



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACION PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO SOBRE LA
EFICIENCIA QUE PROVOCAN LOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS EN UNA
INSTALACIÓN INDUSTRIAL MEDIANTE SIMULACIÓN CON IMPLEMENTACIÓN DE UN
MODELO A PEQUEÑA ESCALA**

Eduardo José Mendoza Estrada

Asesorado por el MBA, MSc, Ing. German Antonio Juárez Vidaurre

Guatemala, mayo de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO SOBRE LA
EFICIENCIA QUE PROVOCAN LOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS EN UNA
INSTALACIÓN INDUSTRIAL MEDIANTE SIMULACIÓN CON IMPLEMENTACIÓN DE UN
MODELO A PEQUEÑA ESCALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

EDUARDO JOSÉ MENDOZA ESTRADA

ASESORADO POR EL MBA, MSC. ING. GERMAN ANTONIO JUÁREZ
VIDAURRE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MAYO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Inga. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO SOBRE LA EFICIENCIA QUE PROVOCAN LOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS EN UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL MEDIANTE SIMULACIÓN CON IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO A PEQUEÑA ESCALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 24 de noviembre de 2020.

Eduardo José Mendoza Estrada

Ref. EEPFI-1568-2020
Guatemala, 24 de noviembre de 2020

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: EVALUACIÓN DEL IMPACTO SOBRE LA EFICIENCIA QUE PROVOCAN LOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS EN UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL MEDIANTE SIMULACIÓN CON IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO A PEQUEÑA ESCALA**, presentado por el estudiante **Eduardo José Mendoza Estrada** carné número **201344707**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

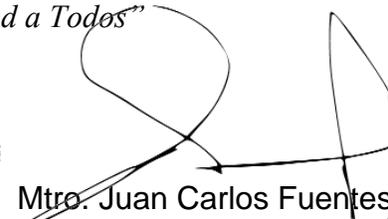
Atentamente,



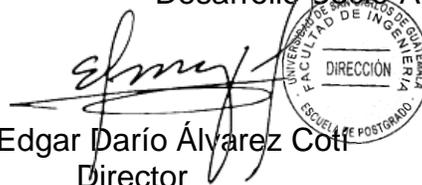
Mtro. German Antonio Juárez Vidaurre
Asesor

German Antonio Juárez Vidaurre
MBA. MSc. Ingeniero Electricista
Colegiado No. 7512

"Id y Enseñad a Todos"



Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Área
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-035-2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **EVALUACIÓN DEL IMPACTO SOBRE LA EFICIENCIA QUE PROVOCAN LOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS EN UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL MEDIANTE SIMULACIÓN CON IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO A PEQUEÑA ESCALA**, presentado por el estudiante universitario Eduardo José Mendoza Estrada, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



Guatemala, noviembre de 2020

DTG. 190.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACION PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO SOBRE LA EFICIENCIA QUE PROVOCAN LOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS EN UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL MEDIANTE SIMULACIÓN CON IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO A PEQUEÑA ESCALA**, presentado por el estudiante universitario: **Eduardo José Mendoza Estrada**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabeia Cordova Estrada
Decana



Guatemala, mayo de 2021.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICADO A:

Mi madre

Magda Erenia Estrada Molina.

AGRADECIMIENTOS A:

Magda Estrada

Por todo su amor, sacrificio, comprensión, y apoyo brindado a lo largo de mi vida.

Oscar Muñoz y familia

Por su invaluable apoyo y amistad en los años de estudio.

Otoniel Ramirez

Por su excelente ejemplo, amistad y confianza brindado en mi desarrollo profesional.

Isabel López

Por compartir su pasión por la investigación.

Cesar Rivera, Leonardo Esaú y Denis Hernández

Por ser una importante influencia para el ingreso y desarrollo en mi carrera.

Edgar Diéguez

Por ser un excelente y fundamental amigo, compañero de proyectos y una persona confiable.

