

**Impacto de armónicos en transformador trifásico de 20MVA – 69/13,8 KV.
Impact of harmonics on a 20MVA – 69/13.8 KV three-phase transformer.**

MSc. Silvia Virginia Taipe Quilligana; MSc. Darwin Vinicio Paredes Moran; MSc. Andres Alexander De La Torre Macias;
MSc. Milton Geovanny Cuenca Cabrera

**INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO**

**Julio - diciembre, V°4-N°2;
2023**

- ✓ **Recibido:** 31/08/2023
- ✓ **Aceptado:** 14/09/2023
- ✓ **Publicado:** 30/12/2023

 **PAÍS**
 **Ecuador**
 **Ecuador**
 **Ecuador**

 **INSTITUCIÓN**

Universidad Tecnica Estatal de Quevedo
Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia
Universidad Tecnica Estatal de Quevedo
Universidad Tecnica Estatal de Quevedo

CORREO:

- ✉ staipeq@uteq.edu.ec
- ✉ darwinparedes@itscv.edu.ec
- ✉ adelatorrem@uteq.edu.ec
- ✉ mcuencac@uteq.edu.ec

FORMATO DE CITA APA.

Taipe, S. Paredes, D. De la Torre, A. Cuenca, M. (2023) Impacto de armónicos en transformador trifásico de 20MVA – 69/13,8 KV.. Revista G-ner@ndo, V°4 (N°2,0). 352 – 383..

Resumen

Este proyecto presenta el análisis de distorsión armónica en el transformador trifásico de potencia de 20MVA – 69/13,8kV de la Empresa Eléctrica de Ambato S.A. Este transformador abastece suministro eléctrico a los cantones Tena, Archidona y las parroquias de Muyuna, San Pablo de Ushpayacu, Cotundo y Hatun Sumaco. En la actualidad el uso constante de equipos electrónicos como variadores de frecuencia, hornos de inducción, cargadores, microondas, entre otros. Estos equipos inyectan armónicos ocasionando efectos negativos, llegando a deformar la onda sinusoidal de corriente y voltaje en el transformador que los alimenta. Por esta razón, se obtiene los datos del transformador mediante la medición de calidad de energía realizados por el personal de la empresa antes mencionada, se analiza de forma experimental el comportamiento que tiene los armónicos en el transformador de potencia empleando el software DlgSILENT. La información adquirida en la simulación será utilizada para la corrección al problema de armónicos cuyo objetivo principal es poder disminuir los niveles de distorsión armónica que contiene la red. Finalmente, se diseña un filtro pasivo, el mismo que es conectado en la barra de baja tensión (13,8kV); Aquí se puede apreciar una onda sinusoidal de corriente con niveles reducidos de armónicos la disminución de pérdidas de energía, prolongando así la vida útil del transformador.

Palabras clave: Distorsión armónica, carga lineal, carga no lineal, transformador, calidad de energía.

Abstract

This project presents the analysis of harmonic distortion in the 20MVA – 69/13.8kV three-phase power transformer of Empresa Eléctrica de Ambato S.A. This transformer supplies electricity to the cantons of Tena, Archidona and the parishes of Muyuna, San Pablo de Ushpayacu, Cotundo and Hatun Sumaco. Currently, the constant use of electronic equipment such as frequency converters, induction ovens, chargers, microwaves, among others. These devices inject harmonics causing negative effects, deforming the sine wave of current and voltage in the transformer that feeds them. For this reason, the transformer data is obtained by measuring the power quality carried out by the personnel of the aforementioned company, the behavior of the harmonics in the power transformer is experimentally analyzed using the DlgSILENT software. The information acquired in the simulation will be used to correct the harmonic problem whose main objective is to reduce the levels of harmonic distortion contained in the network. Finally, a passive filter is designed, the same one that is connected to the low voltage bus. (13.8kV); Here you can see a sinusoidal current wave with reduced levels of harmonics, reducing energy losses, thus prolonging the useful life of the transformer.

Keywords: Harmonic distortion, linear load, non-linear load, transformer, power quality.

Introducción

La implementación de la electrónica de potencia en nuestra vida cotidiana y la necesidad del uso de estos equipos por su eficacia, ha acarreado un grave problema para el consumo y la distribución de energía eléctrica en residencias, centros comerciales e industrias. Estos equipos a lo largo de su funcionamiento tienden a ocasionar problemas de distorsión de armónicos en voltaje y corriente, consumiendo energía eléctrica de forma no lineal, es decir, de una manera no continua en el tiempo, los armónicos se pueden ver reflejados como sobrecalentamiento en los conductores, disminución del factor de potencia, vibraciones en cuadros eléctricos, degradación en el aislamiento, afectando así principalmente la vida útil del transformador de potencia y por ende la calidad de energía disminuye, (Ezomar, 2015).

El avance tecnológico ha permitido que en la actualidad se añada la electrónica de potencia en hogares, industrias y centro comerciales con el fin de producir equipos más eficientes con menor consumo de energía donde se busca mejorar la productividad a bajo costo, ofreciendo así un servicio de calidad, (Rojas, 2011). La conexión de cargas no lineales y cargas lineales en el sistema eléctrico generan efectos de distorsión armónica, el cual llega afectar principalmente a los transformadores, siendo uno de los elementos de mayor costo e importante en el sistema eléctrico, (Electronics, 2019).

Tener efectos de distorsión armónica provocan corriente elevadas convirtiéndose en pérdidas que se disipan en forma de calor, deteriorando prematuramente los componentes como papel aislante, aceite y daños en los devanados, provocando haciendo de esa manera disminuya la vida útil del transformador, (Ricardo, 2013). Por lo tanto, la finalidad de esta investigación es analizar las causas y efectos que llega a obtener el transformador conectado a la red con cargas no lineales. Además, se planteará el método de reducción de armónicos que consiste en conectar un filtro pasivo en la barra de salida para filtrar armónicos de mayor magnitud a una frecuencia

resonante predeterminada. Este estudio, se realizará para la Empresa Eléctrica de Ambato con el fin de dar a conocer el estado actual del transformador de potencia, (Circutor, 2014).

La Empresa Eléctrica de Ambato (E.E.A.S.A.) siendo una empresa proveedora de energía del país y con el objetivo de entregar energía de calidad a sus clientes ve la necesidad de realizar un análisis de distorsión armónica en el transformador de potencia para tener un conocimiento del nivel de pérdidas que ha tenido en el transcurso de su operación, (Gómez, et al. 2014). En la actualidad la eficiencia energética es el punto clave para entregar energía de calidad a los usuarios, para ello se debe tener en cuenta que las pérdidas técnicas y no técnicas sean las mínimas posibles en el sistema de distribución. La investigación planteada trata de demostrar el impacto perjudicial que pueden llegar a tener los armónicos en el transformador de potencia. El poder simplificar los armónicos en el transformador ayudara a obtener pocas pérdidas y mayor eficiencia, garantizando un alto rendimiento de operación del transformador, (Montoya, 2016). Este estudio, está basado en información brindada por la empresa como son las mediciones de campo de distorsión armónica del transformador, carga instalada en la barra conectada, características del transformador, niveles de voltajes y corrientes, (Castillo, 2014).

Materiales y Métodos

Las consecuencias de tener una señal distorsionada o la presencia de armónicos ya sea de voltaje o corriente llegan a tener diversos efectos negativos como el mal funcionamiento de los equipos, pérdidas de energía por calentamiento, sobretensiones e interferencias con las señales de comunicación y control, (CONELEC, 2001). La investigación de campo planteada será aplicada para el estudio y análisis de los armónicos en el transformador de potencia y las posibilidades de reducirlas o el mejor de los casos eliminarla en la subestación Norte de la Empresa Eléctrica de Ambato, como métodos de investigación fue un análisis deductivo, analítico y experimental, fueron los métodos aplicados para la investigación de las causas y efectos colaterales de tener presente señales de voltajes y corrientes de distorsión armónica tanto en el

transformador de potencia como en las redes eléctricas. Además, las fuentes de recopilación de información fueron, libros, revistas de investigación. Instrumentos de investigación se consideran a Software Digsilent PowerFactor y medición de calidad Sonel PQM-702 y Fluke PQ 435.

