVA)
- Tipo de carga (lineal - no lineal)
- Capacitores más cercanos
- Cargas vecinas (tipo de primario)
- Topología de la red, longitud del primario.
- Armónicas presentes en el voltaje
- Hora programada de conexión o desconexión de banco de capacitores de las subestaciones.

El ultimo punto se menciona pues muchas cargas no lineales son muy sensibles a los transitorios producidos por la energización de capacitores de las subestaciones de distribución.

Reduccion de armónicas

Filtros de armónicas

La presencia de cargas no lineales que generan armónicas de corriente principalmente ha obligado ha buscar maneras de reducir este efecto en las redes de distribución, la colocación de filtros L-R-C (inductancia - resistencia - capacitancia) para cancelación de armónicas es una buena técnica para reducir la distorsión armónica de la corriente y por ende del voltaje.
En muchos países se han adoptado regulaciones que limitan la distorsión armónica de la corriente de los grandes clientes en el PCA al igual que se ha emitido limites para la distorsión armónica del voltaje para empresas eléctricas.
El efecto global de las cargas de tipo residencial y/o comercial es un problema a resolver por la empresa que suministra el servicio eléctrico. Cuando existe una presencia significativa de corrientes armónicas en los alimentadores primarios es practica común colocar filtros de armónicas en distintos ramales del mismo para reducir la distorsión armónica de la corriente, pero esta practica puede involucrar otras frecuencias armónicas resonantes con el sistema y en suma el análisis del comportamiento de la red se torna más complejo.

En el circuito de la figura 9 se ha colocado dos filtros de armónicas para la 5° y 7° en la barra #3. Los resultados se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. THDi y THDv del análisis del circuito de la figura 9, con filtro para la 5° y 7° armónica en la barra #3.

Distorsión armónica total de corriente (THDi %)

Trafo 15 MVA		Primario		Trafo 1.5 MVA	Filtro 5,7 En (3)	Longtd. (Km)
A.V. - B.V.		B.V. - (2)				
THDi %	THDi (%)*	THDi %	THDi (%) *	THDi %		
9.8	[5]=8.3	10.6	[5]=8.3	6.1	SI	25.0
16.2	[5]=14.0	16.7	[5]=14.0	4.5	SI	10.0
21.0	[5]=18.1	21.4	[5]=18.1	3.6	SI	5.0

Distorsión armónica total de voltaje (THDv %)

Cargas		subestación Lado de baja B.V.		Lado de alta A.V.	Filtro 5,7 en (3)	Longtd. (Km)
Barra (3) THDv (%)	No Lineal THDv (%)	THDv (%)	THDv (%) *	THDv (%)		
7.6	8.2	1.0	[5]=0.5	0.1	SI	25.0
5.2	5.5	1.4	[5]=0.7	0.1	SI	10.0
3.9	4.2	1.7	[5]=0.9	0.1	SI	5.0

(*) TDHi y THDv individual en porcentaje

De los datos de la tabla 16 se aprecia nuevamente que aun cuando existe un filtrado en la carga no lineal el efecto de tener un primario de gran longitud hace que el voltaje que reciben los clientes este mas distorsionado.

Transformadores

Un elemento importante en los sistemas de distribución es indudablemente el transformador. Si bien el estudio de las armónicas inicialmente se dio como resultado de las corrientes de magnetización y de energización o inrush, hoy en día que existen cargas no lineales que generan continuamente armónicas de corriente el estudio no esta solamente circunscrito al comportamiento de estas corrientes en el interior del transformador sino también abarca a los elementos más cercanos a este equipo (impedancia de la red, capacitores etc.)

Muchos transformadores de distribución pueden presentar problemas relacionados con calentamientos adicionales a los esperados cuando el nivel del THD de la corriente (THDi) esta sobre el 8% y el transformador esta a un 80% o más de su capacidad nominal, particularmente si las armónicas son tripletes (3, 9, 15, 21...) [3].

En la actualidad debido al incremento de cargas no lineales varios parámetros nuevos se deben revisar al adquirir transformadores para redes de distribución.