Amigos

Yuneidi Contreras y Carlos Escobar, por su muy apreciada amistad y animo brindado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	XII
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3.1. Contexto general	7
3.2. Descripción del problema	9
3.3. Formulación del problema	11
3.4. Delimitación del problema	12
4. JUSTIFICACIÓN	13
5. OBJETIVOS	15
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN	17
7. MARCO TEÓRICO.....	19
7.1. Eficiencia y pérdidas energéticas	19
7.2. Inversores fotovoltaicos	19
7.3. Problemas asociados a armónicos	20

7.3.1.	Transformadores eléctricos	20
7.3.2.	Capacitores	21
7.4.	Pérdidas en transformadores eléctricos	22
7.4.1.	Pérdidas no debidas a la carga en transformadores eléctricos	22
7.4.2.	Pérdidas debidas a la carga en transformadores eléctricos	24
7.5.	Aislamiento dieléctrico.....	26
7.5.1.	Tangente delta y factor de disipación.....	28
7.5.2.	Pérdidas debidas a la distorsión armónica en tensión de los capacitores	28
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	31
9.	METODOLOGÍA	35
9.1.	Características del estudio	35
9.2.	Unidades de análisis	36
9.3.	Hipótesis	36
9.4.	Variables	36
9.5.	Fases del estudio	38
9.5.1.	Fase 1: revisión de literatura	38
9.5.2.	Fase 2: gestión o recolección de la información mediante simulación real a pequeña escala.....	39
9.5.3.	Fase 3: modelado matemático del inversor y su distorsión aportada.....	40
9.5.4.	Fase 4: modelar las amplificaciones de armónicos en función de la distorsión adicional aportada por el inversor.....	40

9.5.5.	Fase 5: modelar el aumento de pérdidas en los bancos de compensación reactiva en función de la distorsión adicional aportada por el inversor.....	41
9.5.6.	Fase 6: modelar el aumento de pérdidas en los transformadores de distribución en función de la distorsión adicional aportada por el inversor.	41
9.5.7.	Calcular reducción de la eficiencia	41
9.5.8.	Análisis del modelo matemático, el cual se validará con la información recolectada en la fase 2.....	42
9.5.9.	Interpretación de información	43
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS	45
11.	CRONOGRAMA.....	47
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	49
13.	REFERENCIAS.....	51
14.	APÉNDICES.....	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Árbol de problemas	10
2.	Esquema de solución	17
3.	Corrientes en un aislamiento.....	27
4.	Circuito dieléctrico imperfecto: (a) circuito en serie; (b) circuito paralelo	27
5.	Datos técnicos de un capacitor	29
6.	Modelo experimental	39
7.	Cronograma de actividades	47

TABLAS

I.	Definición teórica y operativa de variables	37
II.	Recursos necesarios	49

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
P_m	Cantidad medida de pérdidas energéticas no debidas a la carga en un transformador eléctrico bajo condiciones de laboratorio con tensión puramente sinusoidal.
C	Capacitancia.
d	Coeficiente empleado por IEC para cálculo de pérdidas no debidas a la carga en función de las pérdidas medidas a tensión puramente sinusoidal y los voltajes $V_{avg-rms}$ y $V_{avg-rms}$.
k	Coeficiente empleado por IEEE para cálculo de pérdidas no debidas a la carga en función de las pérdidas medidas a tensión puramente sinusoidal y los voltajes $V_{avg-rms}$ y $V_{avg-rms}$.
π	Constante numérica con valor 3.14159265359
I_h	Corriente armónica del orden h .
I_H	Corriente en el devanado de mayor voltaje.

I_x	Corriente en el devanado de menor voltaje.
I_1	Corriente fundamental.
THD	Distorsión armónica total.
F_{HL}	Factor armónico de pérdidas para las corrientes parásitas en los devanados.
F_{HL-STR}	Factor armónico de pérdidas por dispersión.
f_i	Frecuencia del orden i .
h	Orden armónico.
P_{OSL}	Pérdidas energéticas debidas a la dispersión en herrajes, sujeciones, tanque, y accesorios.
P_{CT}	Pérdidas energéticas debidas a la carga en un capacitor.
P_{LL}	Pérdidas energéticas debidas a la carga en un transformador eléctrico.
P_{EC}	Pérdidas energéticas debidas a las corrientes parásitas en los devanados.