Análisis de Resultados

Los datos proporcionados para el análisis de los armónicos del transformador corresponden a la Empresa Eléctrica Ambato S.A, este transformador es trifásico, está colocado en la subestación denominada con el nombre “Tena Norte”. Fue diseñada para perfeccionar los niveles de confiabilidad, abastecimiento de energía y calidad del servicio eléctrico en beneficio de los más de 50.000 habitantes de los cantones: Tena, Archidona y las parroquias de Muyuna, San Pablo de Ushpayacu, Cotundo y Hatun Sumaco, ubicada en la Vía Archidona Km 8 [18], Tena-Napo-Ecuador. La relación de transformación es de 69 kV / 13.8 kV de conexión Delta (Δ) en tensión alta y Estrella (Y_n) en tensión media con una potencia 16/20 MVA.

A continuación, se presenta la placa característica del transformador de potencia de la “Empresa Eléctrica Ambato S.A.

Tabla 1. Características del transformador trifásico de potencia.

Voltaje de alta	69 kV (Δ)
Voltaje de media	13,8 kV (Y_n)
Frecuencia	60 Hz
Potencia	20 MVA
Pérdidas en vacío	13 355 (kW)
Pérdidas en carga	58 730 (kW)
Incremento de temperatura	55°C / 85°C
Peso total	33 300 (kg)
Corriente nominal en alta	167,3 (Amp)
Corriente nominal en media	836,7 (Amp)
Impedancia de devanado	7,89 (%)

Fuente: Placa constructiva del transformado de potencia, E.E.A.S.A.

Las elevaciones de temperatura del transformador están de acuerdo a la placa del fabricante:

- Temperatura superior del aceite = 55°C
- Temperatura media en los devanados = 55°C
- Temperatura a la elevación del punto más caliente = 85°C

El enfriamiento del transformador de potencia es de tipo ONAN (aceite y aire circulando por convección natural) /ONAF (aceite circulando por convección natural y aire forzado con moto ventilador) [19], el cual, también consta de una conmutación de 16/20MVA. En la tabla 7 se muestra los taps de conmutaciones de en la potencia de 20MVA del transformador.

Tabla 2. Taps de conmutaciones del transformador trifásico de potencia.

CONMUTACIONES DE TAPS 20MVA				
DEVANADOS	VOLTAJE (V)	AMPERIOS (A)	COMBIADOR DE DERIVACIONES	
			POSICIÓN	CONEXIÓN
ALTA TENSIÓN	72 450	159,4	1	2-3
	70 725	163,3	2	3-4
	69 000	167,3	3	4-5
	67 275	171,6	4	5-6
	65 550	176,2	5	6-7
MEDIA TENSIÓN	13 800	836,7	-----	-----

Autores: Grupo investigador.

Análisis de Distorsión Armónica

Determinando el factor de cresta se obtiene un análisis empírico de voltaje y corriente si en las líneas A-B-C tienen presencia de armónicos, considerando la definición del mismo, a continuación, en la tabla 8 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 3. Factor de cresta de voltaje y corriente.

LA		LB	LC
VOLTAJE	1.41	1.40	1.41
CORRIENTE	1.70	1.47	1.36

Autores: Grupo investigador.

	IhA (%)	IhB (%)	IhC (%)
Ih1	100.82	126.55	116.42
Ih2	0.12	0.20	0.12
Ih3	9.67	9.71	9.02
Ih4	0.05	0.10	0.03
Ih5	2.82	3.38	2.35
Ih6	0.02	0.04	0.03
Ih7	0.91	0.86	0.59
Ih8	0.00	0.01	0.01
Ih9	0.91	1.01	1.00
Ih10	0.00	0.01	0.00
Ih11	0.51	0.51	0.56
Ih12	0.00	0.00	0.00
Ih13	0.24	0.30	0.25
Ih14	0.00	0.00	0.00
Ih15	0.13	0.13	0.13
Ih16	0.00	0.00	0.00
Ih17	0.09	0.07	0.07
Ih18	0.00	0.00	0.00
Ih19	0.08	0.08	0.08

El factor de cresta considera que los valores de voltaje y corriente de manera individual en las líneas A-B-C deben ser igual al cuadrado de dos (1.4142) para concluir que no hay presencia de deformación en la onda sinusoidal, caso contrario si son mayores o menores se dice que hay deformación en la onda sinusoidal. Con el análisis empírico del factor de cresta, se procede a medir los niveles de armónicos de corriente (Ih) obtenidos mediante el equipo de

medición de calidad Sonel PQM-702 y Fluke PQ 435 conectado en la salida del transformador trifásico de potencia de 20MVA de la Empresa Eléctrica de Ambato, (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2007), con base a la normativa de calidad de energía se toma mediciones de armónicos en orden 1 hasta 50, en este caso se analizad el orden armónico 1 hasta el 19, ya que en esos niveles se tubo presencia de armónico, como se muestra a continuación en la tabla .

Tabla 4. Contenido de distorsión armónica de corriente las fases A-B-C.

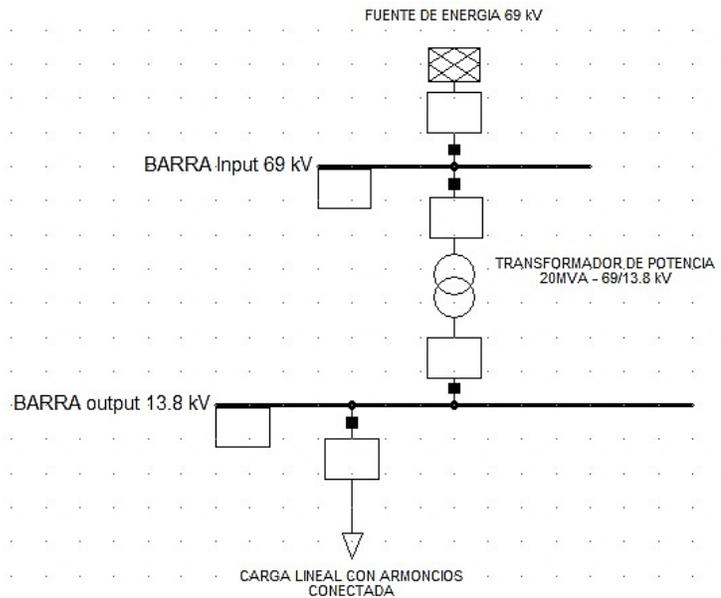
	IhA (%)	IhB (%)	IhC (%)
Ih1	100.82	126.55	116.42
Ih2	0.12	0.20	0.12
Ih3	9.67	9.71	9.02
Ih4	0.05	0.10	0.03
Ih5	2.82	3.38	2.35
Ih6	0.02	0.04	0.03
Ih7	0.91	0.86	0.59
Ih8	0.00	0.01	0.01
Ih9	0.91	1.01	1.00
Ih10	0.00	0.01	0.00
Ih11	0.51	0.51	0.56
Ih12	0.00	0.00	0.00
Ih13	0.24	0.30	0.25
Ih14	0.00	0.00	0.00
Ih15	0.13	0.13	0.13
Ih16	0.00	0.00	0.00
Ih17	0.09	0.07	0.07
Ih18	0.00	0.00	0.00
Ih19	0.08	0.08	0.08

Fuente: Equipo de medición de calidad Sonel, E.E.A.S.A.

Autores: Grupo investigador.

El modelamiento del sistema consta de una fuente de voltaje en Delta de 69kV conectado a la barra 1 (alto voltaje), una barra 2 de 13.8kV (bajo voltaje) donde están conectadas las carga lineal y no lineal, un transformador trifásico de 20 MVA con la relación de transformación de conexión Delta (Δ) 69 kV en el lado de alta tensión y Estrella (Y_n) 13.8 kV conectado a la barra 1-2 como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Modelamiento del sistema en Digsilents.