- Factor K.
- Tipo de conexión

Factor K

Si bien factor K relaciona la capacidad de un transformador para servir cargas no lineales sin exceder los limites de temperatura nominales, este factor no contribuye a reducir la presencia de armónicas en los alimentadores primarios e inclusive según [4] dado que el nivel del THDv en las cargas no lineales es inversamente proporcional al nivel de carga del transformador, al reemplazar un transformador de tipo convencional por otro con un K-nominal implica un incremento en el THDv de la carga.

Una experiencia obtenida por [4] indica que cuando se reemplazo un transformador de distribución convencional de 112.5 KVA (THDv obtenido indicaba 5.1% en los terminales del secundario) luego de efectuada la sustitución con un transformador con factor K igual a 13 (K-13) de igual capacidad e impedancia el THDv se incremento a 11.8%.

Tipo de conexión

El tipo de conexión de un transformador trifásico casi siempre ha sido un parámetro que poco o nada se toma en cuenta el momento de adquirir un transformador, sin embargo debido al aparecimiento de las cargas no lineales el tipo de conexión puede representar un factor importante para la reducción de cierto tipo de armónicas generadas desde cargas no lineales.
Con el fin de describir este efecto de tipo electromagnético, considérese los fasores de secuencia positiva como se muestra a continuación:

$$Ia_h = I_h \angle (0^0 + \Phi) * h + \Theta_0 \quad (13)$$

$$Ib_h = I_h \angle (-120^0 + \Phi) * h + \Theta_0 \quad (14)$$

$$Ic_h = I_h \angle (120^0 + \Phi) * h + \Theta_0 \quad (15)$$

h es el orden de armónica, Φ es el ángulo de defasamiento angular del transformador y Θ_0 el ángulo inicial. Por ejemplo para una conexión Dy1 el ángulo Φ tendrá un valor de 30° y las componentes de secuencia correspondientes serian las siguientes:

$$Ia_h = I_h \angle 30^0 * h \quad (16)$$

$$Ib_h = I_h \angle -90^0 * h \quad (17)$$

$$Ic_h = I_h \angle 150^0 * h \quad (18)$$

Para Θ_0 igual 0° se obtiene una relación general para el caso de un defasamiento de 30 grados entre las componentes del devanado primario y secundario.
De tener un transformador con conexión Dz0 se tendría:

$$Ia_h' = I_h \angle 0^0 * h \quad (19)$$

$$Ib_h' = I_h \angle -120^0 * h \quad (20)$$

$$Ic_h' = I_h \angle 120^0 * h \quad (21)$$

Ahora bien, asuma que la corriente de dos cargas no lineales con similar espectro armónico (ver tabla 5 espectro de la figura a) y potencia se encuentran conectadas a dos transformadores tipo Dy1 y Dz0 como se muestra en la figura 12.

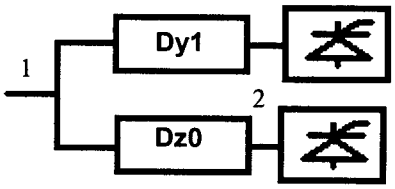

Figura 12. Conexión de dos transformadores a una carga no lineal con similar espectro de corriente.

A nivel del punto 2 de la figura 12 se tendrían los valores de THDi correspondientes a cada carga no lineal (se asume corrientes de valor similar para el ejemplo). Si se aplican las ecuaciones (16) a (21) con el objeto de obtener el THDi en el punto 1 se obtendrían los siguientes resultados (ver tabla 17).

Tabla 17. Datos correspondientes a la suma de corrientes armónicas en el punto 1 de la fig. 12.

Armónica	THDi (%) individual en pto. 2 (inicio)	THDi (%) Individual en pto. 1 (final)	% Reducción armónica
Fundamental	100.00	100.00	0
3	7.10	0.0	100.0
5	73.60	19.05	74.12
7	56.10	14.52	74.12
9	4.00	2.83	29.29
11	18.90	18.26	3.41
13	5.90	5.70	3.41
15	1.40	0.99	29.29
17	10.40	2.69	74.12
19	8.40	2.17	74.12
21	0.60	0.42	29.29
23	5.30	5.12	3.41
THDi (%) total:	96.08	31.41	