P_1	Pérdidas energéticas en el núcleo debido a la histéresis.
P_2	Pérdidas energéticas en el núcleo debido a las corrientes parásitas.
P_{NL}	Pérdidas energéticas no debidas a la carga o pérdidas en vacío en un transformador eléctrico.
P_{DC}	Pérdidas energéticas por corriente directa o debidas al efecto Joule.
P_{TSL}	Pérdidas energéticas totales debidas a la dispersión.
P_T	Pérdidas energéticas totales en un transformador eléctrico.
T	Periodo de una onda de voltaje o de corriente.
Q_i	Potencia reactiva a frecuencia de orden i .
Q_{f_0}	Potencia reactiva a frecuencia fundamental.
A	Proporcionalidad de las pérdidas por efecto Joule y la dispersión total.
R_H	Resistencia en el devanado de mayor voltaje.
R_x	Resistencia en el devanado de menor voltaje.

R_s	Resistencia serie.
Σ	Sumatoria.
$\tan(\delta_i(f))$	Tangente delta a frecuencia de orden i
$\tan(\delta_{f_o})$	Tangente delta a frecuencia fundamental.
V_{rms}	Valor raíz cuadrático de una onda sinusoidal o armónica.
$V_{ex}(t)$	Voltaje con el cual se excita al transformador eléctrico en función del tiempo.
V_1	Voltaje de la componente fundamental.
V_k	Voltaje del armónico de orden k .
$V_{avg-rms}$	Voltaje promedio de un voltaje rms.

GLOSARIO

Aislamiento	Elemento o medio el cual tiene una capacidad muy baja de transportar corriente eléctrica.
Causalidad	Principio u origen de alguna cosa.
<i>Desmesurado</i>	Que carece de medida, es exagerado o que se produce de manera no cuantificable.
Distorsión armónica	Medida del espectro de frecuencia que involucra una señal real de voltaje o corriente eléctrica.
Histéresis	Es la tendencia de un material a conservar alguna propiedad en ausencia del estímulo que la generó.
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional.
<i>IEEE</i>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
Inrush	Corriente máxima instantánea de energización.
Reactancia	Es la oposición al paso de la corriente eléctrica que presenta los capacitores e inductores.

Resonancia	Típicamente se considera así a la frecuencia a la cual la reactancia inductiva se iguala a la reactancia capacitiva.
SO(1)	Sistema referencial que solo depende del tiempo y no de su ubicación .
Suministro	Servicio eléctrico el cual comprende el conjunto de medios y elementos útiles para efectuar actividades de generación, transporte y distribución de energía eléctrica.

RESUMEN

Se realizó un diseño de investigación cuyo propósito es formular la evaluación del impacto sobre la eficiencia que provocan los inversores fotovoltaicos en una instalación industrial, a tal efecto se empleará mediciones efectuadas por 5 analizadores de red mediante implementación de un modelo experimental. Los resultados de la implementación de la investigación permitirán contrastar las mediciones experimentales con modelos teóricos mediante los cuales posteriormente se podrá conocer condiciones operativas críticas o que originan condiciones críticas para el funcionamiento normal de los equipos involucrados y se podrá estimar la eficiencia en base a aspectos constructivos, la distorsión armónica medida y otros parámetros eléctricos proporcionados por un analizador de red.

1. INTRODUCCIÓN

Este estudio está contenido en la sección “Estimación de la eficiencia energética en proyectos con recursos renovables” perteneciente a la línea de investigación “Eficiencia energética en el sector público, empresarial y domiciliario”, con delimitación del tema en instalaciones industriales con paneles fotovoltaicos. El trabajo de investigación tiene una perspectiva exploratoria de como se ve afectada una instalación eléctrica que contenga paneles fotovoltaicos debido a las pérdidas esperadas (nominales) y las pérdidas adicionales por espectro de frecuencia (producidas por la distorsión armónica adicional aportada por los inversores fotovoltaicos).

La investigación tiene como consideración más importante la evaluación de las pérdidas adicionales las cuales son provocadas por la distorsión armónica aportada por los inversores DC/AC, los cuales provocarán resonancias en los bancos de compensación reactiva y esto a su vez amplificará la distorsión armónica, dando como consecuencia aumento de pérdidas en los bancos de compensación reactiva y aumento de pérdidas en los transformadores que suministren energía a la instalación mediante corriente armónica o que inyectan energía a la red con distorsión armónica en tensión.