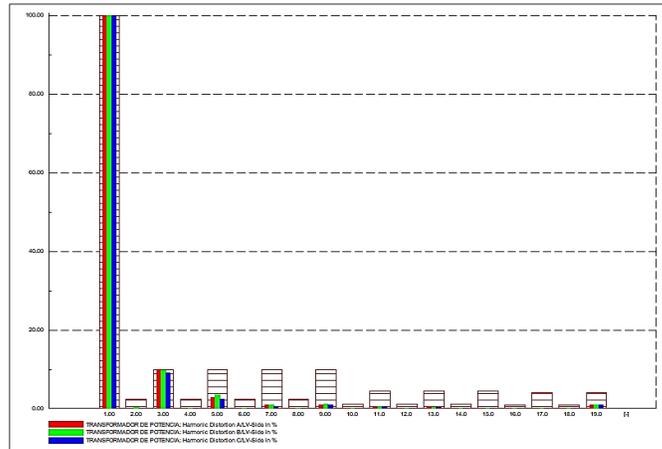


Fuente: DigSilents PowerFactory.

Autores: Grupo investigador.

El análisis se desarrolló con una carga conectada aproximada de 12,18MW (P), estas cargas están conectada en la barra de baja tensión (13,8kV), siendo el voltaje de salida de la barra primaria de la subestación que alimenta las ciudades de Tena, Archidona y las parroquias de Muyuna, San Pablo de Ushpayacu, Cotundo y Hatun Sumaco, luego, ingresando los datos de potencias y niveles de distorsión armónicas en DigSilent se obtuvo el siguiente espectro armónico.

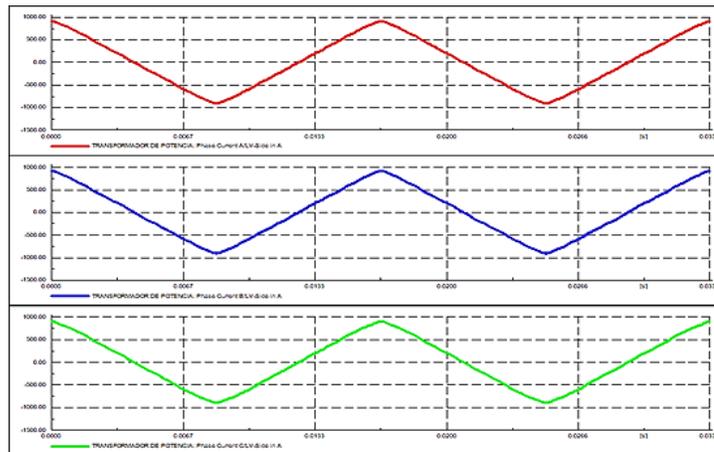
Figura 2. Espectro armónico de corriente en las fases A-B-C.



Fuente: DigSilents PowerFactory.
Autor: Grupo investigador.

El espectro armónico nos indica que los armónicos 3, 5, 7 y 9 son superiores a comparación de los demás niveles 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 13, ..., 19 estos niveles de armónicos se pueden ver reflejados en la curva de corriente como se muestra en la figura 3.

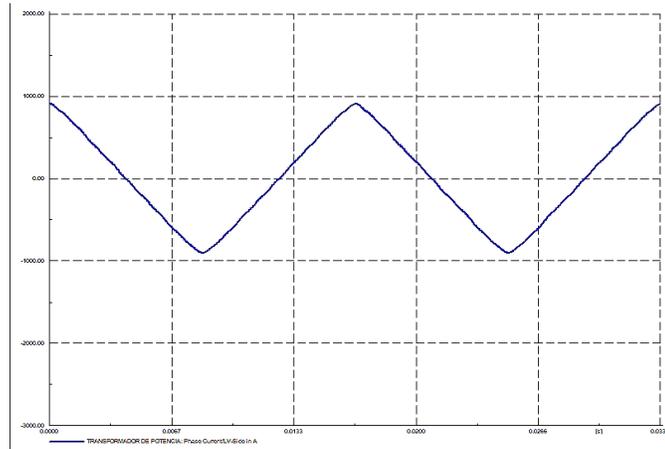
Figura 3. Onda sinusoidal de corriente a) Faces A b) Faces B c) Faces C.



Fuente: DigSilents PowerFactory.
Autores: Grupo investigador.

La presencia de armónicos también se puede ver reflejada en la corriente de operación del transformador, como se muestra en la figura 4.

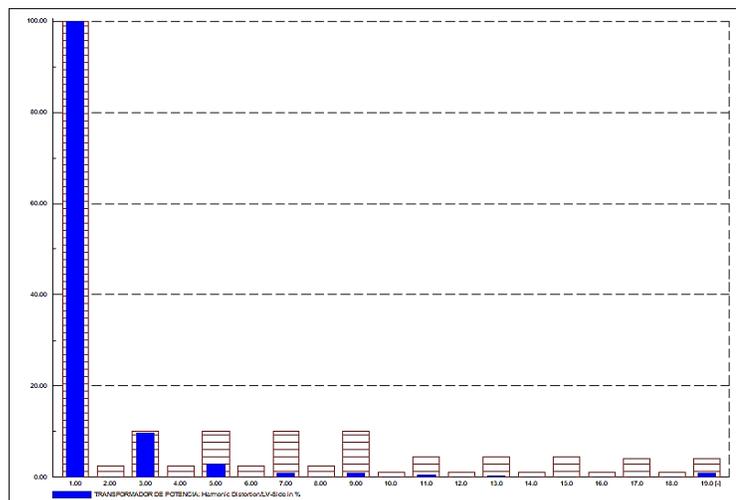
Figura 4. Onda sinusoidal de corriente del transformador de potencia.



Fuente: DigSilents PowerFactory.
Autores: Grupo investigador.

La curva de corriente de transformador muestra el pico al igual que las curvas de las líneas A-B-C en el lado de baja tensión. La distorsión de onda sinusoidal de corriente en el transformador presenta el siguiente espectro armónico.

Figura 5. Espectro armónico de corriente del transformador de potencia.



Fuente: DigSilents PowerFactory.
Autores: Grupo investigador.

La simulación del sistema modelado a una frecuencia fundamental de 60Hz analizando los 19 niveles de distorsión armónica de los datos recolectados, dio los siguientes resultados de distorsión armónica como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Valores de distorsión armónica y distorsión armónica total de corriente.

LA		LB	LC	TRANSFORMADOR
HD (%)	0,323	0,326	0,326	0,794
THD (%)	0,793	0,866	0,795	2,824

Autores: Grupo investigador.

El cálculo de las pérdidas del transformador se obtiene mediante la medición del contenido armónico existente en el sistema eléctrico a analizar como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de distorsión armónica de corriente del transformador y fase A-B-C.

Orden Armónico	I_hA/IA	I_hB/IB	I_hC/IC	I_hT/IT
1	100.82	126.55	116.42	100
2	0.12	0.20	0.12	0.12
3	9.67	9.71	9.02	9.67
4	0.05	0.10	0.03	0.050
5	2.82	3.38	2.35	2.82
6	0.02	0.04	0.03	0.020
7	0.91	0.86	0.59	0.91
8	0.00	0.01	0.01	0.00
9	0.91	1.01	1.00	0.91
10	0.00	0.01	0.00	0.00
11	0.51	0.51	0.56	0.51
12	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.24	0.30	0.25	0.24
14	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.13	0.13	0.13	0.13

16	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.09	0.07	0.07	0.09
18	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.80	0.80	0.80	0.80

Autores: Grupo investigador.

El contenido armónico de corriente con respecto a la fundamental del transformador de potencia será el dato de referencia para determinar las pérdidas adicionales por causa de distorsión armónica mediante métodos estadísticos se llega a obtener la siguiente tabla.

