ARTICULO ORIGINAL

"Incidencias de Cargas No Lineales en Transformadores de Distribución"

"Incidences Nonlinear Load Distribution Transformer"

***Ruggero Ríos B, Sánchez Quintana ME**

Universidad del Cono Sur de las Américas (UCSA). Asunción, Paraguay

RESUMEN

Se explica que las cargas no lineales están asociadas al deterioro de los transformadores de distribución , basándonos en la recopilación de estudios previos en cuanto a las cargas no lineales, efectos de los armónicos y el principio de transformación, posibilitando entender así el por qué esta asociación causa un efecto contra producente en los transformadores de distribución, dilucidando así una de las incógnitas en el campo técnico del el cual es el incremento alarmante en averías de los transformadores de distribución, gran inconveniente que representa grandes pérdidas a las empresas encargadas del suministro eléctrico. Por medio de una prueba realizada en los laboratorios del instituto nacional de Tecnología Normalización y Metrología se logró afirmar dicha hipótesis.

Se sometió a un transformador eléctrico a los dos tipos de cargas, (lineales y no lineales) comparando los resultados se observa que el transformador sometido a cargas no lineales presenta un nivel muy considerable de pérdidas en comparación al mismo transformador sometido a cargas puramente lineales, siendo el incremento de la temperatura considerable y perjudicial para el mismo.

Palabras clave: cargas no lineales, cargas lineales, transformadores de distribución, armónicos.

ABSTRACT

Explained that non- linear loads are associated with deterioration of distribution transformers, based on the compilation of previous studies regarding the non-linear loads, effects of harmonics and the principle of transformation, enabling understand well why this association causes an effect counterproductive in distribution transformers and elucidating one of the unknowns in the technical field which is the alarming increase in breakdowns distribution transformers, great inconvenience of heavy losses to undertakings entrusted the power supply. By means of a test conducted in the laboratories of the National Institute of Technology Standardization and Metrology was achieved affirm this hypothesis.

Was subjected to an electric transformer to the two types of loads (linear and nonlinear) comparing the results shows that the transformer under

Autor Correspondiente: **Bruno Ruggero Ríos, Universidad del Cono Sur de las Américas (UCSA). Asunción, Paraguay*
E-mail: brunoruggero88@gmail.com
Fecha de recepción: setiembre 2014; Fecha de aceptación: noviembre 2014

non-linear loads has a considerable level of losses compared to the same transformer subjected to purely linear loads , being considerably increased and detrimental to the same temperature.

Keywords: Nonlinear loads, linear loads, distribution transformers, harmonic.

INTRODUCCIÓN

En estos últimos tiempos se ha observado un significante incremento de las averías en los transformadores de distribución, los tópicos y las exigencias para los cálculos a la hora de evaluar cuál es el transformador más apropiado para instalarse siguen manteniéndose (La carga declarada sumatoria de los usuarios, el factor de potencia, consumo de los servicios públicos de iluminación, perdidas en general, etc.). Ese comportamiento sin duda llamativo nos da a entender que ha ido apareciendo o se ha vuelto considerable un fenómeno que anteriormente no era considerable e incluso despreciable.

Como es de público conocimiento los aparatos con componentes electrónicos con el advenimiento de la tecnología y la inclusión en la cotidianidad de la sociedad ha incrementado en niveles exponenciales(televisores, computadoras, radios, luminarias con componentes electrónicas, etc.) sin ahondar en el porqué de su inclusión en la cotidianidad del ser humano da a lugar la posibilidad que este advenimiento de componentes electrónicos esté ligado a los efectos negativos que inciden en el deterioro de estas máquinas eléctricas. Cabe destacar que esta sospecha ya estaba presente en técnicos de vasta experiencia en el rubro desde hace un buen tiempo, lo cual nos ha brindado más argumentos para que se llevara a cabo un estudio técnico para el desarrollo de esta hipótesis.

Las funciones periódicas, que son sinusoidales pura, aparecen con frecuencia en las señales de entrada de las aplicaciones en ingeniería, en particular en ingeniería eléctrica ya que muchas fuentes eléctricas de importancia práctica, como son los rectificadores electrónicos, generan ondas periódicas no sinusoidales, las series de furrier proporcionan la herramienta ideal para analizar la respuesta en estado estacionario para señales periódicas de entrada, ya que nos permiten representar las señales como ondas infinitas de senoides.

Debido al carácter lineal del sistema, la respuesta en estado estacionario deseada puede determinarse como la suma de las respuestas individuales. Como la expansión en serie de furrier consistirá de senoides con frecuencias $n\omega$ que son múltiplos de la frecuencia ω de la señal de entrada, la respuesta en estado estacionario también tendrá componentes con tales frecuencias. Si alguna de las múltiples frecuencias $n\omega$ esta cerca en valor a la frecuencia natural oscilatoria del sistema, entonces resonará con el sistema y la componente con esa frecuencia dominara la respuesta en estado estacionario.

Una distinción significativa de interés práctica entre una señal de entrada periódica no senoidal y una senoidal es que a pesar de que la señal puede

tener una frecuencia considerablemente más baja que la frecuencia natural del sistema, pueden presentarse problemas serios debido a la resonancia. El análisis de las series de furrier ayuda a identificar tal posibilidad.