Es importante abordar la investigación debido a que los resultados brindarán una perspectiva de la relevancia de la consideración de las pérdidas adicionales en las instalaciones con paneles fotovoltaicos, de las posibles futuras consecuencias en el sistema de distribución si la cantidad de sistemas fotovoltaicos crece de manera descontrolada. Lo cual dará como beneficio una reducción en el aumento de pérdidas comparado a no efectuar control sobre el

crecimiento de dichos sistemas. Las conclusiones de este estudio podrían utilizarse como referencia del estado del arte para la implementación de una normativa que regule el crecimiento de la generación fotovoltaica en Guatemala

El estudio es viable ya que se cuenta con los dispositivos necesarios con los cuales se ensayará mediante una simulación a pequeña escala, se cuenta con las referencias necesarias y los resultados aportan al desarrollo de la generación distribuida en Guatemala de tal manera que se pueda prevenir un aumento en las pérdidas en la red de distribución y esto repercuta en los precios de facturación de usuarios finales.

La investigación, abarca los conceptos generales sobre los dispositivos involucrados (inversores fotovoltaicos, bancos de compensación reactiva y transformadores eléctricos) que se desarrollarán en la primera sección, donde también se describirían los principios de funcionamiento. En la siguiente sección se describiría como se producen las pérdidas adicionales en los transformadores debido a la distorsión armónica, basado en resultados de ensayos de fabricación o de aceptación y aspectos constructivos. También se describiría como se producen las pérdidas adicionales en los bancos de compensación reactiva basado en resultados del ensayo factor de disipación y la distorsión armónica. En la siguiente sección se describe como se producen las amplificaciones de distorsión armónica y la posible forma de reducir las amplificaciones. En la siguiente sección se presenta una simulación de un sistema típico para validar las evaluaciones de pérdidas adicionales.

En la sección final se describiría como se propaga la distorsión armónica a la red del distribuidor y las consecuencias que dicha propagación ocasionará si no se tiene un control del crecimiento de los sistemas fotovoltaicos en Guatemala.

2. ANTECEDENTES

IEEE en su estándar C57.110, desde 1998 hasta la versión vigente del 2018 ha estudiado cómo se comporta la distribución de densidad de pérdida dentro de cada uno de los devanados de un transformador cuando suministra energía a carga no lineal. Se tiene actualmente dos tipos de métodos, el primero emplea datos de informes de pruebas del transformador (más exacto) o con parámetros estadísticos (menos exacto), también se aclaran los requisitos para especificar nuevos transformadores para el suministro de carga no lineal.

Asaad A. Elmoudi demostró que los métodos de IEEE C57.110 son muy acertados cuando no se consideran las frecuencias altas, y en su tesis doctoral (Elmoudi Asaad, 2006) propone un método basado en aspectos constructivos, los cuales reflejan resultados con mejor correlación comparando el método teórico con mediciones, evidenciado en Lemozy, Vinson, y Jurado, (2016). Lo cual provocó actualizaciones de la normativa (IEEE C57.110, 2018) agregando el modelo propuesto por Elmoudi.

Blas, (2015) concluye en su estudio que la interacción entre fuentes armónicas (aerogeneradores y fotovoltaicos) con las redes de transmisión puede ocasionar amplificaciones de corrientes armónicas, lo cual también ocurre en los sistemas de distribución.

Desde 1992 el estándar 18 de IEEE, la versión vigente (IEEE 18, 2012), brinda parámetros de fabricación de capacitores, así como la evaluación de las pérdidas nominales de los capacitores en función de un ensayo llamado tangente delta o factor de disipación. Vicuña (2010), brinda una referencia de cómo

interpretar y cuantificar los aumentos de pérdidas en bancos de compensación reactiva en presencia del espectro de frecuencia que contemple la distorsión armónica en tensión, presente en la instalación que lo contemple, empleando los datos de tangente delta o factor de disipación en función de la frecuencia.

La tecnología en la cual se basa cualquier inversor es modular tensiones DC de manera tal que el valor eficaz de dicha modulación de como resultado una forma de onda semejante a una tensión sinusoidal, de esa cuenta por tener inversores conectados en la instalación se está inyectando distorsión armónica al sistema eléctrico.