Tabla 7. Cálculos de las pérdidas adicionales en el transformador de potencia con armónicos.

Orden Armónico (h)	$I_h T / IT$	$(I_h T / IT)^2$	h^2	$(I_h T / IT)^{2*} h^2$	$h^{0.8}$	$(I_h T / IT)^{2*} h^{0.8}$
1	1	1	1	1	1	1
2	0.0012	1.440E-06	4	5.760E-06	1.741101127	2.507E-06
3	0.0967	9.351E-03	9	8.416E-02	2.408224685	2.252E-02
4	0.0005	2.500E-07	16	4.000E-06	3.031433133	7.579E-07
5	0.0282	7.952E-04	25	1.988E-02	3.623898318	2.882E-03
6	0.0002	4.000E-08	36	1.440E-06	4.192962713	1.677E-07
7	0.0091	8.281E-05	49	4.058E-03	4.743276394	3.928E-04
8	0	0.000E+00	64	0.000E+00	5.278031643	0.000E+00
9	0.0091	8.281E-05	81	6.708E-03	5.799546135	4.803E-04
10	0	0.000E+00	100	0.000E+00	6.309573445	0.000E+00
11	0.0051	2.601E-05	121	3.147E-03	6.809483128	1.771E-04
12	0	0.000E+00	144	0.000E+00	7.300372103	0.000E+00
13	0.0024	5.760E-06	169	9.734E-04	7.783137122	4.483E-05
14	0	0.000E+00	196	0.000E+00	8.258523873	0.000E+00
15	0.0013	1.690E-06	225	3.803E-04	8.727161387	1.475E-05
16	0	0.000E+00	256	0.000E+00	9.18958684	0.000E+00

17	0.0009	8.100E-07	289	2.341E-04	9.646263856	7.813E-06
18	0	0.000E+00	324	0.000E+00	10.09759631	0.000E+00
19	0.008	6.400E-05	361	2.310E-02	10.5439389	6.748E-04
SUMA (Σ)		1.01041175		1.1426545		1.027196717

Autores: Grupo investigador.

Con los datos obtenidos en la tabla 7 aplicamos la ecuación 18 para realizar el cálculo del Factor de armónicos para las pérdidas por corrientes de Eddy.

$$F_{HL} = \frac{1.1426545}{1.01041175}$$

$$F_{HL} = 1.13088006$$

De la misma manera se puede calcular el factor armónico de las pérdidas de disipación en diferentes partes del transformador aplicando la ecuación 19.

$$F_{HL-STR} = \frac{1.027196717}{1.01041175}$$

$$F_{HL-STR} = 1.016612007$$

Las pérdidas totales de dispersión y las pérdidas por corriente de Eddy varían en un rango de 5% al 15%, el cual, se toma el 10% como un valor medio para el cómputo del cálculo de las pérdidas totales.

Ecuación (23)

$$P_{TSL-R} = P_{LL} * 10\%$$

$$P_{TSL-R} = 58\,730 * 10\%$$

$$P_{TSL-R} = 5\,873 \text{ [kW]}$$

Por lo tanto, las pérdidas en el cobre se pueden calcular de manera indirecta de la siguiente manera:

Ecuación (24)

$$P_{I^2R} = P_{LL} - P_{TSL-R}$$

$$P_{I^2R} = 58\,730 - 5\,873$$

$$P_{I^2R} = 52\ 857 \text{ [kW]}$$

Las pérdidas de Eddy en condiciones nominales se calculan utilizando la ecuación 14 como se muestra a continuación:

$$P_{EC-R} = 5\ 873 * 0,33$$

$$P_{EC-R} = 1\ 938,09 \text{ [kW]}$$

Usando la ecuación 16 se procede a calcular las pérdidas de dispersión total:

$$P_{OSL-R} = 5\ 873 - 1\ 938,09$$

$$P_{OSL-R} = 3\ 934,91 \text{ [kW]}$$

Como resultado de los cálculos de pérdidas nominales obtenidas mediante las ecuaciones mencionadas se puede resumir en la siguiente tabla 13:

Tabla 8. Pérdidas nominales del transformador de potencia.

TIPO DE PERDIDA	VALOR [kW]
Pérdida en Vacío	13 355
Pérdida en el Cobre	52 857
Pérdidas por corrientes de Eddy	1 938,09
Pérdidas de adicionales	3 934,91

Autores: Grupo investigador.

Teniendo el resultado de los tipos de pérdidas del transformador, se procede a realizar el cálculo de las pérdidas totales, se aplica las ecuaciones [10], se debe calcular las pérdidas por corrientes de Eddy y adicionales por causa de presencia de armónicos aplicando las ecuaciones 12 y 17.

Pérdidas por corriente de Eddy más la influencia de armónicos.

$$P_{EC} = P_{EC-R} * \left(1 + \sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^2 \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \right)$$

$$P_{EC} = 1\ 938,09 * (1 + 1,1426545)$$

$$P_{EC} = 4\ 152,657 \text{ (kW)}$$

Pérdidas adicionales más la influencia de armónicos.

$$P_{osl} = P_{osl-R} * (1 + \sum_{h=1}^{h=hmax} h^{0,8} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2)$$

$$P_{osl} = 3\,934.91 * (1 + 1.027196717)$$

$$P_{osl} = 7\,976.836 \text{ (kW)}$$

Pérdidas totales de carga más la influencia de armónicos.

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} + P_{OSL}$$

$$P_{LL} = 55\,717.028 + 4\,152.657 + 7\,976.836 \text{ (kW)}$$

$$P_{LL} = 67\,846.521 \text{ (kW)}$$

Existen varios criterios en la hora de reducir los niveles de armónicos en un sistema eléctrico, tomando en consideración que los armónicos se pueden presentar de diferentes niveles según el tipo de usuario, en este caso el análisis será realizado para el transformador trifásico de potencia de la E.E.A.S.A, el cual, se tubo presencia de armónico altos en los niveles 3 y 5.

La disminución de los niveles de armónicos que son inyectados a la red dependerá de la corrección del factor de potencia (FP) el cual, está trabajando actualmente la red que corresponde a 0,93, se mejora a un FP de 0,95 para su mayor eficacia de uso de electricidad, (Márquez & Molina, 2013).

Se toma la ecuación 25 para el cálculo de compensación de reactivos.

Ecuación (25)

$$Q_c = P (tg (\cos^{-1}FP_{viejo}) - tg (\cos^{-1}FP_{nuevo})) \text{ (MVar)}$$

$$Q_c = 12,18(tg (\cos^{-1}0,93) - tg (\cos^{-1}0,95))$$

$$Q_c = 4,185 \text{ (MVar)}$$

Teniendo el valor de compensación de reactivos, se procede a realizar el cálculo del inductor (L) y capacitor (C) para el diseño del filtro pasivo donde ira conectada a la barra de salida de 13,8kW. Utilizando el criterio de aproximación del mayor armónico que se presenta en el sistema con distorsión armónica, en este caso la frecuencia que presenta mayor amplitudes de orden 3 (180 Hz), esta será la sintonización del filtro, de acuerdo con la normativa IEEE 1531 el filtro debe sintonizarse a una frecuencia entre un 3% hasta un 15% por debajo de la frecuencia que inicia la sintonización, se escogió el valor de 6% siendo un valor medio en que debe sintonizarse el filtro, equivalente a 169,2Hz.

En base al concepto explicado anteriormente se procede al cálculo de la efectividad de la impedancia del filtro utilizando el valor de 10(MVAr) para mayor efectividad y valor comercial establecido en la norma IEEE 18-2002, se calcula mediante la ecuación 26.

Ecuación (26)

$$X_{eff} = \frac{V_{LL}^2}{Q_c} (\Omega)$$

Dónde:

 X_{eff} = Efectividad de impedancia. V_{LL} = Voltaje de línea Q_c = Compensación de reactivo.

$$X_{eff} = \frac{13,8^2}{10}$$

$$X_{eff} = 19,044 (\Omega)$$

Teniendo la efectividad de la impedancia se realiza el cálculo de la reactancia capacitiva del filtro mediante la ecuación 27.