Cargas lineales y no lineales

Cuando se aplica un voltaje senoidal directamente a cargas tales como resistencias, inductancias, capacitores o una combinación de ellos, se produce una corriente proporcional que también es senoidal, por lo que se les denominan cargas lineales. (Téllez, 2000)

La curva característica corriente – voltaje de la carga define si es o no lineal su comportamiento y no se debe pensar que todos los equipos que tienen semiconductores por definición son no lineales. (Téllez, 2000)

Armónicos

Los Armónicos son voltaje o corrientes sinusoidales con frecuencia que son múltiplos enteros de la frecuencia nominal del sistema (denominada frecuencia fundamental, usualmente de 50 Hz o 60 Hz). Las ondas distorsionadas pueden ser descompuestas en una sumatoria de la frecuencia fundamental y los armónicos.

El orden el armónico, también referido como el rango del armónico, es la razón entre la frecuencia de un armónico fn y la frecuencia del fundamental (60 Hz).

$$n = \frac{f_n}{f_1}$$ (Por principio, la fundamental f_1 tiene rango 1).Ec. (1)

Los armónicos impares: son aquellos que se encuentran en las instalaciones eléctricas y edificios comerciales.

Los armónicos Pares: solo existen cuando se produce una asimetría en la señal debido a la componente continua. En general, son de escasa consideración en las instalaciones eléctricas industriales.

Las frecuencias de los armónicos que más problemas generan en el flujo de potencia, son aquellas que son múltiplos enteros de la fundamental como son: 100, 150, 200, 250 y 300 ciclos/segundos y las que siguen. Obsérvese que la frecuencia del sistema es la primera armónica.

Es más difícil detectar una armónica que no es múltiplo de la frecuencia fundamental, porque no altera la longitud de onda de la misma manera, esto significa que no se ve un cambio estable en el osciloscopio cuando se estudia la onda, sin embargo, una vez que se detecta es mucho más fácil identificar su origen (Sevilla, 2000) (Tabla 1).

Tabla 1. Orden frecuencia y secuencia de los armónicos.

Orden	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Frecuencia	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Corrientes Poliarmónicas

A cada sumando de esta serie infinita lo llamamos armónica , los valores $\sqrt{2}I_1$, $\sqrt{2}I_2$, $\sqrt{2}I_3$.....$\sqrt{2}I_n$ se entiende que los valores máximos de cada armónica, con I_1, I_2, I_3.....I_n los correspondientes valores eficaces de cada una de ellas. El valor I_0 Es la componente de corriente continua.

Queda así demostrado que una corriente periódica considerarse como la suma de una magnitud constante I_0 llamada componente de corriente continua, más una serie de corrientes sinusoidales puras llamadas armónicas. Es de hacer notar que la primera armónica o fundamental, tiene una pulsación ∞ igual a la de la onda periódica resultante (Igual Frecuencia y periodo). La segunda armónica tiene una pulsación doble 2∞, La tercera armónica tiene una pulsación 3∞, y así sucesivamente.

Veremos varios casos de corrientes poliarmónicas que se presentan en los circuitos comunes de la Electrónica y los Sistemas de Potencia. Por medio de la figura 6 mostramos el caso de una componente continua, más la primera armónica o fundamental(Sevilla, 2000) (Figura 1).

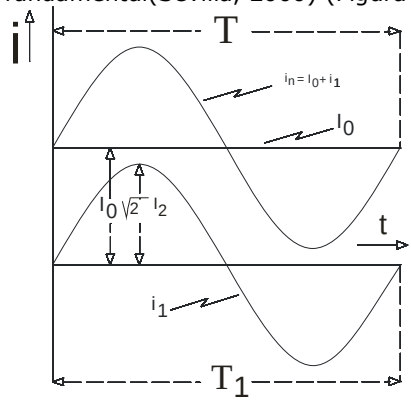

Figura 1. Corriente continua y primera armónica

La expresión analítica resulta ser:

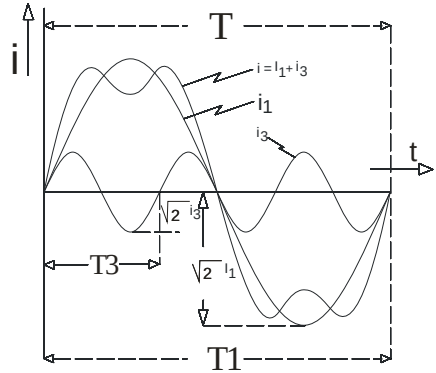

Figura 2. Primera y tercera armónica

La expresión analítica en este caso es:

$$i = i_1 + i_3 = \sqrt{2}\, I_1 \sin \omega t + \sqrt{2}\, I_3 \sin 3\omega t \qquad \text{Ec. (2)}$$

Obsérvese que los tres casos recién tratados, el periodo T de la onda periódica es igual al periodo de la primera armónica, situación que caracteriza a todas las funciones periódicas(Sevilla, 2000).

En las siguientes Ilustraciones agregaremos la quinta y posteriormente la séptima armónica, pudiendo observar como la onda poliarmónica tiende a modificar esa onda.

Las expresiones analíticas de éstas últimas son las siguientes (Figuras 3 y 4):

$$i = i_1 + i_3 + i_5 = \sqrt{2}\, I_1 \sin \omega t + \sqrt{2}\, I_3 \sin 3\omega t + \sqrt{2}\, I_5 \sin 5\omega t \qquad \text{Ec. (3)}$$

$$i = i_1 + i_3 + i_5 + i_7 = \sqrt{2}\, I_1 \sin \omega t + \sqrt{2}\, I_3 \sin 3\omega t + \sqrt{2}\, I_5 \sin 5\omega t + \sqrt{2}\, I_7 \sin 7\omega t \qquad \text{Ec. (4)}$$

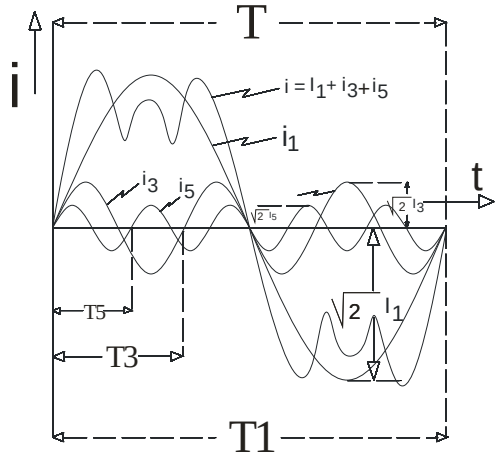

Figura 3. Primera, tercera y quinta armónica.