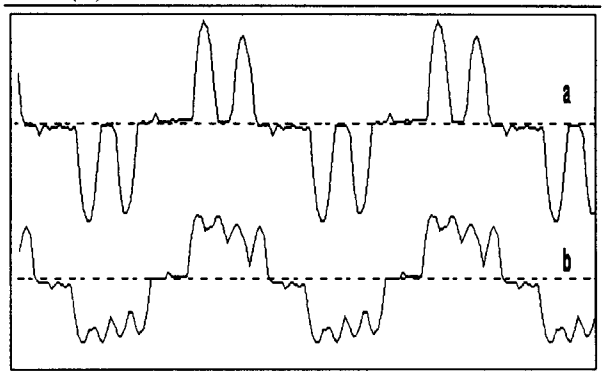

Figura 14. Formas de onda de corriente a) punto 2 b) final en el punto 1 de la figura 12.

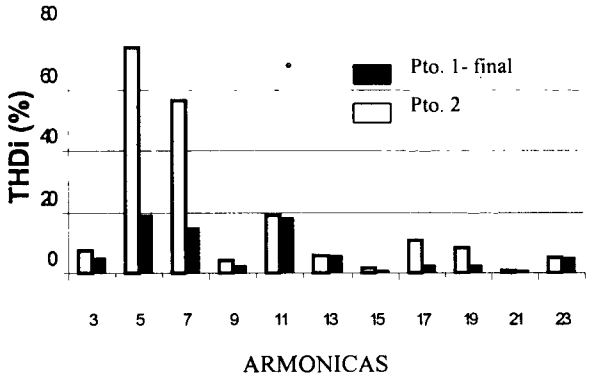

Figura 15. Comparación de las distorsiones armónicas de corriente- THDi (%) obtenidos de las figuras 14 a,b.

De los cálculos realizados se puede apreciar que este arreglo de transformadores cancelan en un 74% la 5ta, 7ma, 17ava y 19ava armónica al igual que otras armónicas presentes en el espectro de corriente, este efecto se ha obtenido sin incurrir en diseño de filtros para armónicas y análisis alguno de resonancia. La tercera armónica se cancela debido a la conexión delta, si se asume un sistema relativamente balanceado.

Como se menciona al analizar los diferentes tipos de cargas no lineales, en todo sistema de distribución existe la quinta y séptima armónica contenidas en diferentes niveles en el voltaje y corriente de alimentadores primarios, ya sean estas provenientes de clientes industriales, residenciales comerciales y de otro tipo, si se conjugan diferentes grupos de conexiones de transformadores de distribución desfasados 30 y 0 grados es posible una reducción de quintas y séptimas armónicas. Esto puede ser valido para instalaciones en edificios, industrias y transformadores que alimentan a los clientes de tipo residencial.

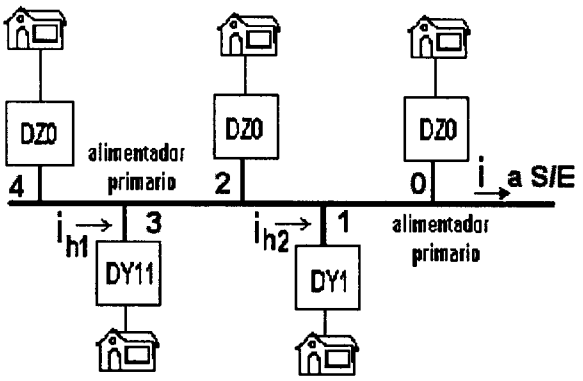

Figura 16. Alimentación a clientes de tipo residencial con transformadores de distribución con diferente grupo de conexión, para reducción de terceras, quintas y séptimas armónicas.

En base de la configuración mostrada en la figura 16 y parte del circuito de la figura 9 se realizo un flujo de carga asumiendo cargas no lineales con diferente ángulo armónico pero de igual THDi, los resultados se indican en la tabla 18.