Ecuación (27)

$$X_c = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) * X_{eff} (\Omega)$$

Dónde:

h = Frecuencia de sintonización.

$$X_c = \left(\frac{2,82^2}{2,82^2 - 1} \right) * 19,044$$

$$X_c = 21,783 (\Omega)$$

Teniendo la reactancia capacitiva se procede a calcular de la Inductancia y capacitancia.

- Capacitancia:

Ecuación (28)

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_c}$$

$$C = \frac{1}{2(60)(\pi)(21.783)}$$

$$C = 121.773 (\mu F)$$

- Inductancia:

Ecuación (29)

$$X_L = \frac{X_c}{h^2}$$

$$X_L = \frac{21.783}{2.82^2}$$

$$X_L = 2.74(\Omega)$$

Ecuación (30)

$$L = \frac{X_L}{\omega}$$

$$L = \frac{2.74}{2(60)(\pi)}; L = 7.268 (mH)$$

- Resistencia:

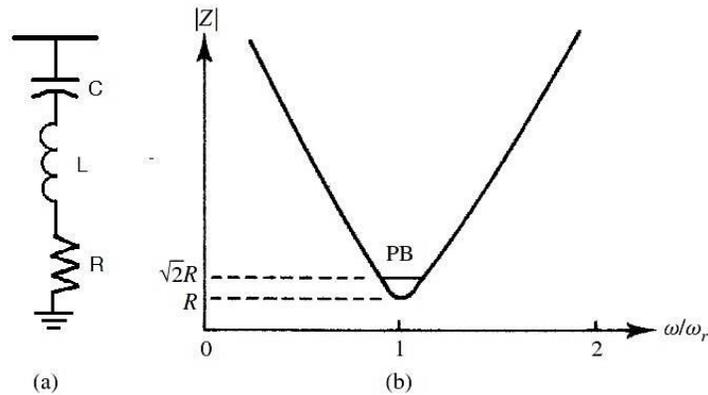
Ecuación (31)

$$R = \frac{X_i(f_{res})}{Q_f}$$

$$R = \frac{2.74(2.82)}{20}$$

$$R = 0.386 (\Omega)$$

Figura 6. Estructura constructiva del filtro pasivo.



Fuente: Análisis y diseño de filtros pasivos de doble sintonización.

Autores: Grupo investigador.

El filtro debe presentar un camino de baja impedancia por lo cual debe cumplir que la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva sean iguales para que el filtro no sufra daños por consecuencia de sobre corrientes.

$$X_L = X_c$$

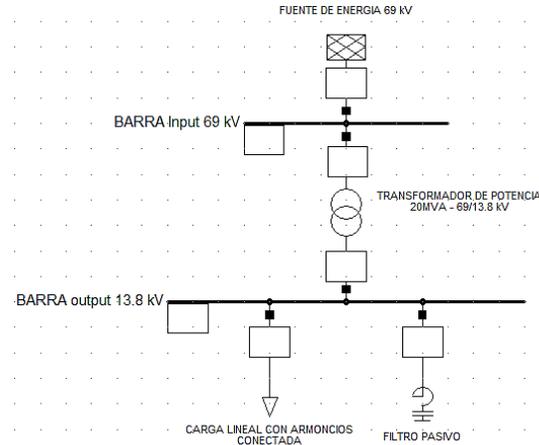
$$\frac{X_c}{h} = X_L h$$

$$\frac{21.783}{2.82} = (2.74)(2.82)$$

$$7.72 = 7.72$$

La reducción de los armónicos se realizó mediante un filtro pasivo con los parámetros de resistencia, inductancia y capacitancia calculados anteriormente el cual, se conectará en la barra de 13.8kV como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Modelamiento del sistema con implementación del filtro pasivo en Digsilents.

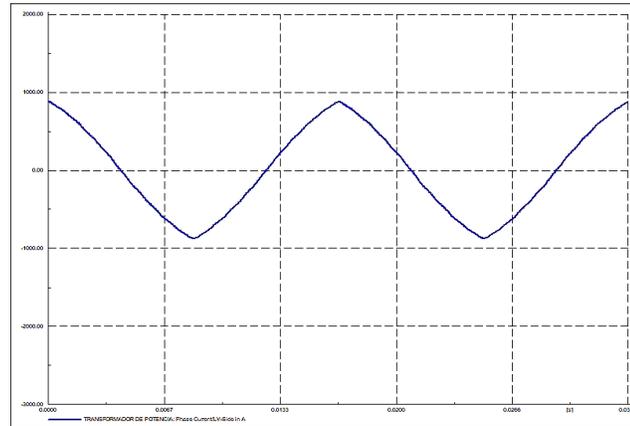


Fuente: DigSilents PowerFactory.

Autores: Grupo investigador.

La influencia que tuvo el filtro de pasivo 10MVA en el transformador de potencia de 20MVA dio el siguiente resultado.

Figura 8. Onda sinusoidal de corriente del transformador con la implementación del filtro pasivo.



Fuente: DigSilents PowerFactory.

Autores: Grupo investigador.

La figura 8 muestra una curva de corriente más acentuada, asemejando a una curva sinusoidal, dando a notar la reducción del pico antes existente, obteniendo los siguientes valores de armónicos como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Cálculos de las pérdidas adicionales en el transformador de potencia con la reducción de armónicos.

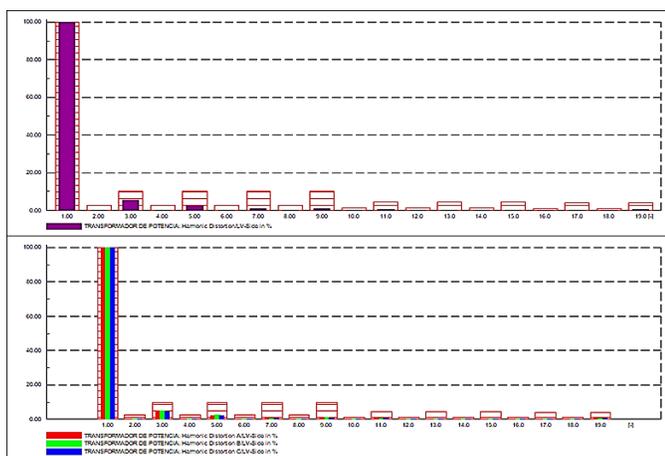
Orden Armónico (h)	$I_h T / IT$	$(I_h T / IT)$	$(I_h T / IT)^2 \cdot h^2$	$h^{0.8}$	$(I_h T / IT)^2 \cdot h^{0.8}$
1	1	1	1	1	1
2	0.0013	1.69E-06	4	1.741101	2.94246E-06
3	0.05111	0.0026122	9	2.408225	0.006290842
4	0.0004	1.6E-07	16	3.031433	4.85029E-07
5	0.0236	0.000557	25	3.623898	0.002018366
6	0	0	36	4.192963	0
7	0.00783	6.131E-05	49	4.743276	0.000290805
8	0	0	64	5.278032	0
9	0.00784	6.147E-05	81	5.799546	0.000356473
10	0	0	100	6.309573	0
11	0.00445	1.98E-05	121	6.809483	0.000134845

12	0	0	144	0	7.300372	0
13	0.00209	4.368E-06	169	0.000738209	7.783137	3.39975E-05
14	0	0	196	0	8.258524	0
15	0.00113	1.277E-06	225	0.000287303	8.727161	1.11437E-05
16	0	0	256	0	9.189587	0
17	0.00078	6.084E-07	289	0.000175828	9.646264	5.86879E-06
18	0	0	324	0	10.0976	0
19	0.00698	4.872E-05	361	0.017588064	10.54394	0.000513705
SUMA (Σ)		1.0033686		1.066611765		1.009659473

Autores: Grupo investigador.