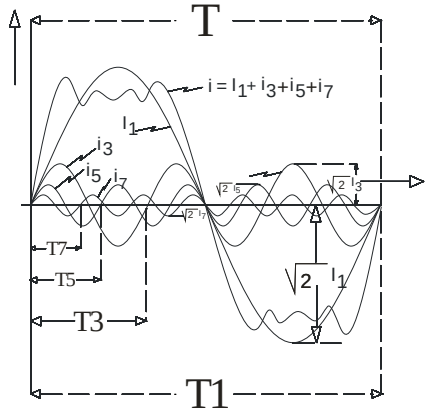

Figura 4. Primera, tercera, quinta y séptima armónica.

Origen de los armónicos

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal absorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo φ respecto a la tensión. Para simplificar se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red.

Las cargas armónicas no lineales más comunes son las que se encuentran en los receptores alimentados por electrónica de potencia tales como: variadores de velocidad, rectificadores, convertidores, etc. Otro tipo de cargas tales como: reactancias saturables, equipos de soldadura, hornos de arco, etc., también inyectan armónicos. El resto de las cargas tienen un comportamiento lineal y no generan armónicos: inductancias, resistencias y condensadores. (Schneider, 1998)

Existen dos categorías generadoras de armónicos. La primera es simplemente las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión. Como resultado de esto, cuando se aplica una onda sinusoidal de una sola frecuencia, la corriente resultante no es de una sola frecuencia. Transformadores, reguladores y otros equipos conectados al sistema pueden presentar un comportamiento de carga no lineal y ciertos tipos de bancos de transformadores multifase conectados en *estrella-estrella* con cargas desbalanceadas o con problemas en su puesta a tierra. Diodos, elementos semiconductores y transformadores que se saturan son ejemplos de equipos generadores de armónicos, estos elementos se encuentran en muchos aparatos eléctricos modernos. Invariablemente esta categoría de elementos generadores de armónicos, lo harán siempre que estén energizados con una tensión alterna. Estas son las fuentes originales de armónicos que se generan sobre el sistema de potencia.

El segundo tipo de elementos que pueden generar armónicos son aquellos que tienen una impedancia dependiente de la frecuencia. O sea, a una

determinada frecuencia pueden tener una impedancia constante pero su impedancia varía en función de la frecuencia, ejemplo 3 Ω a 60 ciclos, 5 Ω a 120 ciclos, etc., Filtros eléctricos y electrónicos, servomecanismos de motores, variadores de velocidad de motores tienen estas características. Estos tipos de elementos no generan armónicos si son energizados con una tensión de una sola frecuencia, sin embargo, si distorsionan la entrada, si existe más de una frecuencia y pueden alterar el contenido de armónicos. Estos elementos pueden mitigar o incrementar el problema del contenido de armónicos. Las dos categorías de equipos generadores de armónicos, pueden originar una interacción compleja en la cual la energía de los armónicos es transformada o multiplicada de una frecuencia a otra.

Los usuarios residenciales, comerciales e industriales, tienen una gran cantidad de equipos como hornos de microondas, computadoras, sistemas con control robótico, televisión, VCR, estéreos y otros equipos. Todos estos equipos contribuyen con la generación de cantidades variables de armónicos. Aún ventiladores eléctricos y simples motores de inducción trabajando sobrecargados pueden contribuir a la creación de armónicos. Las salidas de armónicos de estos múltiples aparatos pueden sumarse y originar problemas en el sistema de potencia.

Los sistemas de iluminación del tipo lámparas de descarga o lámparas fluorescentes son generadores de armónicos de corriente. Una tasa del 25 % del tercer armónico es observada en ciertos casos. La tasa individual del armónico 3ro puede incluso sobrepasar el 100 % para ciertas lámparas fluocompactadas modernas, y por tanto hay que prestar una atención especial en el cálculo de la sección y la protección del neutro, ya que este conduce la suma de las corrientes de tercera armónica de las tres fases, por lo que puede ser sometido a peligrosos sobrecalentamientos si no es seleccionado adecuadamente.

Distorsión armónica (harmonicdistortion)

Representación cuantitativa de la distorsión a partir de una forma de onda sinusoidal pura. La distorsión armónica es debida a cargas no lineales, o a cargas en las que la forma de onda de la corriente no conforma a la forma de onda del voltaje de alimentación (Bilbao, 1989) (Figura 5).

