



TRABAJO TEÓRICO EXPERIMENTAL

Efectos de los armónicos de corriente en las pérdidas de transformadores de distribución monofásicos

Effects of Current harmonics on the distribution single-phase transformers losses

Jorge Enrique Carrión González¹, Antonio A. Martínez García², Alfredo del Castillo Serpa², Orestes Hernández Areu², Marianela del Cisne Carrión González¹

¹Profesor de la Universidad Nacional de Loja-Ecuador.

²Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, Cujae, Cuba.

E-mail: jorgecarriong@yahoo.com/jorge.carrion.g@unl.edu.ec

Recibido: septiembre del 2018

Aprobado: enero del 2019

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional.



RESUMEN/ABSTRACT

El uso de dispositivos basados en electrónica de potencia, los cuales son fuentes de distorsión armónica, conducen a las redes eléctricas a convertirse en receptores de estas tensiones y/o corrientes no-sinusoidales. Entre los equipos que han sufrido un impacto considerable debido a corrientes distorsionadas están los transformadores de distribución cuyo rendimiento está estrechamente relacionado con el tipo de carga a la que suministra energía, generándose incrementos de pérdidas de transformación cuando se trata de cargas no-lineales. La distorsión de la corriente en la carga produce un calentamiento adicional del transformador y disminuye su capacidad nominal, incrementado la pérdida de vida útil del transformador. En este estudio se realiza una evaluación del impacto que generan los armónicos de corriente en los transformadores de distribución monofásicos, utilizando como caso de estudio un transformador monofásico de 25 KVA cuya composición armónica de la corriente es conocida.

Palabras clave: Transformadores de distribución, Armónicos de corriente, Pérdidas por transformación, Redes eléctricas.

The use of devices based on power electronics, which are sources of harmonic distortion, lead to electric networks to become receivers of non-sinusoidal voltages and/or currents. Among the equipment that has suffered a considerable impact due to distorted currents are the distribution transformers whose performance is strongly related to the type of load to which it supplies energy. It has been shown that the losses increase in the transformers when they work with non-linear loads. In addition, the distortion of the current in the load causes an additional heating of the transformer, decreases its nominal capacity and reduces its service life. In this study, an evaluation of the impact generated by current harmonics in single-phase distribution transformers is carried out. A 25 KVA, single-phase transformer whose initial harmonic composition is known has been taken as a case study.

Keywords: Distribution Transformers, Current Harmonics, Losses by transformation, Electrical networks.

INTRODUCCIÓN

La influencia de los armónicos de corriente en los transformadores de distribución se analiza constantemente por el efecto que estos causan.

En [1], se considera que antes de aplicar factores de "derrateo", en transformadores sometidos a corrientes distorsionadas, es mejor determinar la verdadera capacidad a que queda reducido el transformador, calculando el incremento de sus pérdidas y determinando las temperaturas que alcanzará en el aceite y en el punto más caliente del enrollado para las condiciones de tensión y carga a que está expuesto. De esta forma, se puede predecir si el equipo podrá o no soportar el régimen de trabajo a que estará sometido sin pérdida de vida útil. En [2], se utiliza el estándar IEEE C57.110™-2008, para la determinación de las condiciones óptimas de operación de transformadores sometidos a corrientes no sinusoidales. Se analizan los principales efectos de la distorsión armónica sobre los componentes internos del transformador, así como las variaciones en el comportamiento del flujo magnético, clases y tipos de pérdidas, al igual que las recomendaciones prácticas para la evaluación del máximo valor eficaz de corriente de carga no sinusoidal, tanto para transformadores tipo seco como inmersos en líquido.

Con estos valores de carga estimados se logra proteger al transformador, asegurando que las pérdidas más altas no superen el valor de las pérdidas para las cuales fue diseñado, evitando de esta forma, los efectos de fenómenos ocasionados por la presencia de corrientes no sinusoidales, llegando a la conclusión que las corrientes no sinusoidales producen calentamientos adicionales en los transformadores debido al incremento de las pérdidas, debidas a las corrientes parásitas. En [3], se recomienda que cuando se utilicen transformadores existentes para alimentar cargas no lineales, estos deben ser desclasificados de una forma adecuada a su construcción, los autores mencionan que una de las causas de fallas en los transformadores de distribución sumergidos en aceite es el incremento de su temperatura interna, que acelera el envejecimiento de su aislamiento. Como criterio para determinar su envejecimiento se considera el incremento de la temperatura de su punto más caliente cuando se encuentra por encima de los 110° C, este incremento y su influencia se pueden observar en el comportamiento térmico del transformador, el cual refleja una relación entre la temperatura diaria en su punto más caliente [4,5], que tradicionalmente ha sido modelada en función de la variación de la temperatura ambiente [6] y de la carga en un ciclo de trabajo.

Para las empresas del sector eléctrico, la presencia de armónicas en los transformadores provoca un incremento de las pérdidas técnicas, que se ven reflejadas en los costos operacionales del sistema [7-9]. Tradicionalmente la capacidad de diseño del transformador, que es función de su aislamiento térmico, ha sido seleccionada considerando sólo la temperatura ambiente, las variaciones de carga y los tipos de materiales utilizados para su construcción [6,10]. En [10], se propone un modelo para predecir la temperatura del punto más caliente del transformador, considerando un ciclo de carga y temperatura ambiente variable, lo que permite aproximarse a su comportamiento real en un período de tiempo. Adicionalmente se analizan los efectos de las armónicas en su vida útil, utilizando las recomendaciones establecidas en las normas ANSI/IEEE C57.91-1995 [11] y ANSI/IEEE C57.110-1998 [12], se concluye que los transformadores pueden trabajar bajo condiciones de sobrecarga por cortos periodos de tiempo.