Pese a que CNEE, (1999) reglamenta los límites de distorsión tolerables para las instalaciones industriales, esta norma solo penaliza económicamente, sin embargo, no brinda criterios de como solventar la situación.

El estándar 519 de IEEE desde 1992 brinda evidencias en instalaciones eléctricas sobre fenómenos asociados a la distorsión armónica y propone límites de distorsión basados en criterios más técnicos como la capacidad de corto circuito para tener un mejor control de la relevancia de la distorsión, la versión vigente (IEEE 519, 2014) se considera como recomendada mas no obligatoria.

Es relevante que la norma guatemalteca CNEE, (1999) contempla una adaptación un poco escueta de estándares internacionales como (IEEE 519, 2014) o estándares como (IEC 61000-2-4, 2002), en sus primeras versiones, por lo cual un crecimiento de la generación distribuida mediante paneles fotovoltaicos puede no considerarse tan relevante como debería.

El estudio Fortes, Buzo, y de Oliveira (2020), señalo indicios de los problemas asociados a la distorsión armónica aportada por los inversores a la

red de distribución en función de su carga, relacionados a los dispositivos involucrados en los propósitos de estudio de esta investigación.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Contexto general

Con el paso del tiempo a medida que la era electrónica se abría paso en el desarrollo de actividades industriales, se empezó a evidenciar calentamiento excesivo en los transformadores eléctricos, lo cual generó la necesidad de estudiar las causas de dichos calentamientos, esto a su vez dio como resultado que se evaluara la carga armónica de un transformador para predecir la temperatura del punto más caliente del transformador lo cual se utilizaría para dar una idea de que potencia debería suministrar dicho transformador para no sobrepasar la temperatura que soporte su aislamiento, sin deteriorarlo y consecuentemente evitar las fallas de aislamiento originadas por dichas elevaciones de temperatura.

Debido a la consideración de que los transformadores y conductores representan reactancia inductiva la cual se conecta a capacitores para mejorar el factor de potencia da origen a que pueda existir resonancias si el voltaje tuviera la frecuencia de resonancia de estos elementos, algo que tiende a ocurrir cuando se tiene armónicos en la red, por lo cual al agregar generación mediante paneles fotovoltaicos introduce una distorsión armónica mediante los inversores DC/AC, que hace posible las resonancias, esto a su vez amplifica la distorsión armónica, produciendo elevación de temperatura en capacitores, dando como resultado que las pérdidas de energía asociadas a los capacitores aumenten.

Por tal razón mientras se esté generando energía mediante paneles fotovoltaicos se tendrá un aumento en las pérdidas energéticas, las cuales para

la red de distribución crecerán a medida que aumente el número de instalaciones que los contengan.

Se ha estudiado la distorsión armónica en dichas instalaciones Fortes, Buzo, y de Oliveira (2020), en la cual se concluye que los inversores fotovoltaicos inyectan alto contenido de armónicos cuando trabajan con potencias de hasta el 20 % de su capacidad nominal. Además, se verifica que los inversores inyectan un mayor nivel de corriente DC cuando trabajan con potencia cercana a su capacidad nominal.

En dicho estudio se menciona que posteriormente, se llevaron a cabo investigaciones que demostraron que la corriente DC inyectada por los inversores fotovoltaicos puede alterar las características operativas de los transformadores de distribución, lo cual da como consecuencia producir frecuencias armónicas no propias de su principio operativo. Lo antes mencionado significa que los inversores fotovoltaicos también contribuyen indirectamente a la inyección de corriente armónica cuando funcionan con una potencia cercana a su capacidad nominal. Lo cual incluye niveles de distorsión hasta dentro de los límites que bajo regulación son considerados como permitidos, adicionalmente las corrientes armónicas pueden llevar al sistema a la condición de resonancia en paralelo. Además, los resultados de la simulación evidenciaron que el banco de capacitores excedió sus límites permitidos como resultado de la condición operativa crítica, lo que podría dañar o reducir la vida útil del banco de capacitores.