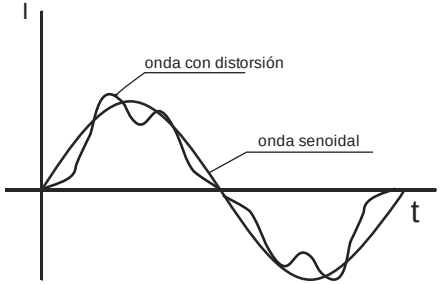

Figura 5. Forma de onda con distorsión

Índice de distorsión armónica

El método más usado para medir la distorsión armónica en un sistema de potencia es la distorsión total armónica (THD), este puede ser calculado por la corriente o para la tensión, dependiendo de dónde se quiera medir la distorsión. Hay al menos otros dos índices usados en el análisis armónico, generalmente aplicables a circunstancias especiales. Esto incluye el factor de influencia telefónica, que compara el contenido armónico en relación al sistema telefónico, el otro índice es el factor K que es útil para estimar el impacto de las armónicas en las pérdidas eléctricas. Sin embargo, en la mayoría de los casos donde las armónicas son estudiadas en un sistema de potencia para identificar su fuente o diseñar como deshacerse de ellas, el índice de distorsión más apropiada es el THD, medido por separado para la tensión y para la corriente.

Distorsión armónica total (Total Harmonic Distorsion<THD>).

Término de uso común para definir el factor de distorsión del voltaje o de la corriente. Se calcula como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores RMS de los voltajes armónicos o de las corrientes armónicas, dividida por el valor RMS del voltaje o de la corriente fundamental:

$$TDH = \sqrt{\frac{suma\ de\ los\ cuadrados\ de\ las\ amplitudes\ de\ todas\ las\ armónicas}{cuadrado\ de\ la\ amplitud\ de\ la\ componente\ fundamental}} \cdot 100\%$$

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} M^2{}_h}}{M_1} \cdot 100\% \quad \text{Ec. (5)}$$

MATERIALES Y MÉTODOS

Analizamos el fenómeno de las cargas no lineales en un transformador de prueba, la investigación se basó en mediciones de análisis laboratoriales cuyos parámetros son tomados para la realización de estudios y cálculos de esta naturaleza teniendo como referencia La norma IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std. 519-1992). Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 1 55937-239-7. Estados Unidos, 1993.

Para realizar este estudio recorrimos a distintas fábricas nacionales e instituciones públicas, específicamente a la Administración Nacional de electricidad (ANDE), laboratorios de electricidad: Universidad Nacional de Asunción (UNA) y del Instituto Nacional de Tecnología y Normalización (INTN), con el fin de obtener algunos datos referentes a los parámetros de índice de cargas no lineales que puedan detallar este fenómeno.

Una vez ya compuesta la informaciones y teniendo claro los procedimientos a realizar para poder comprobar nuestra tesis, nos dirigimos al Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología, quienes nos proveyeron los medios y equipos necesarios para poder ejecutar nuestro ensayo. Primeramente necesitábamos un transformador de capacidad mucho menor que los equipos de distribución, por lo cual

debimos mandar a construir uno con los mismos principios de estos, pero de mucho menor potencia.

Los instrumentos de laboratorios utilizados para estas pruebas fueron elementos de precisión, que son utilizados por el INTN para sus ensayos.

A continuación Detallaremos los instrumentos de medición utilizados:

- Para observar el comportamiento de las ondas se utiliza el osciloscopio Fluke 123 industrial scopemeter
- La calidad de energía eléctrica fue medida con el analizador de red Fluke 43 para observar los índices de distorsión armónica.
- Los datos de temperatura fueron obtenidos con la pistola laser de punto de calor el cual se utilizó para medir el incremento de la temperatura en el transcurso del tiempo en la carcasa del transformador sometido a pruebas.

Para las cargas lineales fueron utilizados lámparas puramente resistivas de 220v 50hz 200W y para las cargas con componentes no lineales decidimos utilizar cargas que comúnmente son partes del consumo diario residencial y/o comercial, ya sea las lámparas compactas de bajo consumo, los tubos fluorescentes con balastros electrónicos y equipos informáticos todos ellos para una tensión de 220v y 50hz.

La intención de la prueba es comprobar que las cargas con componentes armónicas causan más perdidas en los trasformadores. Procedimos a montar un tablero de pruebas que nos permitiría comparar las cargas lineales y no lineales, también se procedió a obtener fotografías de los equipos utilizados, del tablero de prueba y de los distintos tipos de ensayos que íbamos realizando. Optamos por tomar como método el sometimiento de las cargas por un tiempo definido y la toma de datos al equipo. Esta consistió principalmente en dos pruebas, con igual cantidad de carga, misma temperatura de ambiente y mismo tiempo. En las condiciones preestablecidas fuimos desarrollando este trabajo.)

Se utilizó para la prueba un transformador monofásico tipo seco, optamos por tomar como método el sometimiento de las cargas por un tiempo definido, entiéndase por un lapso de cada una hora y la recolección de datos de tipos de ondas y temperatura del equipo. Esta consistió principalmente en dos pruebas, con igual cantidad de carga, una lineal y otra no lineal, misma temperatura de ambiente y mismo tiempo que consistió en un total de cuatro horas.

Diseño básico

Las principales características del transformador adoptado como base se indican en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2. Características del transformador

Características Generales		
Descripción		U.M.
Potencia	1.2	kVA
Tensión nominal primario	220	V
Frecuencia	50	Hz
Tensión nominal secundario	220	V
Bobinado de TR.		
Material	Cobre	---
Corriente nominal	4,59	A
Sección del conductor	0,512	mm²

Para medir la temperatura del transformador, hemos elegido distintos puntos del mismo, tal como se sugiere en la figura y señalizado con flechas rojas. A fin de obtener las variaciones de temperaturas en diversos puntos del transformador, y partir de ahora en adelante lo denominaremos de la siguiente manera (Figura 6).

X1: para el lado lateral de núcleo.
X2: para el centro superior del núcleo.
X3: para el bobinado primario.
X4: para el bobinado secundario.