Similares conclusiones obtienen los autores en [13], sin embargo, ambos autores sólo relacionan los efectos de las corrientes armónicas, sin considerar el efecto de la tensión. En [14], señalan que los efectos causados por los armónicos en los transformadores pueden ser pérdidas con carga, sin carga o pérdidas de núcleo, cuando el transformador esté operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la ambiente especificada, el transformador deberá disipar sin mayor dificultad el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni disminuir su vida útil. Las pérdidas en los transformadores también pueden ser pérdidas por corrientes de Eddy y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores, u otras partes de hierro. Las pérdidas sin carga o de núcleo son producidas por la tensión de excitación en el núcleo. La forma de onda de tensión en el primario es considerada sinusoidal independientemente de la corriente de carga por lo que no se considera que aumentan para corrientes de carga no sinusoidales. Si la corriente de carga tiene armónicas, las pérdidas por transformación también pueden aumentar por el efecto piel, las pérdidas por corrientes de Eddy son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia por lo que pueden ocasionar un incremento de pérdidas en los devanados los cuales conducen corrientes de carga no sinusoidales, lo que provoca un aumento en su temperatura [15].

En [12,16], mencionan que las pérdidas adicionales son por corrientes parásitas debido al flujo electromagnético extraviado en el devanado, núcleo, abrazadera del núcleo, campo magnético, pared del tanque y otras partes estructurales del transformador. Las pérdidas extraviadas del devanado incluyen pérdidas aisladas de Eddy en los conductores del devanado y pérdidas debido a la circulación de corrientes entre circuitos devanados paralelos o aislados. Se puede añadir a estas pérdidas, algunas cargas no lineales las cuales tienen una componente de corriente directa, si se presenta este caso en particular esta componente aumentará el ruido en el transformador, por lo que este tipo de cargas se debe evitar. En [17,19], los autores mencionan que en el caso de transformadores conectados en delta -estrella que suministran cargas no lineales monofásicas como pueden ser fuentes reguladas por conmutación, las armónicas múltiplos de 3 circularán por las fases y el neutro del lado de la estrella, pero no aparecerán en el lado de la delta (caso balanceado), ya que se quedan atrapadas, produciendo sobrecalentamiento de los devanados. Se recomienda tener especial cuidado al determinar la capacidad de corriente de estos transformadores bajo condiciones de carga no lineal puesto que es posible que los volts-amperes medidos en la línea en el lado primario sean menores que en el secundario.

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis de pérdidas del transformador

Los estándares IEEE Std C57.12.90 y IEEE Std C57.12.91 categorizan las pérdidas de los transformadores como pérdidas sin carga (pérdidas por excitación) y pérdidas con carga (pérdidas por impedancia) y define las pérdidas totales como la suma de las pérdidas sin carga y las pérdidas con carga y se expresa como se muestra en la ecuación (1):

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} \quad (1)$$

Donde, P_T : Pérdidas totales; P_{NL} : Pérdidas sin carga; P_{LL} : Pérdidas con carga

Las pérdidas con carga se subdividen en pérdidas por efecto Joule debido a la corriente fundamental $I^2 R$ (P_{DC}) y pérdidas parásitas. En las pérdidas parásitas están incluidas las pérdidas por corrientes de Eddy (P_{EC}) y pérdidas parásitas en otros componentes diferentes al devanado (P_{OSL}). Siendo las pérdidas con carga definidas por la siguiente ecuación (2):

$$P_{LL} = P_{DC} + P_{EC} + P_{OSL} \quad (2)$$

Donde, P_{LL} : Pérdidas con carga; P_{DC} : Pérdidas debidas a las corrientes de carga en los devanados; P_{EC} : Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados (Eddy); P_{OSL} : Pérdidas por dispersión en fijación, depósitos, a plena carga.

Las pérdidas $I^2 R$ se pueden encontrar midiendo la resistencia a corriente directa del devanado y multiplicándola por la intensidad de corriente efectiva en los enrollados.

Efectos de los armónicos en las pérdidas $I^2 R$

Si el valor RMS de la corriente de carga aumenta debido a componentes armónicos, entonces las pérdidas deberían incrementarse. Estas pérdidas bajo condiciones armónicas podría representarse así: vea la ecuación (3).

$$P_{I^2R} = R_{DC} \cdot I^2 = R_{DC} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_{h_{max}}^2 \quad (3)$$

Donde, P_{I^2R} : Pérdidas armónicas; R_{DC} : Resistencia del devanado; I^2 : Corriente; h : Orden armónico 1,2,3, etc.; h_{max} : máximo número de armónicos significativos.

Efectos de los armónicos en las pérdidas por corrientes de Eddy

Las pérdidas por corrientes de Eddy son proporcionales al cuadrado de la corriente y la frecuencia armónica considerada. Estas pérdidas se pueden calcular como: vea la ecuación (4).

$$P_{EC} = P_{EC-R} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h^2 \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 \quad (4)$$

Donde, P_{EC-R} : Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados a corriente y frecuencia nominal; I_h : Corriente del h-ésimo armónico; I_R : Corriente nominal.

Efectos de los armónicos en otras pérdidas parásitas

Las pérdidas parásitas son asumidas que varían con el cuadrado de la corriente RMS y la frecuencia armónica a un factor de 0,8 como se indica a continuación [16]: vea la ecuación (5).

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h^{0,8} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 \quad (5)$$

Donde, P_{OSL-R} : Pérdidas parásitas bajo corrientes nominales.

Factor de armónico para las pérdidas por corrientes de Eddy

Como resultado de la corriente armónica de carga RMS, existe un factor aplicado que es proporcional a las pérdidas por corrientes de Eddy. Este factor es conocido como F_{HL} . El mismo se define como la relación entre las pérdidas por corrientes de Eddy debida a los armónicos (P_{EC}) y las pérdidas por corrientes de Eddy a frecuencia del sistema cuando no existen corrientes armónicas (P_{EC-R}). Esto se puede expresar de la siguiente manera: vea la ecuación (6).

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-R}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h^2 [I_h]^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} [I_h]^2} \quad (6)$$

Donde, P_{EC-R} : Pérdidas por unidad de corriente de Foucault a frecuencia de potencia. Vea la ecuación (7).

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h^2 \left[\frac{I_h}{I} \right]^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} \quad (7)$$

F_{HL} : Factor de pérdidas armónicas parásitas en los enrollados.