Tabla 18. Datos correspondientes al análisis de cargas no lineales en un primario (ref. fig. 16)

TRAMOS Longitud Cada uno 1.5 Km.	THDi (%) Con trafos Alternados 30 Grds.	THDi (%) Trafos Convencionales	% Reducción ARMONICA
S/E - 0	9.3	8.8	0
0 - 1	5.5	6.3	12.7
1 - 2	4.2	10.8	61.11
2 - 3	0.8	11.9	93.28
3 - 4	11.9	11.9	0

Los resultados obtenidos en esta simulación indican que:

- El ángulo armónico de cada carga influye mucho en la reducción armónica global.
- En los tramos interiores se puede apreciar que si existe una reducción significativa del THDi.
- El principio de reducción en base de colocar transformadores de distribución desfasados 30 grados entre sí, efectivamente si surte efecto como se aprecia de los datos obtenidos en la simulación.

- El análisis matemático en base de las ecuaciones (16)-(21) es una buena referencia para mostrar el efecto de la reducción armónica de corriente en base de transformadores con grupos desfasados 30 grados, no obstante para un análisis a nivel de alimentadores primarios este principio no es muy exacto, ya que en este análisis intervienen otras variables las cuales pueden contribuir para que se de una reducción adicional en el THDi final.
- El hecho de obtener una reducción armónica en la corriente implica que las perdidas por efecto armónico en los cables del alimentador se reducen.
- La utilización de transformadores de distribución con cierto grupo de conexión abre una pauta para que se investiguen otros ángulos de defasaje con los cuales se pueda obtener iguales o mejores resultados en la reducción de armónicas.
- En la ecuación (3) X1rms es el aporte de la componente fundamental, si este factor se incrementa el THD obviamente disminuirá, es por esta razón que cuando se añaden cargas lineales al conjunto de cargas no lineales se obtiene una reducción adicional en el THDi, lo que implica una reducción en la distorsión armónica.

Discusión

Todo sistema de distribución en este país es de tipo convencional lo que implica que se hace necesario iniciar estudios sobre el efecto de las cargas no lineales. Las grandes ciudades son las más proclives a tener una influencia de los efectos nocivos producidos por cargas no lineales por lo que quizá se vean en la condición de establecer medidas de carácter correctivo, en cambio en ciudades en crecimiento estas medidas pueden ser de carácter preventivo las cuales involucran menores costos que las anteriores.
Si se hace una evaluación de las importaciones de equipos a nuestro país se puede apreciar que en su mayoría son cargas de tipo no lineal, pues como se menciono al inicio de este articulo, el ahorro de energía (energy saver) es la tendencia mundial en la fabricación de equipos y seguirá siendo a futuro, lo cual implica que todo aparato eléctrico poseerá controles electrónicos.

Un escasisimo numero de cámaras de transformación posee transformadores que tomen en cuenta el factor K o el grupo de conexión del transformador trifásico por lo que la recomendación que se hace en este articulo sobre la utilización de diferente tipo de grupo de conexión entre transformadores puede ser valiosa para la reducción armónica de la corriente en edificios nuevos e industrias

La proyección de alimentadores primarios debería ser muy bien planificada y analizada teniendo en cuenta el tipo de cliente que se va a alimentar, la longitud del mismo y por que no el grado de contaminación armónica esperada.

Luego de su construcción se debería monitorear anualmente y mantener una estadística de su crecimiento y variación de sus parámetros eléctricos dentro de los cuales también se involucren las variaciones pequeñas de voltaje (sags – swells), armónicas en el voltaje y corriente y además de los transitorios, todo cotejando con la época del año en la que se hacen las tomas.

La calidad de energía no solamente implica una atención comedida al cliente sino también en brindar un producto de buena calidad. El analizar el efecto de las armónicas sobre el sistema de distribución es solamente un ítem dentro de lo que involucra la calidad de energía por lo que es recomendable que se capacite a los todos los profesionales de la rama eléctrica en temas relativos a la calidad de energía, también crear dentro de las empresas eléctricas áreas de investigación sobre calidad de energía, para que con criterio suficiente se pueda contribuir a tener sistemas de distribución confiables, seguros, libres de disturbios eléctricos y para una apropiada adquisición de equipos de protección, potencia y medición compatibles con el nuevo entorno no lineal.

Referencias

[1] Grady W. Mack, Gilleskie J. Robert *Proceedings:Harmonics and how they relate to power factor.* EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA'93),San Diego, CA, November 1993.