Figura 6. Puntos del transformador

El tablero de prueba está representado como muestra en la figura 30. La tensión de muestra será de 220V y la carga para ambos ensayos tanto lineal como no lineal será de 500W (Figura 7).

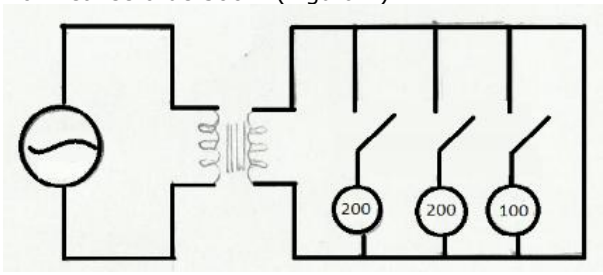

Figura 7. Esquema eléctrico del tablero de prueba

Prueba con carga lineal

Transformador en vacío, se observa en la gráfica de una sinusoide sin deformación apreciable en el osciloscopio.

Se obtiene el análisis de la forma de onda de excitación de corriente que contiene una pequeña cantidad de componente de corriente continua y sobre todo la frecuencia fundamental (50 Hz). El THD medida es de sólo 0,08 por ciento, lo que muestra que la corriente es casi sinusoidal pura.

Al iniciar la prueba, la temperatura de ambiente inicial es de 27° C, recomendada para pruebas de este tipo. Se precisó para esta prueba que las cargas sean resistivas, como se muestran en la figura 32 de tal forma a obtener ondas sinusoidales sin contenido armónico considerable, para tener un cuadro de comparación posteriormente.

La temperatura del transformador sin carga fue de:

Tabla 3. Temperatura en los puntos
Temperatura Promedio: 20,3º

Temperatura S/C	
X1	**20,3°** C
X2	**20,1°** C
X3	**20,3°** C
X4	**20,5°** C

Figura 8. Transformador de prueba.

Tabla 4. Valores de Temperatura

	CARGA LINEAL					
	X1	**X2**	**X3**	**X4**	**Promedio**	**Tiempo**
T0	20,3° C	20,1° C	20,3° C	20,5° C	**20,3°** C	
T1	45,1° C	43,9° C	49,5° C	53,8° C	**48,1°** C	
T2	61° C	58,6° C	58,6° C	68,3° C	**61,6°** C	
T3	66,6° C	64,2° C	60,8° C	70,8° C	**65,6°** C	
T4	70,3° C	67,6° C	67,1° C	72,6° C	**69,4°** C	
	Temperatura					

Obtenemos un incremento promedio de 49,1º C desde el inicio de la prueba, recordemos que esta tuvo una duración de 4(cuatro) horas.

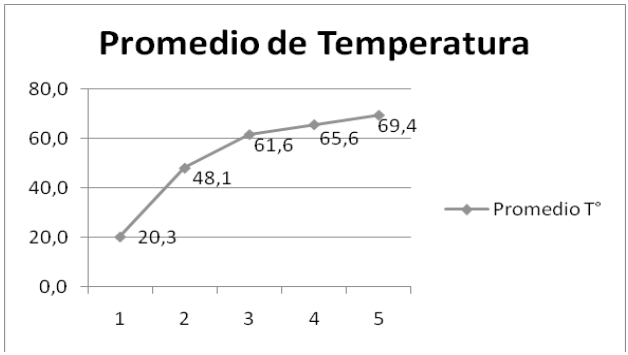

Figura 9. Gráfico de temperatura promedio con carga no lineal aplicado al transformador de prueba.

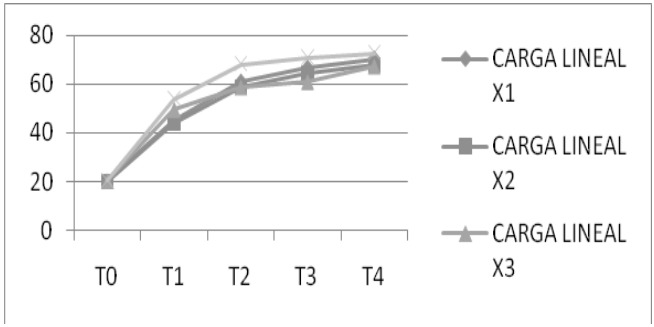

Figura 10. Gráfico de temperatura de los distintos puntos recolectado al transformador de prueba con carga no lineal aplicada.

Como podemos apreciar, se obtuvo un incremento de más o menos 50° C desde el inicio de la prueba. A continuación utilizaremos la misma metodología aplicada en este ensayo con carga no sinusoidal para realizar un cuadro comparativo del comportamiento entre las cargas.

Prueba con carga no lineal

Se supuso que el transformador estará sometido a la carga resultante de un grupo de equipos de utilización residencial y/o comercial, definido con una combinación de 40% de cargas lineales y 60% de cargas no lineales típicas (UPS, rectificadores, lámparas de bajo consumo, tubos fluorescentes con balastros electrónicos, etc.) Ver figura 33. Como ya lo habíamos mencionado la prueba consistió en la misma carga de 500 W y una corriente de 2.24 A; con el THD siendo igual al 11.05%.

La forma de onda representa el flujo mutuo del modelo de transformador con núcleo saturado. Dado que el voltaje es sinusoidal a 220V el flujo también es sinusoidal, y que llega a distorsionar a valores más altos de tensión de alimentación.

Con la inyección de carga no sinusoidal en la onda de corriente de excitación se producen más picos y la amplitud máxima es de 15 [mA]. El actual también se desvía de la forma de onda sinusoidal que se asemeja a la saturación del núcleo.