De la misma forma se define el factor de pérdidas armónicas en otras partes del transformador como la relación entre las pérdidas por corrientes de Eddy (P_{OSL}) con armónicos y sin armónicos en condiciones nominales (P_{OSL-R}). Esto se expresa en la ecuación (8):

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h^{0,8} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} \quad (8)$$

Evaluación de pérdidas y capacidad de transformadores bajo cargas armónicas

En condiciones de cargas lineales las pérdidas totales en por unidad, tomando como base las pérdidas P_{DC} , en el transformador con carga se pueden calcular como se aprecia en la ecuación (9):

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad (9)$$

Donde, P_{LL-R} : Pérdidas con carga en condiciones nominales; 1: Pérdidas debidas a las corrientes de carga en los devanados; P_{EC-R} : Pérdidas por corrientes parásitas en los devanados a condiciones nominales; P_{OSL-R} : Otras pérdidas parásitas bajo corriente nominal.

Las pérdidas en un transformador que suministra una carga distorsionada se calculan como se muestra en la ecuación (10).

$$P_{LL}(pu) = I^2(pu) \cdot [1 + F_{HL} \cdot P_{EC-R}(pu) + F_{HL-STR} \cdot P_{OSL-R}(pu)] \quad (10)$$

Donde, F_{HL-STR} : Factor de pérdida de armónicos para otras pérdidas parásitas.

En el transformador la corriente máxima en pu que en presencia de armónicos puede circular sin sobrepasar su capacidad nominal está dada por la ecuación (11), según [12]:

$$I_{\max}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + [F_{HL} \cdot P_{EC-R}(pu)] + [F_{HL-STR} \cdot P_{OSL-R}(pu)]}} \quad (11)$$

Los armónicos en el sistema eléctrico de distribución se presentan por la conexión de cargas no lineales, éstas son causantes de las deformaciones de las ondas de tensión y corriente de alimentación y del incremento de las pérdidas según lo expuesto en la literatura técnica revisada [1,2].

La distorsión de las corrientes de la carga puede provocar un calentamiento excesivo en los equipos de los sistemas eléctricos produciendo: deterioro de los conductores y equipos eléctricos, además del envejecimiento prematuro de los equipos [20,21]. Las consecuencias de conectar cargas no lineales al transformador producen un incremento en ruido y la vibración que da como resultado deformaciones en sus partes y producción de gases disueltos en el aceite, lo que reduce su rigidez dieléctrica. Esta situación provoca el envejecimiento prematuro de su aislamiento y, finalmente, de la vida útil del transformador, estimada en 20 años [22]. Por lo expuesto y señalado en la revisión bibliográfica se puede identificar que en la actualidad hay una gran influencia de la distorsión de la corriente (THDI) en los transformadores de distribución, por lo que es necesario evaluar el impacto que estos generan en los transformadores considerando el espectro armónico de las corrientes que circulan por éste.

RESULTADOS

Caso de estudio de un transformador monofásico de 25 kva

Evaluación del transformador aplicando la norma ansi ieee c57.110

Para evaluar la capacidad de carga del transformador mediante la norma ANSI/IEEE Std C57.110 se utiliza el protocolo de pruebas del fabricante y el espectro armónico de la carga que alimenta el equipo, en ambos enrollados secundarios con derivación central. Ver tabla 1 y las figuras 1, 2 y 3.

Tabla 1. Parámetros del transformador de 25 KVA					
Potencia (kVA)	Tipo	Tensión en primario (kV)	Tensión en secundario (kV)	I prim (A)	I sec (A)
25	Monofásico	7,620	0,24	3,28	104,17
Pérdidas con carga(W)	Pérdidas en vacío (W)	Relación Transformación	R1 Ω (prim)	R2 Ω (sec)	
360	90	31,75	11	0,012	

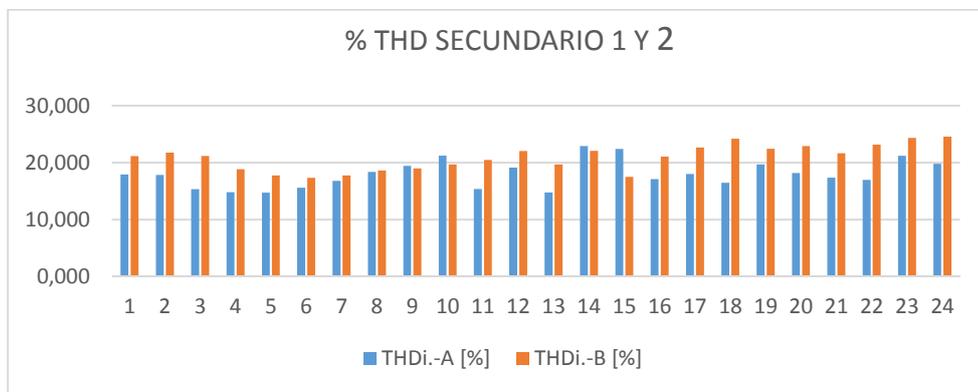


Fig. 1. THDI del transformador monofásico de 25kVA.

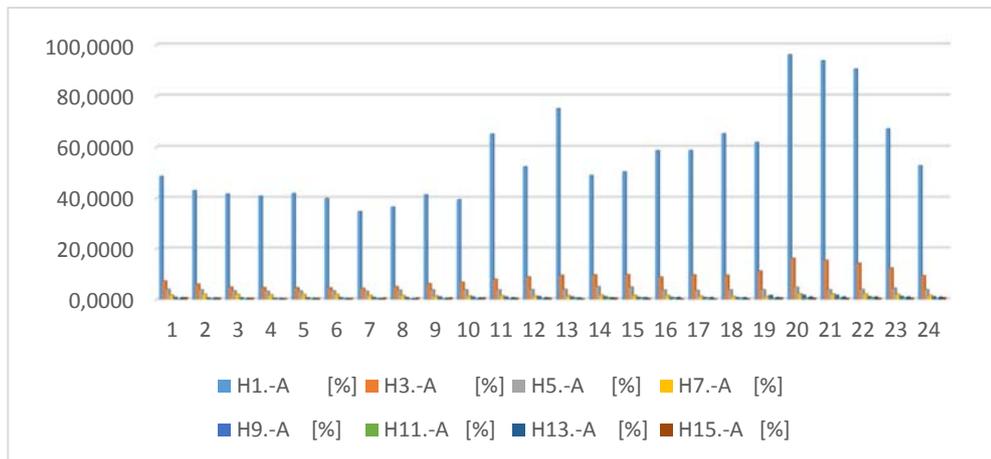


Fig. 2. Espectro armónico secundario 1.