Este nivel armónico se verá reflejado en el espectro armónico como se muestra en la figura 9.

Figura 9. Espectro armónico de corriente con la implementación del filtro pasivo, a) transformador, b) fase A-B-C.



Fuente: DigSilents PowerFactory.
Autores: Grupo investigador.

Se procede a realizar el cálculo de la nueva pérdida total con los valores de armónicos reducidos del transformador, aplicamos las ecuaciones 11, así como también calcular las pérdidas por corrientes de Eddy y adicionales por causa de presencia de armónicos aplicando las ecuaciones 13 y 18.

- Pérdidas por corriente de Eddy más la influencia de armónicos.

$$P_{EC} = P_{EC-R} * \left(1 + \sum_{h=1}^{h=hmax} h^2 \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \right)$$

$$P_{EC} = 1938.09 * (1 + 1.066611869)$$

$$P_{EC} = 4005.28 \text{ (kW)}$$

- Pérdidas adicionales más la influencia de armónicos

$$P_{osl} = P_{osl-R} * \left(1 + \sum_{h=1}^{h=hmax} h^{0,8} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \right)$$

$$P_{osl} = 3934.91 * (1 + 1.009659519)$$

$$P_{osl} = 7907.83 \text{ (kW)}$$

- Pérdidas totales de carga más la influencia de armónicos.

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} + P_{OSL}$$

$$P_{LL} = 55328.650 + 4005.28 + 7907.83 \text{ (kW)}$$

$$P_{LL} = 67241.76 \text{ (kW)}$$

La subestación Tena Norte ubicado en el canto Tena provincia de Napo consta de un transformador trifásico de potencia de una capacidad de 20 MVA con relación de transformación de delta 69kV y estrella con neutro 13,8kV el cual, alimenta a los cantones: Tena, Archidona y las parroquias de Muyuna, San Pablo de Ushpayacu, Cotundo y Hatun Sumaco, tiene una carga conectada aproximada de 12,18MW y una potencia de distorsión 158,75kW. Las mediciones de calidad de energía de potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, distorsión armónica de voltaje, distorsión armónica de corriente, desbalance de líneas, etc. Estas mediciones son realizadas por el mismo departamento técnico de la empresa alrededor de 15 días de cada mes a un intervalo de 10 min como recomienda la normativa de calidad IEC 61000.

Los datos obtenidos de la medición de calidad de energía de distorsión armónica de corriente dieron los siguientes valores como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Datos medidos de niveles de distorsión armónica de corriente.

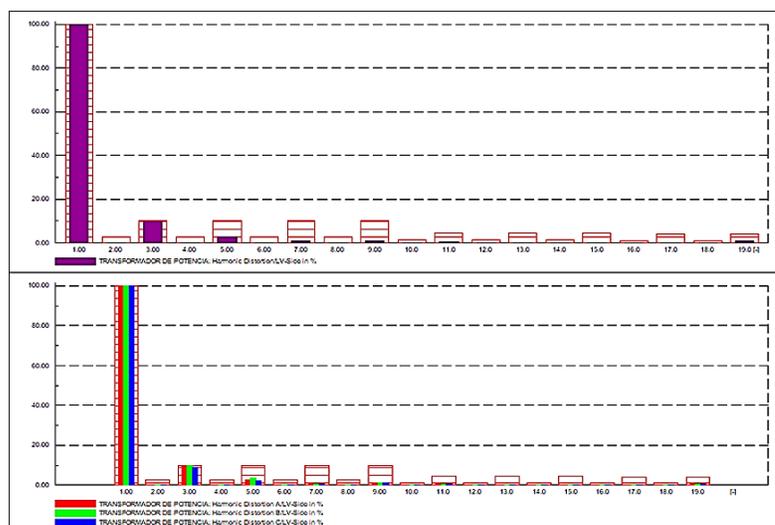
Orden Armónico	I_hA/IA	I_hB/IB	I_hC/IC	I_hT/IT
1	100.82	126.55	116.42	100
2	0.12	0.20	0.12	0.12
3	9.67	9.71	9.02	9.67
4	0.05	0.10	0.03	0.050
5	2.82	3.38	2.35	2.82
6	0.02	0.04	0.03	0.020
7	0.91	0.86	0.59	0.91
8	0.00	0.01	0.01	0.00
9	0.91	1.01	1.00	0.91
10	0.00	0.01	0.00	0.00
11	0.51	0.51	0.56	0.51
12	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.24	0.30	0.25	0.24
14	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.13	0.13	0.13	0.13
16	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.09	0.07	0.07	0.09
18	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.80	0.80	0.80	0.80

Autores: Grupo investigador.

La tabla de distorsión de corriente muestra que los valores están dentro del rango establecidos por la normativa IEEE 519-1992, para los niveles de voltaje de 69kV hasta 120V, el orden de armónicos menores debe de estar por debajo del 10%, $11 \leq h < 17$ el 4.5%, $17 \leq h < 23$ el 4%, $23 \leq h < 35$ el 1.5% y los niveles de orden mayores de 35 el 0.7%, la distorsión armónica total del 12%.

Como se nota los porcentajes de niveles de armónicos están dentro del rango permitido, con una observación, el nivel de armónico de orden 3 es el de mayor magnitud el cual, se muestra en el espectro de armónicos a continuación en la figura 10.

Figura 10. Espectro armónico de corriente aplicando la norma IEEE 519-1992, a) transformador, b) fases A-B-C.

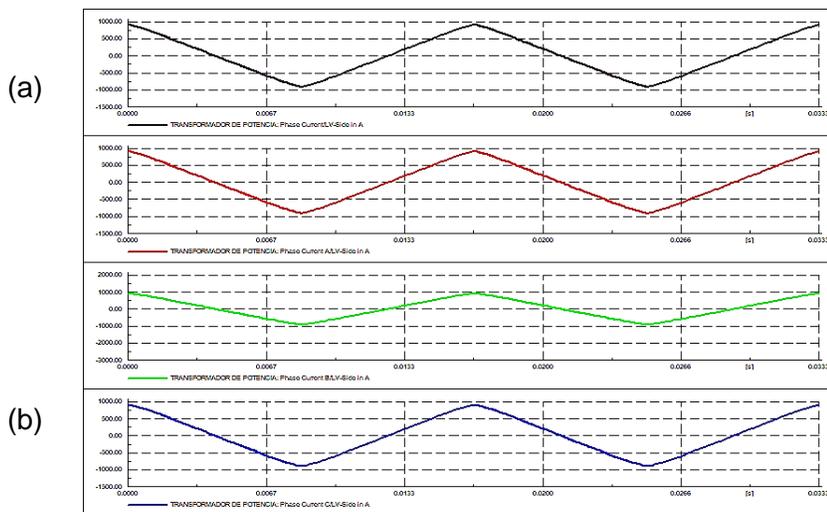


Fuente: DigSilents PowerFactory.

Autores: Grupo investigador.

El nivel de armónico de orden 3 llega a tener el valor de 9.980% llegando casi al límite permitido y esto se ve reflejado en la onda sinusoidal de la corriente como se mira en la figura 11.

Figura 11. a) Corriente del transformador sin reducción de armónicos, b,c,d) Corriente de las fases A-B-C sin reducción de armónicos.



Fuente: DigSilents PowerFactory.
Autores: Grupo investigador.

La onda sinusoidal de corriente en el transformador y en las fases A-B-C se ve afectada por el nivel armónico de orden 3 llegando a tener una deformación de onda tipo triangular, este tipo de onda puede llegar a causar sobrecalentamiento en los conductores afectando así el desgaste del aislamiento y el aumento de pérdidas de potencia óhmicas.

El valor de distorsión armónica de corriente (HD) obtenido en el transformador es 0.794% llegando a tener por fase A-B-C un porcentaje de 0.323%, 0.326% y 0.326%. En distorsión armónica total de corriente (THD) del transformador se obtuvo 2.824% y de cada una de las fases A (0.793%), B (0.866%) y C (0.795%) respectivamente a una frecuencia fundamental de 60Hz con una corriente fundamental de 836.7Amp, cabe mencionar que los valores antes mencionados entran en el rango permitido según las normas IEC 61000 y IEEE 519-1992.