El análisis de la forma de onda del f representa la inyección de tercera componente armónica debido a la tensión de alimentación no sinusoidal y la saturación del núcleo. El THD en el Fluke es 11,05%

Como en la prueba anterior, la temperatura de ambiente inicial fue de 27° C.

La temperatura del transformador sin carga fue de:

Tabla 4. Temperatura en los puntos
Temperatura promedio: 19,2ºC

Temperatura S/C	
X1	19,4° C
X2	18,8° C
X3	19,4° C
X4	19,2° C

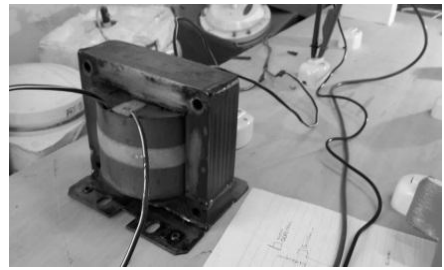

Figura 10. Transformador de prueba

Tabla 5. Valores de Temperatura

	CARGA NO LINEAL					
	X1	**X2**	**X3**	**X4**	**Promedio**	**Tiempo**
T0	19,4° C	18,8° C	19,4° C	19,2° C	**19,2**° C	
T1	52,9° C	51,8° C	59,9° C	66,3° C	**57,7**° C	
T2	66,8° C	65,2° C	67,5° C	78,2° C	**69,4**° C	
T3	74,9° C	74,1° C	76,1° C	85,4° C	**77,6**° C	
T4	77,8° C	72,1° C	78,7° C	86,8° C	**78,9**° C	
	Temperatura					

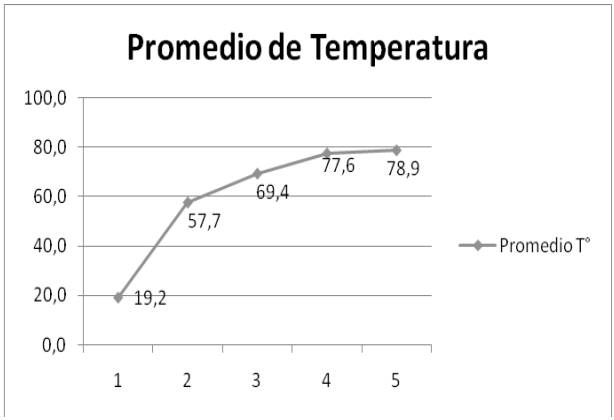

Figura 11. Gráfico de temperatura promedio con carga no lineal aplicado al transformador de prueba.-

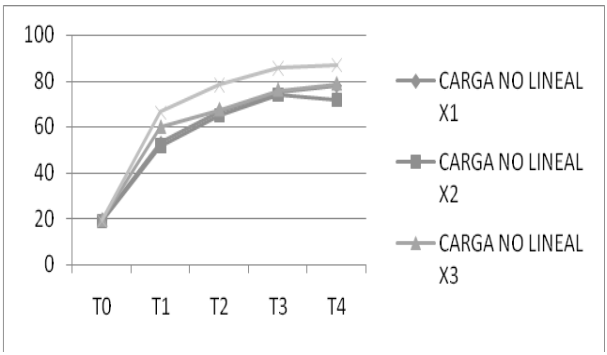

Figura 12. Gráfico de temperatura de los distintos puntos recolectado al transformador de prueba con carga no lineal aplicada

Al concluir el ensayo apreciamos el notable incremento de temperatura de más o menos 60°C con este tipo de carga desde el inicio de la prueba, aproximadamente 10° C más que con cargas lineales. A seguir se muestra un tabla comparativa del promedio de temperatura entre los dos tipos de cargas.

Tabla 5. Valores comparativos de temperatura

	Carga lineal	Carga No Lineal	
T0	20,3° C	19,2° C	**Tiempo en horas**
T1	48,1° C	57,7° C	
T2	61,6° C	69,4° C	
T3	65,6° C	77,6° C	
T4	69,4° C	78,9° C	
	Temperatura		

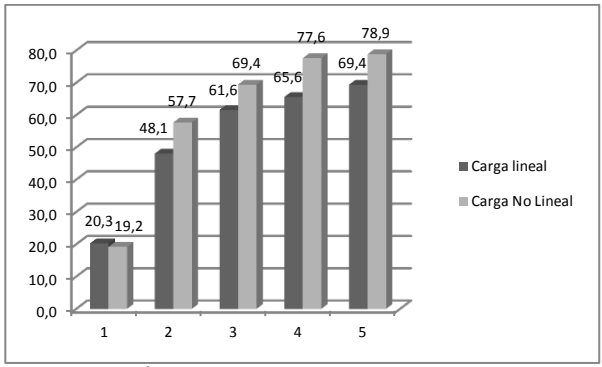

Figura 11. Gráfico comparativo de temperatura promedio con carga lineal y no lineal aplicado al transformador de prueba.

Como era de esperarse el punto más caliente (hot spot) y de mayor densidad de pérdidas son los extremos del bobinado, según la tabla 11(Once), en el lado primario 'X3' se obtuvo un aumento de 12° C, mientras que en el lado secundario que lo habíamos denominado anteriormente como 'X4' se obtuvo un aumento de 9,5° C más que con carga lineal.

La prueba deja en evidencia que las cargas no lineales si inciden negativamente en el transformador, ya que elevan significativamente la temperatura en relación a las cargas lineales, demostrando así que existen más perdidas.