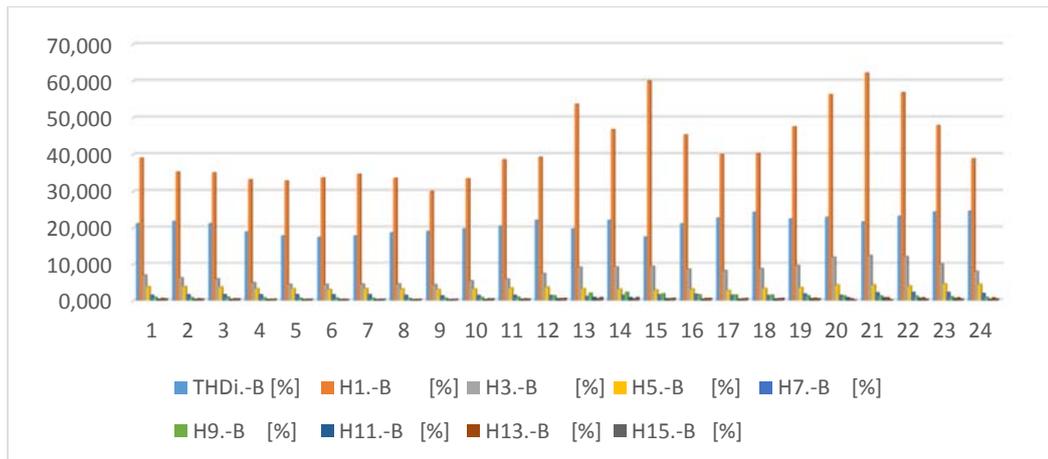


Fig. 3. Espectro armónico secundario 2.

Con los valores del protocolo de pruebas y el espectro armónico del transformador se procede a calcular el comportamiento del transformador ante la presencia de los armónicos durante las 24 horas, aplicando la siguiente secuencia de cálculos: vea la ecuación (12).

Pérdidas parásitas totales

$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} - K \cdot [I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2] \quad (12)$$

$$P_{TSL-R} = 111,389W$$

Las pérdidas en los devanados constituyen aproximadamente un 33% de las pérdidas adicionales totales para transformadores en aceite [12], por lo que las pérdidas en los devanados son: vea ecuación (13).

$$P_{EC-R} = P_{TSL-R} \cdot 0,33 \quad (13)$$

$$P_{EC-R} = 36,758W$$

Las otras pérdidas adicionales son: ecuación (14)

$$P_{OSL-R} = P_{TSL-R} - P_{EC-R} \quad (14)$$

$$P_{OSL-R} = 74,631W$$

Las pérdidas óhmicas totales en condiciones normales serían: ecuación (15)

$$P_{DC} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (15)$$

$$P_{DC} = 248,611W$$

La norma recomienda que la división de las pérdidas por corrientes parásitas entre los devanados se asuma como: 60% para el devanado interior y 40% para el devanado exterior de los transformadores que tengan una corriente nominal inferior a 1000 A o la relación de transformación sea de 4:1 o inferior y 70% para el devanado interior y 30% para el devanado exterior de los transformadores que tengan una relación de transformación mayor a 4:1 y uno o más devanados con corriente nominal mayor a 1000A.

En ausencia de otra información, se considera que el devanado interior es el devanado de baja tensión. Para este caso, se tiene que las pérdidas nominales por corriente parásitas en el devanado primario son [16]: vea ecuación (16)

$$P_{ECI-R} = 0,4 \cdot P_{ECR} \quad (16)$$

$$P_{ECI-R} = 14,7W$$

Para el devanado secundario: vea la ecuación (17).

$$P_{ECI-R} = 0,6 \cdot P_{ECR} \quad (17)$$

$$P_{ECI-R} = 22,055W$$

El espectro armónico utilizado para determinar las máximas pérdidas por corriente de Eddy en pu, se presentó en formagráfica en las figuras 2 y 3, obteniéndose el factor de armónico para pérdidas por corriente de Eddy y el factor de armónico para otras pérdidas para las 24 horas de trabajo del transformador para el secundario 1 y 2. El factor de las pérdidas armónicas para las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados se define por la siguiente ecuación (18):

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-R}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h^2 [I_h]^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} [I_h/I_R]^2} \quad (18)$$

El factor por las pérdidas armónicas para otras pérdidas adicionales es el que se presenta en la figura 4. Vea la ecuación (19).

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h^{0,8} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} \quad (19)$$