La reducción de armónicos de corriente se planteó la utilización de un filtro pasivo que será conectado en la barra secundaria de 13,8kV deberá establecer una vía de baja impedancia

para la corriente de armónicas de tal forma que circulen por el filtro y no directo al alimentador, este tipo de filtro es el más utilizado para la reducción de armónicos de orden 3, 5, 7 y 9, además por bajo costo de fabricación y fácil instalación.

Con el concepto antes mencionado se realizó el diseño para la disminución del nivel de armónico de orden 3 (180Hz) ya que es donde se nota la mayor magnitud a comparación de los niveles restante. El filtro debe tener las siguientes características una compensación reactiva de 10MVar a un factor de calidad de 20, la construcción debe constar de una capacitancia de 121.771 μ F, una inductancia de 7.265mH y una resistencia de 0.386 Ω el cual, se sintonizará a una frecuencia resonante de 169.2Hz. La implementación de este filtro dio los siguientes resultados como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Valores de nivel de distorsión armónica resultantes por la implementación del filtro pasivo.

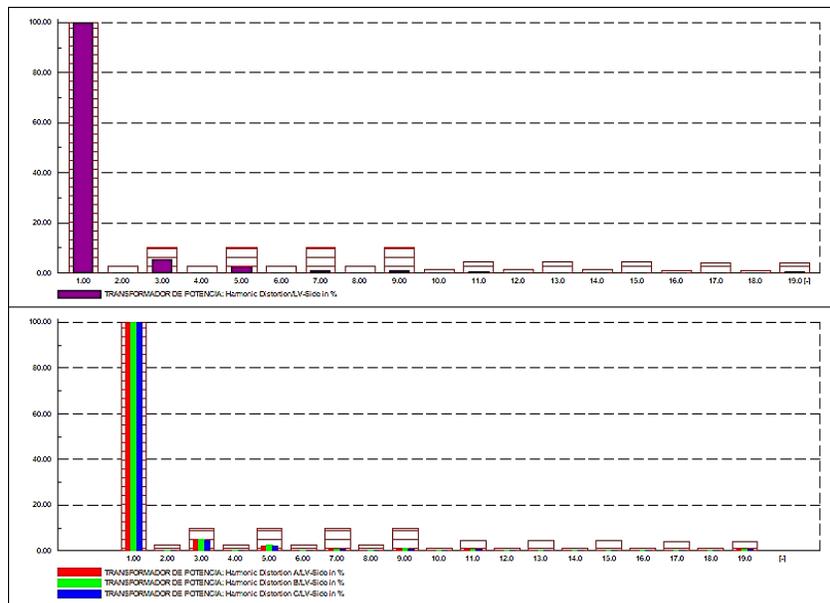
Orden Armónico	$I_h A / I_A$	$I_h B / I_B$	$I_h C / I_C$	$I_h T / I_T$
1	100.82	126.55	116.42	100
2	0.13	0.281	0.131	0.13
3	5.111	5.107	4.685	5.111
4	0.04	0.80	0.024	0.040
5	2.36	2.836	1.974	2.36
6	0.017	0.034	0.025	0.000
7	0.783	0.740	0.505	0.783
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.784	0.952	0.865	0.784
10	0.00	0.087	0.00	0.00
11	0.445	0.445	0.448	0.445
12	0.00	0.00	0.00	0.00

13	0.209	0.261	0.218	0.209
14	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.113	0.114	0.113	0.113
16	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.078	0.078	0.078	0.078
18	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.698	0.698	0.698	0.698

Autores: Grupo investigador.

Como se nota, los porcentajes de niveles de armónicos bajaron un 40% del valor que antes existía sin la implementación del filtro, con la implementación del filtro para el nivel armónico de orden 3 de mayor magnitud se redujo de 9.67% a 5.111%, con estos nuevos valores obtiene un nuevo espectro armónico, se muestra en la figura 12.

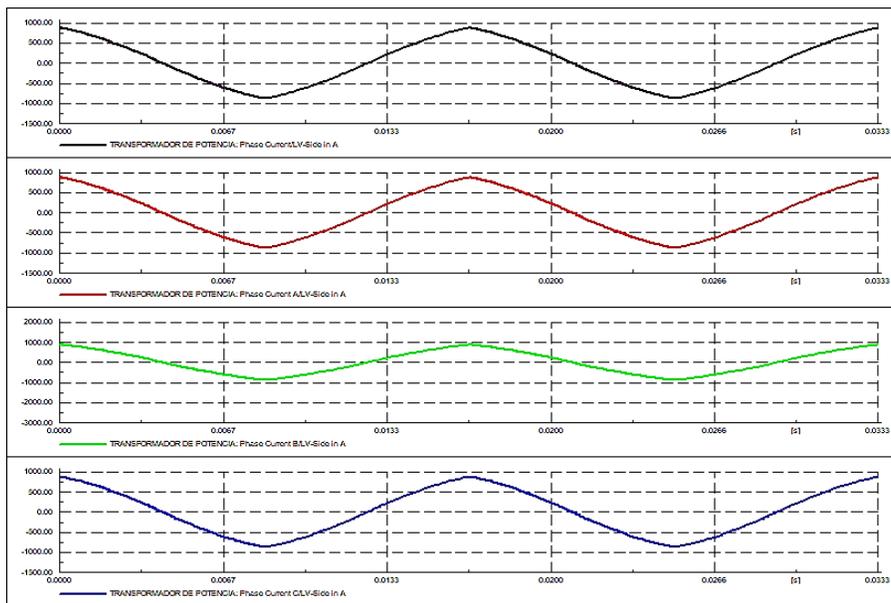
Figura 12. Espectro armónico de corriente aplicando la norma IEEE 519-1992, a) transformador, b) fases A-B-C.



Fuente: DigSilents PowerFactory.
Autores: Grupo investigador.

La reducción de armónicos también se puede ver refleja en la onda sinusoidal de corriente como se muestra en la figura 13.

Figura 13. a) Corriente del transformador sin reducción de armónicos, b,c,d) Corriente de la fase A-B-C con reducción de armónicos.



Fuente: DigSilents PowerFactory.
Autores: Grupo investigador.

En la onda sinusoidal de corriente en el transformador y en las fases A-B-C se puede apreciar una mejora. Este resultado se llega a tener por la implementación del filtro pasivo diseñado, disminuyendo los valores de distorsión armónica corriente (HD) obteniendo lo siguiente: en el transformador del 0.692%, llegando a tener por fase A-B-C un porcentaje de 0.282%, 0.283% y 0.284%. En distorsión armónica total de corriente (THD) del transformador se obtuvo 1.706% y de cada una de las fases A (0.543%), B (0.576%) y C (0.513%) respectivamente.

La presencia de armónicos en la onda sinusoidal de corriente ocasiona pérdidas adicionales en el transformador por causa de la elevación de temperatura que es disipada en forma de calor, llegando a causar el desgaste de los aisladores en los conductores y principalmente en el mismo transformador y por ende una reducción prematura de la vida útil de

operación. Para el cálculo de las pérdidas adicionales en carga en el transformador se debe realizar el cálculo de las pérdidas por corriente de Eddy o también conocidas como pérdidas por corrientes parasitas (P_{EC}), las pérdidas por flujo de dispersión o pérdidas adicionales (P_{OSL}) y las pérdidas por efecto Joule (P_{Ih2R}), con estos datos calculados tenemos los siguientes resultados como se muestra en la tabla 12.