Esto contribuye negativamente al transformador de varias maneras, la más notable y lógico es que elevándose la temperatura y a potencias que en teoría el transformador debería funcionar correctamente esto acelera el proceso de deterioro que con cargas lineales esta tal vez tenga más tiempo de vida útil. Además que en condiciones más delicadas en donde el transformador sometido a cargas tradicionales trabaje casi en su límite, pero con el aumento de pérdidas al trabajar con cargas no lineales esta lleva a la reducción de la capacidad de operación del mismo; debido a eso muchas veces no existe una explicación convencional del por qué un transformador que en teoría está trabajando dentro de sus límites sufra averías no esperadas y desconcertantes.

Otro punto negativo es que al aumentar las pérdidas en el núcleo esta lleva al estado de saturación del mismo y hace trabajar en la parte no lineal de la curva de magnetización, produciendo así que el transformador entregue ondas no sinusoidales y por consecuencia la calidad de la energía decae.

La explicación racional según el estudio realizado en este trabajo es que por el transformador realmente su potencia no varía, esté equipo por más que transforme los parámetros de voltaje no deja de ser más que un conductor, con todas sus vulnerabilidades, así que si hay mayor tráfico de cargas debido a la no linealidad del sistema que hace descender tanto el voltaje como perturbando las formas de onda y variando la frecuencia

también dicha variación en la frecuencia genera pérdidas, ya que a mayor frecuencias las cargas tienden a transportarse más hacia el extremo del conductor (efecto pelicular) disminuyendo la superficie de conducción. Tenemos factores que contribuyen a las perdidas en el transformador, tanto en sus devanados como en el núcleo mismo.

Una pequeña variación en el voltaje, y en la frecuencia, ya incide en el transformador, las cargas no lineales varían la frecuencia. Al modificarse estos dos parámetros ya varían tanto la cantidad de cargas que circulan por el transformador como así también en la sección del conductor, como se dijo anteriormente, mantener los parámetros con los cual el transformador fue preparado y construido para manejar resulta vital para esto , es entonces que se debería tener muy en cuenta la calidad de la energía y entender que a medida que los componentes de las cargas vayan variando estas incidirán de manera particular para caso y siempre se debe mantener un estudio para saber cómo convivir con ellas al menos si continua el sistema manejando la misma estructura.

Hay que entender que el porcentaje es la clave para medir el impacto final de los efectos dañinos en el sistema, el equilibrio del sistema depende la robustez del mismo, si nuestra porción de energía contaminada es muy pequeña en relación al tamaño del sistema el mismo poco o nada se vería afectado y el sistema seguiría manteniendo sus parámetros casi intactos. Pero a medida que este porcentaje aumente, este equilibrio se estaría poniendo en riesgo por tanto la frecuencia y el voltaje estarían sufriendo cambios y estarían alimentando las cargas con parámetros a los cuales los transformadores no fueron construidos.

La no linealidad de la carga repercute a la onda que alimenta nuestras maquinas eléctricas sobre todo en la fuerza que mueve a los electrones portadores de carga, si tuviéramos una carga alimentada directamente por un generador este respondería a ese momento pero como eso no ocurre en nuestro sistema ya que la generación se encuentra alejada de nuestro consumo y en nieles de voltajes muy distinto al que utiliza el consumidor. Los transformadores son los que posibilitan que el fluido eléctrico llegue a nivel de voltaje que estos son requeridos por el sistema.

Mientras más bajo sea el voltaje a una potencia fija, la corriente debe ser mayor, este efecto podría ser nocivo para la instalación y los aparatos que son alimentados por corriente eléctrica, porque una mayor cantidad de electrones portadores de carga significa un mayor tráfico de cargas circulando por el mismo conductor, conductor que sus cálculos se basan en la corriente que circula por ella, por ende tendremos más perdidas que se transforma en energía calórica.

Los valores alterados causan un mayor tráfico de cargas por el transformador generando mayores pérdidas y sobrecalentamientos, que dependiendo de que el transformador este trabajando al límite de capacidad o no esto pudiese llevar a averías o en otro caso reduciendo la vida útil prevista del equipo.

CONCLUSION

Por todo lo expuesto durante el desarrollo de este estudio se concluyó que aunque los transformadores sean dimensionados correctamente para su operación, cuando estos alimentan un elevado índice de cargas no lineales evidencian un incremento notable en sus pérdidas, tanto en las de núcleo como en las de cobre.

En los transformadores existen pérdidas suplementarias debido al efecto pelicular, el cual provoca un incremento de la resistencia del conductor con la frecuencia, también habrá un incremento de las pérdidas por histéresis y las corrientes de Eddy o Foucault.

También se toma como conclusión que corrientes armónicas de frecuencias más altas provocan pérdidas en el núcleo incrementadas en proporción al cuadrado de la corriente de carga y en proporción al cuadrado de frecuencia debido al efecto pelicular.

El incremento en las pérdidas de cobre se debe a la circulación de corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa transportadas en los conductores de fase provenientes de cargas generadoras de armónicos monofásicas y trifásicas, y a la circulación de las corrientes armónicas triples de secuencia cero que son transportadas en los conductores neutros desde las cargas monolineales generadoras de armónicos.

En síntesis, al término de este trabajo pudimos afirmar nuestras predicciones y las de los profesionales, afirmando que las cargas no lineales si influyen negativamente en la vida útil del transformador, así también en su rendimiento, y en la calidad de transformación alterando de igual manera el suministro eficiente del servicio eléctrico generando cuantiosos daños económicos e interrupciones del servicio.