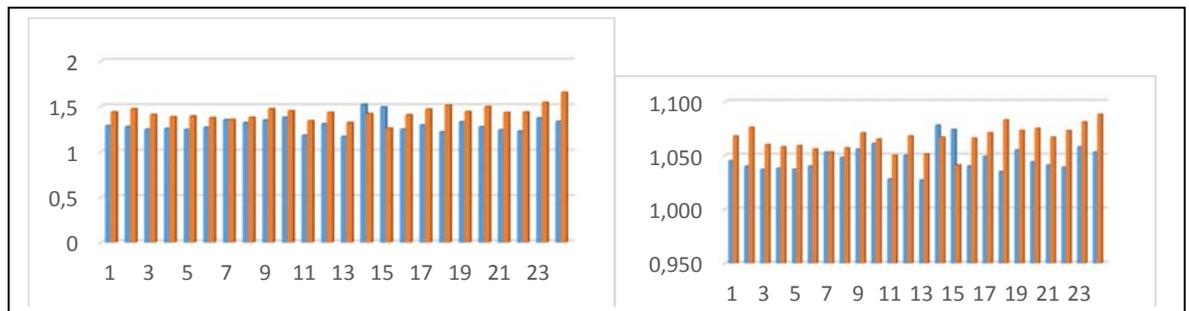


Fig. 4. Factores de Pérdidas

En la tabla 2 y tabla 3, se presentan los resultados de las pérdidas que generan los armónicos en el transformador durante las 24 horas del día, para corrientes de carga no sinusoidales. Aplicando las recomendaciones propuestas en la norma, se determinan las pérdidas con carga en pu para cada corriente de carga. Como cada sección del devanado secundario contribuye de manera independiente, se utiliza como base la mitad de las pérdidas óhmicas nominales. Por otro lado, si cada corriente de las secciones secundarias contribuye de igual manera a las otras pérdidas adicionales, se tiene que las pérdidas de carga en pu provocadas por cada corriente de carga no sinusoidal serán para el devanado 1 y 2 [16]: vea ecuación (20 y 21).

Tabla 2. Devanado 1 (Fase A)					Tabla 3. Devanado2 (Fase b)			
HORA	POSL	PEC	PECR (pu)	POSL-R (pu)	POSL	PEC	PECR (pu)	POSL-R (pu)
1	17,63	11,719	3,138	4,23	11,741	8,475	4,339	6,36
2	13,79	9,413	3,907	5,42	9,661	7,253	5,071	7,73
3	12,69	8,294	4,434	5,88	9,472	7,109	5,174	7,88
4	12,19	7,866	4,676	6,12	8,327	5,972	6,159	8,97
5	12,79	8,311	4,425	5,84	8,094	5,712	6,439	9,23
6	11,67	7,812	4,708	6,40	8,424	5,742	6,405	8,86
7	9,01	6,217	5,915	8,29	8,949	6,172	5,959	8,34
8	9,99	6,958	5,286	7,48	8,390	5,735	6,413	8,90
9	6,79	4,833	7,610	11,00	6,786	4,833	7,610	11,00
10	11,90	8,539	4,307	6,27	8,484	6,038	6,091	8,80
11	30,67	18,098	2,032	2,43	11,194	7,685	4,786	6,67
12	20,60	13,643	2,696	3,62	12,001	8,923	4,122	6,22
13	40,70	23,831	1,543	1,83	21,695	14,817	2,482	3,44
14	18,76	14,057	2,616	3,98	16,998	12,816	2,870	4,39
15	19,69	14,293	2,573	3,79	26,694	17,039	2,158	2,80
16	25,38	15,932	2,308	2,94	15,803	11,218	3,278	4,73
17	25,63	16,159	2,276	2,91	12,472	9,163	4,014	5,99
18	31,17	18,824	1,954	2,40	12,843	9,760	3,768	5,81
19	28,84	18,969	1,939	2,59	17,570	12,619	2,914	4,25
20	68,82	43,011	0,855	1,09	24,787	17,604	2,089	3,01
21	65,05	39,913	0,921	1,15	29,849	20,754	1,772	2,50
22	60,40	36,687	1,002	1,24	25,297	18,185	2,022	2,95
23	34,22	22,793	1,614	2,18	18,191	13,913	2,643	4,10
24	21,04	14,123	2,604	3,55	12,098	9,625	3,821	6,17

$$P_{LLH1}(pu) = I_{secH1}^2(pu) \left[1 + \frac{F_{HL1} \left(\frac{P_{EC-R}}{2} \right)}{\frac{P_{DC}}{2}} \right] + \frac{F_{HL1-STR} \left(\frac{P_{OSL-R}}{2} \right)}{\frac{P_{DC}}{2}} \quad (20)$$

$$P_{LLH2}(pu) = I_{\text{sec}H2}^2(pu) \left[1 + \frac{F_{HL2} \left(\frac{P_{EC-R}}{2} \right)}{\frac{P_{DC}}{2}} \right] + \frac{F_{HL2-STR} \left(\frac{P_{OSL-R}}{2} \right)}{\frac{P_{DC}}{2}} \quad (21)$$

Donde: $I_{\text{sec}H1}$ e $I_{\text{sec}H2}$ son las corrientes secundarias efectivas considerando armónicos.

Las pérdidas con carga totales en condiciones no sinusoidales son: vea la ecuación (22):

$$P_{LLTH} = [P_{LLH1}(pu) + P_{LLH2}(pu)] \cdot \frac{P_{DC}}{2} \quad (22)$$

Las pérdidas totales con armónicos se calculan como se aprecia en la ecuación (23):

$$P_H = P_{NL} + P_{LLTH} \quad (23)$$

Para condiciones sinusoidales suponiendo igual valor RMS de las corrientes de carga se tiene: vea la ecuación (24), (25) y (26).

$$P_{LL1}(pu) = I_{\text{sec}1}^2(pu) \left[1 + \frac{\left(\frac{P_{EC-R}}{2} \right)}{\frac{P_{DC}}{2}} + \frac{\left(\frac{P_{OSL-R}}{2} \right)}{\frac{P_{DC}}{2}} \right] \quad (24)$$

$$P_{LL2}(pu) = I_{\text{sec}2}^2(pu) \left[1 + \frac{\left(\frac{P_{EC-R}}{2} \right)}{\frac{P_{DC}}{2}} + \frac{\left(\frac{P_{OSL-R}}{2} \right)}{\frac{P_{DC}}{2}} \right] \quad (25)$$

$$P_{LLT} = [P_{LL1}(pu) + P_{LL2}(pu)] \cdot \frac{P_{DC}}{2} \quad (26)$$

Donde: $I_{\text{sec}1}$ e $I_{\text{sec}2}$ son las corrientes efectivas fundamentales de cada enrollado secundario.

Las pérdidas totales sin armónicos son: vea la ecuación (27):

$$P = P_{NL} + P_{LLT} \quad (27)$$

El incremento de las pérdidas por la circulación de armónicos en este caso será igual a la ecuación (28):

$$\Delta_{PLL} = P_H - P \quad (28)$$

En la tabla 4, se presenta un resumen de las pérdidas con carga en condiciones sinusoidales y no sinusoidales para el transformador de 25kVA durante las 24 horas de funcionamiento.