[2] Rice E. David *Adjustable speed drive and power rectifier harmonics-their effect on power systems components.* IEEE Trans. Ind. Appl, Vol IA-22, N° 1, Jan/Feb 1986

[3] Gunther W. Erich, Sabin D. Daniel, Mehta Harshad *Proceedings: Update on EPRI distribucion power quality monitoring project.* EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA'93),San Diego, CA, November 1993.

[4] Ferguson G. N. *Power quality improvement in a harmonic environment* Power Smith Co. Power quality international 1998,www.powerquality.net

[5] Grady Mack *PCFLO Version 5.3 loadflow and harmonics analysis- user manual*, Department of Electrical & Computer Engineering, University of Texas at Austin, Austin TX 78712, May/1999.

[6] Salazar José A. *Influencia de las armónicas en las perdidas técnicas y sus repercusiones en la calidad del servicio* IV Seminario nacional de control de perdidas de energía, Ambato-Ecuador, Nov/1998.

[7] Emanuel A. E. Pileggi D.J. Gentile T.J *Distribution feeders with nonlinear loads in the northeast U.S.A. : part I – voltaje distortion forecast* IEEE. Trans. On Power Deliv. Vol 10, N°1, Jan/1995. Pag 340-347.

ANEXO

Datos utilizados para el análisis del circuito de la figura 9.
Potencia base 10 MVA.
Voltaje en alta subestación (A.V.): 138 KV
Voltaje en baja subestación (B.V.): 13.2 KV
Todos los datos en porcentaje a menos que se especifique la unidad correspondiente.

Línea de transmisión

R	X	Line Charging
0.04	0.25	65

Transformador subestación (S/E)
Datos en base 10 MVA
Conexión delta-Y aterrada – DY1
138/13.2 KV tap 0.95

R	X	Potencia
0.33	7	15 MVA

Datos del alimentador primario para 5 Km :

R	X	Line charging
1.13778	3.34809	0.010944

Transformador 1.5 MVA
Conexión YY-aterrada
13.2/ 4.1 KV

R	X	Potencia
3.67	33.33	1.5 MVA

Cargas:

Barra	P (%)	Q(%)
3	10	6.2

No lineal	MW	Dpf
	0.5	0.662
Onda de seis pulsos		
Armónica	Thdi(%) Individual	Angulo Armónico
1	100	-70.8
5	20.0	-173.9
7	14.3	44.5
11	9.1	-58.7
13	7.7	159.8
17	5.9	56.6
19	5.3	-85
23	4.3	171.9

Capacitor: 5.5 % equivalente a 0.55 MVAR en base 10 MVA

Filtro para Armónica	R(%)	Xl (%) Inductancia	Xc (%) capacitor
5	2.829	141.467	3.2
7	1.937	96.855	2.3

Datos utilizados para el análisis del alimentador primario con cargas no lineales ilustrado en la fig. 16.
Los datos de Línea de transmisión y S/E son los correspondientes a los de la figura 9.
Potencia base 10 MVA.

Transformadores de 150 KVA
Conexión DY-aterrada, DZ0-aterrada
Grupos con ang. desfase 30 grados.
13.2 KV / 220 V

R	X	Potencia
4	50	150 KVA

En el primario cada tramo con los siguientes datos en %. Longitud de cada tramo 1.5 Km.

R	X	Line charging
1.13778	3.34809	0.010944

Cargas no lineales

Barra Ref. punto	P (%)	Dpf
0	0.8	0.76
1	0.13	0.85
2	0.09	0.71
3	0.11	0.87
4	0.1	0.89

Espectros de carga no lineal en cada transformador

Barra referencia	**Armónica**	**THDi(%) Individual**	**Angulo armónico**
0 y 4	1	100	100
0 y 4	3	3.29	149.3
0 y 4	5	9.78	273.75
0 y 4	7	5.67	94.45
0 y 4	9	0.03	8.991
0 y 4	11	0.01	57.588
1	1	100	0
1	3	3.29	126
1	5	9.78	301
1	7	5.67	89
1	9	0.03	57
1	11	0.01	57.588
2	1	100	34
2	3	3.29	123
2	5	9.78	346
2	7	5.67	34
2	9	0.03	23
2	11	0.01	123
3	1	100	32
3	3	3.29	123
3	5	9.78	307
3	7	5.67	2
3	9	0.03	69
3	11	0.01	220