Se recomienda mejorar el diseño del transformador, incorporando este fenómeno en el dimensionamiento de los mismos, por lo tanto se pueden adoptar las siguientes sugerencias:

- Utilizar subconductores de menor altura. Al respecto, pueden emplearse conductores conformados por sub-conductores continuamente transpuestos.
- Reducir la componente radial del campo de dispersión; por ejemplo procurando que la distribución axial de corrientes de los arrollamientos de MT y de BT resulten compensadas en toda su extensión, evitando bobinas de distinta altura.
- Es recomendable utilizar una mayor cantidad de subconductores en sentido axial, de forma que la altura de subconductor sea notablemente menor a la actual, por ejemplo, 4mm, que es aproximadamente la profundidad de penetración para el 7º armónico. Asimismo sería aconsejable también aumentar levemente la cantidad de sub-conductores en dirección radial, para controlar la sobretemperatura media.

La comprobación de la efectividad de estos cambios de diseño puede efectuarse satisfactoriamente aplicando la metodología expuesta en el presente trabajo. Es de destacar que los cambios recomendados no implican un aumento de la masa de conductor, según estimaciones, podría reducirse al 5%, contra el 36% original, resultando un evidente beneficio económico.

Escudos electrostáticos de tierra se especifica frecuentemente entre los devanados primario y secundario. La presencia de blindajes electrostáticos de tierra tiende a reducir el acoplamiento capacitivo entre los devanados. Esto reduce el acoplamiento de transitorios entre los dos devanados. Las perturbaciones generadas en la línea se reducen por el equipo convertidor conectado al secundario del transformador, pero no serán eliminados en el lado primario del transformador. Los escudos no están destinados a reducir las corrientes armónicas, pero en virtud de su acoplamiento magnético para devanados que transportan corrientes tales, las pérdidas de calentamiento adicionales se inducen. Los escudos sólo tienen un pequeño efecto sobre las corrientes armónicas. Filtrado de armónicos de corriente es necesaria para obtener una reducción significativa en el contenido de la corriente armónica. Dado que los escudos están en el campo magnético de alta entre los devanados primario y secundario, se producen pérdidas por corrientes parásitas en el escudo que se aumentan por las corrientes armónicas sólo como el bobinado pérdidas por corrientes parásitas aumentan por las corrientes armónicas. Es importante que los escudos estén diseñados de manera que las pérdidas parásitas en los escudos producidos por el contenido de armónicos de corriente no dan lugar a un aumento excesivo de temperatura en el escudo.

Los blindajes electrostáticos también sirven como protección para el lado secundario del transformador de transitorios que pueden ser impresos sobre el devanado de alta tensión. Esto es especialmente importante para los transformadores con los secundarios conectados a tierra. Los transitorios en el lado de alta tensión de un transformador pueden aumentar drásticamente la tensión de pico visto que en el devanado secundario sin toma de tierra de lo que puede haber sido esperado para un devanado conectado a tierra. Esto puede dañar devanados del transformador y las partes o el equipo conectado en el lado secundario del transformador. La presencia de un escudo de tierra electrostática entre los devanados primario y secundario reduce la magnitud del transitorio acoplado a los arrollamientos secundarios.

Se recomienda el uso de materiales no magnéticos en lugar de acero dulce, la ruptura de vías de circulación de corriente posibles, y el uso de materiales de blindaje en el núcleo deben ser considerados como medios para reducir los efectos de la corriente de calentamiento armónico en piezas estructurales.

Se prefiere que el espectro armónico a la que se somete el transformador se comunicará al fabricante del transformador en el momento de la cita. Un análisis exacto para el dimensionamiento adecuado del transformador sólo se puede realizar mediante la evaluación del espectro armónico específico. El espectro armónico suministrado debe ser identificado en cuanto a si se mide en el lado primario o secundario del transformador. Si el espectro

armónico se proporciona en por unidad de forma, entonces la fundamental, debe ser definida a la frecuencia nominal del transformador especificado. Si el espectro no puede ser suministrado, a continuación, el cálculo del usuario o estimación de FHL debe ser especificado. Sin embargo, el transformador debe ser sobredimensionado por el usuario para compensar la falta de información sobre la carga específica. El ingeniero debe suministrar esta información de carga, ya que el fabricante del transformador no puede asumir valores sin un conocimiento real del sistema al que se aplica el transformador. (IEEE, 2008)

Otra opción será la de sobredimensionar ligeramente la capacidad del transformador de acuerdo al proyecto, si se tiene conocimiento que la instalación eléctrica a presentarse tendrá un elevado contenido armónico. (Incidencias de cargas no lineales en transformadores de distribución, Sánchez – Ruggero, 2013)

Recomendaciones para estudios posteriores:

- Investigación de los efectos de las cargas no lineales en transformadores de medición (TP - TC) con cargas electrónicas (medidores; relés electrónicos; etc.)
- Se recomienda estudiar el comportamiento de armónicos en la medición de la energía eléctrica suministrada a los usuarios.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Hernández, Sampieri, R. (2005). *Fundamentos de metodología de la investigación*. México: Editorial Mc. Graw-Hill Interamericana.

IEEE Std C57. (2008). 110 IEEE *Recommended Practice for Establishing Transformer Capability W*hen *Supplying Nonsinusoidal Load Currents*.

IEEE. (1993). *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems* (IEEE Std. 519-1992). Estados Unidos: Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 1 55937-239-7.

Arriola, F.J. (1989). *Perturbaciones más habituales en un sistema eléctrico*, Bilbao España: Jornada sobre perturbaciones eléctricas, Análisis y prevención.

Sevilla, M.A. (2001), Corrientes en circuitos monofásicas y trifásicas para sistemas de Energía y Electrónicas. Argentina.

Téllez, Ramírez, E. (2000). Automatización, Productividad y calidad, México: Programa de Distorsión Armónica.