Tabla 4. Pérdidas con carga y sin carga de 01H00 A 24H00		
Pérdidas con carga totales en condiciones no sinusoidales y sinusoidales		
HORA	PLLTH (pu)	PLLT (pu)
1	0,493	0,469
2	0,397	0,377
3	0,381	0,364
4	0,351	0,336
5	0,353	0,338
6	0,350	0,336
7	0,334	0,319
8	0,329	0,314
9	0,318	0,301
10	0,348	0,330
11	0,631	0,610
12	0,529	0,503
13	1,013	0,980
14	0,633	0,597
15	0,909	0,873
16	0,684	0,654
17	0,598	0,569
18	0,667	0,636
19	0,760	0,722
20	1,384	1,318
21	1,477	1,413
22	1,303	1,247
23	0,830	0,781
24	0,533	0,500

A partir de estos valores se calcula el promedio de las catorce horas previas al pico nocturno (5am a 7pm debido al desayuno), para tener en cuenta el estado del calentamiento del transformador previo a dicho pico; y en el pico. Estos cálculos se explican a continuación y se resumen en la tabla 5. Tomando como base la ecuación (12), de la corriente permitida para condiciones nominales se efectúa el cálculo de la carga efectiva con armónicos en las 14 horas previas al pico por la ecuación (29):

$$I_{\max - \text{Previa}}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LLT - \text{Previa}}}{P_{LLTH - \text{Previa}}}} = \sqrt{\frac{\left(\sum_1^{14} I_i^2 \cdot P_{LL-R}(pu)^i\right) / 14}{\left(\sum_1^{14} I_{iH}^2 \cdot P_{LLH-R}(pu)^i\right) / 14}} \quad (29)$$

El cálculo de la carga efectiva con armónicos en las horas pico se define por la siguiente ecuación (30):

$$I_{\max - \text{pico}}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LLT - \text{pico}}}{P_{LLTH - \text{pico}}}} = \sqrt{\frac{\left(\sum_1^2 I_i^2 \cdot P_{LL-R}(pu)^i\right) / 2}{\left(\sum_1^2 I_{iH}^2 \cdot P_{LLH-R}(pu)^i\right) / 2}} \quad (30)$$

Donde:

$I_{\max - \text{Previa}}(pu)$: Corriente máxima en las 14 horas previas al pico.

$P_{LLT - \text{Previa}}$: Pérdidas totales con carga sin armónicos en las 14 horas previas pico.

$P_{LLTH - \text{Previa}}$: Pérdidas totales con carga con armónicos en las 14 horas previas pico.

$I_{\max - \text{pico}}(pu)$: Corriente máxima en el pico.

$P_{LLT - \text{pico}}$: Pérdidas totales con carga sin armónicos.

$P_{LLTH - \text{pico}}$: Pérdidas totales con carga con armónicos.

I_i^2 : Corriente efectiva fundamental al cuadrado.

I_{iH}^2 : Corriente efectiva considerando armónicos al cuadrado.

Estos cálculos muestran que las pérdidas totales en el transformador previo al pico considerando los armónicos se corresponden con: 0,5788pu. El mismo cálculo sin considerar armónicos corresponde con 0,546pu, lo que indica que los armónicos representan antes del pico un estado de carga previo del transformador de $(0,546/0,5788)^{0.5} = 0,9713$. Por tanto, los armónicos representan un calentamiento adicional previo al pico de 2,87%, es decir baja la capacidad del transformador en ese por ciento.

De igual forma durante el horario pico de las 7pm a las 10 pm, con armónicos, las pérdidas totales son 1,448pu y sin armónicos 1,365pu, lo que indica que en el pico el calentamiento adicional debido a los armónicos es $(1,365/1,448)^{0.5} = 0,971$ un 2,9% superior, lo anterior indica que si se considera el calentamiento adicional debido a los armónicos en el pico el transformador se comporta como si su capacidad fuera un 2,9% inferior.

Tabla 5. Carga Efectiva en las 14 horas previas al pico y en el pico								
Evaluación por la norma IEEE C57.91.1995								
Hora	Pérdidas con armónicos		PLL-R (pu)	Carga efectiva con armónicos	Pérdidas sin armónicos		PLL-R (pu)	Carga efectiva sin armónicos
	Pérdidas totales con carga PLLTH (pu)	Promedio de pérdidas			Pérdidas totales con carga PLLT (pu)	Promedio de pérdidas		
06:00	0,350	Promedio pérdidas 14 horas previas (pu)	PLL-R (pu)	Carga efectiva con armónicos	0,336	Promedio pérdidas 14 horas previas (pu)	PLL-R (pu)	Carga efectiva sin armónicos
07:00	0,334				0,319			
08:00	0,329				0,314			
09:00	0,318				0,301			
10:00	0,348				0,330			
11:00	0,631				0,610			
12:00	0,529				0,503			
13:00	1,013				0,980			
14:00	0,633				0,597			
15:00	0,909				0,873			
16:00	0,648				0,654			
17:00	0,598	0,569						
18:00	0,667	0,5788	1,448	0,6322	0,636	0,546	1,448	0,614
19:00	0,760	Promedio pérdidas pico	PLL-R (pu)	Carga efectiva pico con armónicos	0,722	Promedio pérdidas pico	PLL-R (pu)	Carga efectiva pico sin armónicos
20:00	1,384				1,318			
21:00	1,477				1,413			
22:00	1,303	1,388	1,448	0,979	1,247	1,326	1,448	0,9569

A partir de los cálculos mostrados y considerando que la temperatura ambiente es de 20 grados centígrados, comenzando por el caso en que no se consideran los armónicos, se tiene: El valor de carga efectiva sin armónicos en las 14 horas previas al pico es 0,614 de su capacidad y en el pico es 0,9569 de su capacidad. Mientras que el valor de la carga efectiva con armónicos resultante antes del pico es 0,6322 de su capacidad y en el pico es 0,979. Con estos valores y utilizando la tabla 6 se tiene que sin armónicos a 20 grados celcios de temperatura ambiente y un 61,4% de carga inicial en 3 horas que dura el pico el transformador soportará una sobrecarga del 36.7 que se obtiene interpolando entre los valores de 50% y 70% de la tabla 6.