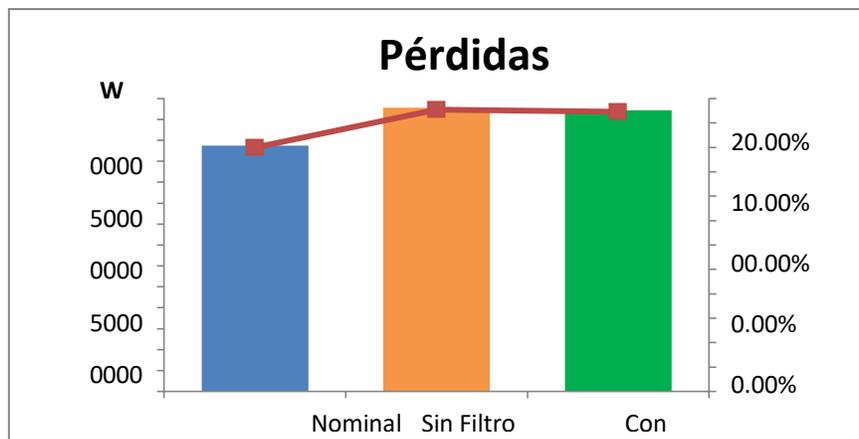
Tabla 12. Pérdidas adicionales de potencia en el transformador.

	P_{Ih2R}	P_{EC}	P_{OSL}	PLL	%
Sin Filtro	55 717.03	4 152.66	7 976.84	67 846.52	15.53%
Con Filtro	55 328.65	4 005.28	7 907.83	67 241.76	14.49%

Autores: Grupo investigador.

Es notable la disminución de pérdidas de potencia que se obtiene al reducir los niveles de distorsión armónica en el transformador, teniendo una pérdida de carga sin la implementación del filtro de 67 846.52 (kW) llegando a tener 15.53% más de pérdida de potencia sobre la nominal, a comparación de la implementación del filtro pasivo se obtiene 67 241.76 (kW), teniendo un ahorro del 1.04% de pérdidas, dando un valor equivalente de 604.76 (kW) de potencia de ahorro como se muestra en la figura 15.

Figura 14. Pérdidas de potencia en carga.



Autores: Grupo investigador.

En todo sistema eléctrico se tiene presente las pérdidas de energía y el costo que afectaría para el mantenimiento de equipos, sistemas y elementos conductores, al tener armónicos inyectados en la red las pérdidas nominales establecidas por los fabricantes llegan a aumentar y en algunos casos a empeorar la calidad de energía.

Los datos de medición de calidad de energía proporcionados por la Empresa Eléctrica de Ambato S.A. fueron analizados con la finalidad de llegar a establecer una reducción de pérdidas de energía en el transformador de potencia de 20MVA de la subestación Tena Norte ya que contiene distorsión de armónicos, cabe recalcar que los niveles de armónicos están dentro de los parámetros permitidos según la norma IEC 61000. Teniendo en cuenta lo anterior mencionado y realizando el cálculo correspondiente se llegó a lo siguiente:

- La pérdida de energía nominal del transformador es de 1 409 520 (kWh).
- La pérdida de energía del transformador sin reducción de armónicos es de 1 628 316.48 (kWh).
- La pérdida de energía del transformador con la reducción de armónicos es de 1 613 802.24 (kWh).

Las pérdidas de energía sin la reducción de armónicos son elevadas a comparación de la pérdida nominal de energía la cual fue diseñada, al reducir los niveles de armónicos se tiene un beneficio de 14 514.24 (kWh), esta energía ya no afectaría al transformador en forma de pérdidas de calor ni se llegaría a tener un acelerado desgaste del aislamiento en el devanado y en los elementos conductores aumentando la vida útil del transformador.

La implementación del filtro pasivo propuesto tiene un costo aproximado de \$34 160 como se indica en el anexo 10, de compensación reactiva 10MVAR a un factor de calidad de 20, una capacitancia de 121.771 μ F, inductancia de 7.265mH y resistencia de 0.386 Ω . Este filtro garantiza

una reducción de armónicos del 40% acentuando la señal sinusoidal de corriente y mejorando la eficiencia de rendimiento de operación del transformador de potencia.

Conclusiones

En la actualidad en la mayoría de nuestros hogares contamos con cargadores para cualquier equipo eléctrico ya sea, televisores led de pantalla plana, consolas de videojuegos, lámparas led, etc. En caso de centros comerciales e industrias que constan de motores de inducción que son controlados con variadores de frecuencia, soldadoras eléctricas, hornos eléctricos, aires acondicionados, etc. Estos equipos llegan a inyectar corrientes de armónicos a la red llegando a ser la principal causa de la deformación de las ondas sinusoidales de corriente y voltaje.

Las mediciones de distorsión armónica proporcionadas por “E.E.A.S.A.” del transformador de potencia de 20MVA, los cuales, se ingresaron en el software Digsilent Power Factory, facilitando el análisis del comportamiento de la red con la influencia armónicos que son inyectados, dando como resultado el espectro armónico y las gráficas de onda sinusoidal de corriente y voltaje del sistema eléctrico. El diseño del filtro pasivo propuesto para la reducción del nivel armónico de mayor magnitud en este caso de orden 3 el cual, será necesario de una compensación reactiva de 10 MVar a un factor de calidad de 20, la construcción debe constar de una capacitancia de $121.771\mu\text{F}$, una inductancia de 7.265mH y una resistencia de 0.386Ω a una frecuencia resonante de 169.2Hz.

El diseño del filtro pasivo cumplió con el objetivo de reducir la distorsión armónica que contenía el transformador de potencia reduciendo el contenido armónico de 2.824% de THD existente a un 1.706% de THD.

La disminución de las pérdidas de energía en el transformador de potencia a causa del contenido armónica de corriente se redujo a 1 613 802.2448 (kWh) al implementar el filtro pasivo, en este caso la pérdida de energía nominal del transformador es de 1 409 520 (kWh) y al obtener

distorsión armónica se tiene 1 628 316.48 (kWh), teniendo un beneficio en energía de 14 514.24 (kWh) el cual, esta energía ya no afectará directamente al transformador y a los elementos propios del mismo.

Referencias Bibliográficas

- Ezomar, U. (2015). "Estudio de los fenómenos armónicos en la Subestación Melones Oeste de PDVSA en distrito de San Tóme," Petróleos Venez. S.A., pp. 1–7,
- Rojas, E. (2011). "Generalidades sobre los armónicos y su influencia en los sistemas de distribución de energía," pp. 1–33.
- Electronics, P. (2019). "Armónicos en Sectores Industriales," pp. 1–10.
- Ricardo, N. (203). "La tendencia del factor de cresta ayuda a detectar eventos nacientes; circuito electrónico, programas y aplicaciones a señales de diversos campos," Ing. Investiga. y Tecnol., pp. 1–19, 2013, doi: 10.1016/s1405- 7743(15)30007-x.
- Circutor. (2014). "Procedimientos para el Estudio y Análisis de Perturbaciones Armónicas -," Div. PFC, pp. 1–20.
- Gómez, J. Quispe, E. Reyes, R. Sousa, V. Viego, P. (2014). "Influencia de los armónicos de corriente sobre las pérdidas en los transformadores de distribución monofásicos con derivación central," El Hombre y la Máquina, pp. 1–12.
- Montoya D. (2016). "Mitigación del nivel de armónicos en un sistema eléctrico industrial mediante un filtro de armónicos pasivo," Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop., pp. 1–8, 2016.
- Castillo, P. (2014). "COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA (EMC) - PARTE 2- 2: MEDIO AMBIENTE - Los niveles de compatibilidad de baja frecuencia perturbaciones conducidas y señalización en los sistemas de alimentación de baja tensión (iec 61000-2- 2:2002, idt)," inen, vol. 2, no. 1, p. 10.
- CONELEC. (2001). "Regulación 004/01-Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución." pp. 1–25.
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, (2007). "Subestación Tena Norte," noviembre, 2007.
- Márquez, M.& Molina, G. (2013). "Evaluación de la vida útil del aislamiento en transformadores de potencia a partir del ciclo térmico," p. 119.
-