El estado de carga real en este intervalo de tiempo es 95,69%, por lo tanto, se concluye que el transformador soportaría la carga sin peligro de disminuir su tiempo de vida útil.

Tabla 6. Sobrecargas permisibles para seleccionar la capacidad de los transformadores enfriados por aceite, carga equivalente en porcentaje de la nominal.									
Sobrecarga	Sobrecargas al:								
	50%			70%			90%		
	20°C	30°C	40°C	20°C	30°C	40°C	20°C	30°C	40°C
1 h	1,73	1,58	1,41	1,65	1,49	1,32	1,55	1,39	1,20
2 h	1,51	1,37	1,22	1,46	1,32	1,16	1,39	1,24	1,08
3h	1,39	1,31	1,26	1,35	1,22	1,10	1,29	1,17	1,03
4 h	1,33	1,19	1,06	1,19	1,17	1,04	1,26	1,13	1,00

Con armónicos a 20 grados de temperatura ambiente y un 63,22% de carga inicial en 3 horas que dura el pico, el transformador soportaría una sobrecarga de un 36,4% que se obtiene interpolando entre los valores de 50% y 70% de la tabla 6. El estado de carga del transformador en el pico es 97,9%, por lo que se concluye que el transformador soportaría la carga sin disminuir su vida útil. El caso analizado corresponde con un transformador real que suministra carga residencial en la ciudad de Loja, Ecuador, que está sub cargado y el resultado obtenido es obvio, pero resulta útil para explicar el procedimiento de cálculo, para determinar sobre la base de mediciones en el secundario del transformador de la corriente fundamental y su contenido armónico durante un ciclo de carga durante el día, cuál es su estado real de carga con el objetivo de sustituirlo antes de que comience a perder vida útil, lo que comenzaría a ocurrir para estados de carga cercanos a sus valores nominales en el período previo y alguna sobrecarga durante el pico. El inconveniente fundamental de esta evaluación es la necesidad de disponer de mediciones en el secundario del transformador, cuestión que no es siempre posible. Además, una sola medición no puede ser representativa de la peor condición de trabajo del transformador en un ciclo de carga durante un período determinado. Lo mismo se puede afirmar del comportamiento de los factores de pérdidas armónicas durante las horas previas y en el pico. Por lo antes expuesto, se concluye que una evaluación más confiable solo es posible a partir de una base de datos representativa de mediciones de las intensidades de corrientes armónicas en un ciclo diario de carga, así como una proyección de los crecimientos de la carga. Lo antes mencionado permitiría estimar el momento en que se hace necesaria la sustitución del transformador para evitar disminución de su vida útil.

CONCLUSIONES

La determinación del estado de carga real de los transformadores de distribución cuando alimentan cargas no lineales es importante para determinar en qué momento es necesario sustituirlo por otros de más capacidad antes de que comiencen a perder vida útil.

En el presente trabajo sobre la base de un ejemplo se determina la carga que puede soportar un transformador monofásico de distribución con un espectro armónico de corriente medido durante un ciclo diario de carga. Normalmente es imposible disponer de mediciones en todos los transformadores de distribución, e incluso teniendo las mediciones, éstas no permiten evaluar de manera confiable los posibles diapasones de variación de las magnitudes necesarias, para evaluar su estado de carga real, con vistas a su sustitución evitando pérdida de vida útil.

Es por lo antes mencionado que para obtener un estimado confiable del estado real de carga de los transformadores de distribución se precisa disponer de una base de datos de mediciones en los secundarios de los transformadores, a partir de la cual se identifiquen curvas típicas de corriente fundamental de carga, armónicas y sus diapasones de variación, lo que unido a una proyección del crecimiento de la carga permitiría estimar el momento idóneo para la sustitución de los transformadores por otros de mayor capacidad evitando la pérdida de vida útil de los mismos.

REFERENCIAS

- [1] HERNÁNDEZ AREU, Orestes. SÁNCHEZ GLEAN, José G. y VALIDO ESTÉVEZ, Reinel. "El problema de los armónicos en los transformadores". Estado mundial del arte. Ingeniería Energética. 2005, Vol. 26, No. 2, p. 03-08. ISSN 1815-5901.[Consultado en enero de 2018]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/html/3291/329127736001/>
- [2] FRAGOZO DÍAZ, R. E. MALAGÓN CARVAJAL, G. A. CHACÓN VELASCO, J. C. ORDOÑEZ PLATA, G. y GIRALDO PICÓN, W. "Recomendaciones prácticas para la evaluación de la carga de un transformador sometido a corrientes no sinusoidales". Revista INGE CUC. Junio 2014, Vol. 10, N° 1, p. 63-74.[Consultado en febrero de 2018]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4888852>
- [3] Milad Ghazizadeh, Jawad Faiz, Hashem Oraee. "Derating of distribution transformers under non-linear loads using a combined analytical-finite elements approach". IET Electr. Power Appl., 2016, Vol. 10, Iss. 8, p. 779–787. ISSN 1751-8679; 1751-8660. DOI: [10.1049/iet-epa.2016.0103](https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0103)
- [4] IEEE Std C57.12.90. (1999). IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. ISBN: 978-0-7381-6381-9. DOI: [10.1109/IEEESTD.2010.5610578](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5610578)
- [5] Emil CAZACU, Maria-Cătălina PETRESCU, Valentin IONIȚĂ, Lucian PETRESCU. "Nonsinusoidal Load Current Effect on the Electrical and Thermal Operating Parameters of Oil Filled Power Distribution Transformers". En IEEE: " 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Ljubljana, 2018, p. 1-6. doi: 10.1109/ICHQP.2018.8378838
- [6] STAHLHUT, Jonathan. W. HEYDT, Gerald. T. and SELOVER, Nancy. J. "A Preliminary Assessment of the Impact of Ambient Temperature Rise on Distribution Transformer Loss of Life". IEEE Transactions On Power Delivery. 2008, vol. 23, p. 2000 – 2007. [Consultado en febrero de 2018]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4626351>
- [7] Radu Godina, Eduardo M. G. Rodrigues, João C. O. Matias and João P. S. Catalão. "Effect of Loads and Other Key Factors on Oil-Transformer Ageing: Sustainability Benefits and Challenges". Energies 2015, 8, 12147-12186; doi:10.3390/en81012147.
- [8] E. Cazacu, L. Petrescu and V. Ioniță, "Losses and temperature rise within power transformers subjected to distorted currents," in Proc. 2017 IEEE 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, p. 362-365. DOI: [10.1109/ELMA.2017.7955464](https://doi.org/10.1109/ELMA.2017.7955464)
- [9] J. Faiz, M. Ghazizadeh and H. Oraee, "Derating of transformers under non-linear load current and non-sinusoidal voltage – an overview," IET Electric Power Applications, vol. 9, no. 7, p. 486-495, 8, 2015. DOI: 10.1049/iet-epa.2014.0377
- [10] E. Cazacu, L. Petrescu and V. Ioniță, "Derating of power distribution transformers serving nonlinear industrial loads," in Proc. 2017 IEEE International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), Brasov , p. 90-95. DOI: [10.1109/OPTIM.2017.7974953](https://doi.org/10.1109/OPTIM.2017.7974953)
- [11] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), June 2014. ISBN: 978-0-7381-9005-1. DOI: [10.1109/IEEESTD.2014.6826459](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459)
- [12] IEEE Std. C57.110-1998. (1998). IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents. [Consultado en enero de 2018]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/754767>
- [13] K. D. McBee, "Transformer Aging due to High Penetrations of PV, EV Charging, and Energy Storage Applications," in Proc. 2017 IEEE 9th Annual Green Technologies Conference (GreenTech), Denver, CO, p. 163-170.[Consultado en enero de 2018]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7923954>
- [14] S. A. Deokar and L. M. Waghmare, "Impact of power system harmonics on insulation failure of distribution transformer and its remedial measures," in Proc. 2011 IEEE 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, Kanyakumari, p. 136-140. [Consultado en enero de 2018]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5941817>
- [15] Bhaba Priyo Das, Zoran Radakovic, "¿Es la reducción de kVA del transformador siempre se requiere según los armónicos? Una perspectiva del fabricante", *Transacciones IEEE de entrega de potencia*, vol. 33, no. 6, p. 2693-2699, 2018.[Consultado en enero de 2018]. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKewj8ptvo3aLhAhVESq0KHxptDH0QfjAAegQIAxAC&url=http%3A%2F%2Fudistrital.edu.co%3A8080%2Fdocuments%2F42573%2>

F87032%2FT025%2BLOS%2BARMONICOS%2BEN%2BLAS%2BINSTALACIONES%2BELECTRICAS&usg=AOvVaw3EAYOYcCk9h3X8ysmvGzlQ

[16] GÓMEZ SARDUY, Julio. QUISPE, Enrique. REYES CALVO, Royd. SOUSA SANTOS, Vladimir. PERCY, Viego Felipe. Influencia de los armónicos de corriente sobre las pérdidas en los transformadores de distribución monofásicos con derivación central. *El Hombre y la Máquina*. Cali, Colombia, 2014, N° 45 (págs. 33-43). [Consultado en enero de 2018]. Disponible en: <https://docplayer.es/64542895-Influencia-de-los-armonicos-de-corriente-sobre-las-perdidas-en-los-transformadores-de-distribucion-monofasicos-con-derivacion-central.html>

[17] P. M. Nicolae, I. Daniel Smărăndescu, M. S. Nicolae, D. L. Popa and I. D. Nicolae, "Considerations on a MV/LV Transformer which Supplies a Distorting Load," in Proc. 2016 IEEE Int. Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Varna, p. 354-359. ISBN: 978-1-5090-1798-0. DOI: [10.1109/EPEPMC.2016.7752023](https://doi.org/10.1109/EPEPMC.2016.7752023)

[18] ELMOUDI, A. LEHTONEN, M. NORDMAN, H. "Corrected winding eddy-current harmonic loss factor for transformers subject to non-sinusoidal load currents". *Power Teach. Russia: IEEE 2005*, (págs. 1-6). [Consultado en febrero de 2018]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4524421>

[19] Thinh Dao, H. Abdull Halim, Z. Liu, BT Phung. "Voltaje de efecto armónico sobre pérdidas en transformadores de distribución". Publicado en: Conferencia internacional sobre tecnología inteligente verde en sistemas eléctricos y de información (ICSGTEIS). IEEE (Bali, 2016). DOI: [10.1109/ICSGTEIS.2016.7885761](https://doi.org/10.1109/ICSGTEIS.2016.7885761). Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7885761>

[20] M. Costea and T. Leonida, "The effect of using isolation transformers to supply small nonlinear loads," in Proc. 2014 16th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bucharest, p. 337-341. ISBN: 978-1-4673-6487-4. ISSN: 2164-0610. DOI: [10.1109/ICHQP.2014.6842781](https://doi.org/10.1109/ICHQP.2014.6842781)

[21] M. A. Taher, S. Kamel and Z. M. Ali, "K-Factor and transformer losses calculations under harmonics," in Proc. 2016 IEEE 18th Intert. Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, p. 753-758. ISBN: 978-1-4673-9063-7. DOI: [10.1109/MEPCON.2016.7836978](https://doi.org/10.1109/MEPCON.2016.7836978)

[22] M. Ghazizadeh, J. Faiz, H. Oraee, "Reducción de la capacidad de los transformadores de distribución bajo cargas no lineales utilizando un enfoque combinado de elementos analítico-finitos", *IET Electric Power Applications*, vol. 10, no. 8, p.779-787. ISSN 1751-8679. DOI: [10.1049/iet-epa.2016.0103](https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0103). Disponible en: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-epa.2016.0103>