Por lo antes mencionado, y bajo el conocimiento de que no se tiene resultados que cuantifiquen las pérdidas o por lo menos que para el autor de este documento no existe una referencia que estudie la evaluación de pérdidas energéticas del sistema propuesto, por lo cual a priori se puede considerar que

los resultados serán un aporte para optimizar energéticamente dichos sistemas y para futuros estudios relacionados al tema.

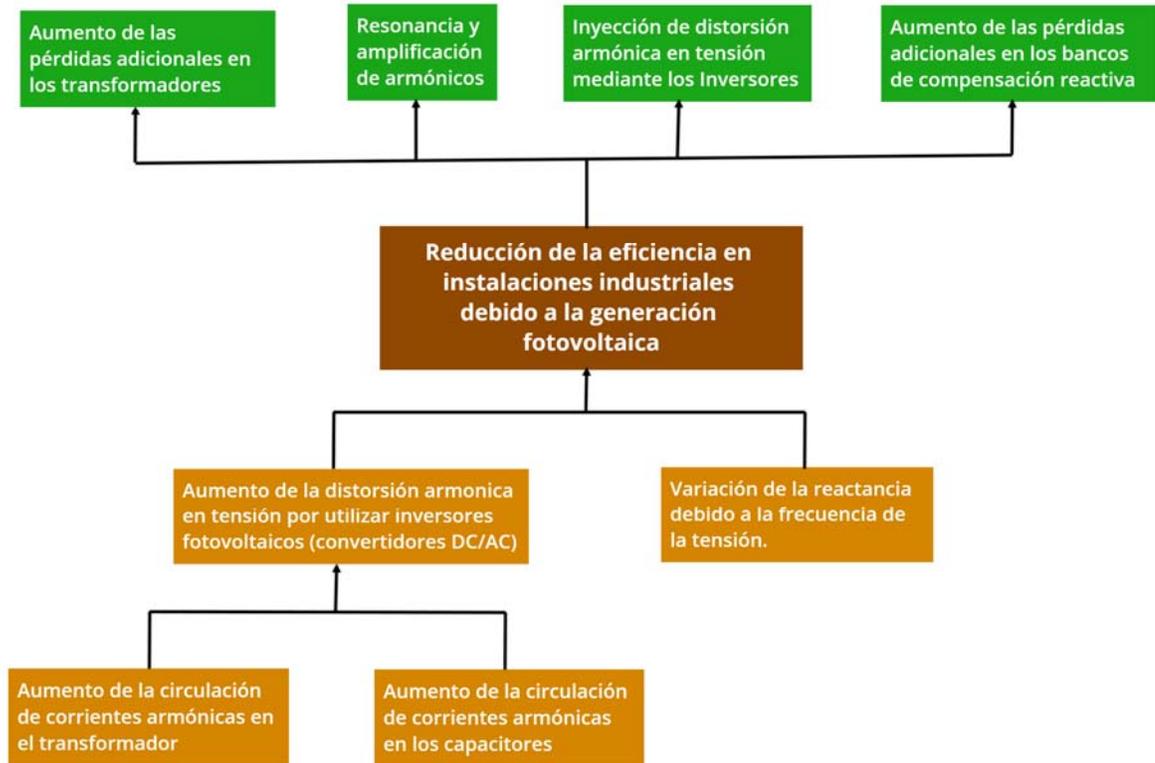
3.2. Descripción del problema

El problema observado es el aumento de pérdidas de energía en las instalaciones industriales con paneles fotovoltaicos, lo cual afecta directamente a la eficiencia de dicha instalación y hace que las pérdidas en la red de distribución aumenten en proporción a la cantidad de sistemas de generación fotovoltaicos.

Las causas identificadas son, la variación de la reactancia debido a la frecuencia de la tensión del punto donde se conectan los capacitores, principalmente el utilizar inversores fotovoltaicos, el aumento de la circulación de corriente armónica en los transformadores y en los capacitores. Las consecuencias son la inyección de distorsión armónica adicional aportada por los inversores, las resonancias y la amplificación de los armónicos y el aumento de pérdidas adicionales en transformadores y capacitores.

Mediante el siguiente esquema se identificaron las posibles causas y consecuencias del problema a investigar.

Figura 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

3.3. Formulación del problema

Para realizar el presente estudio se propone la siguiente pregunta central ¿Cuál es el impacto sobre la eficiencia que provocan los inversores fotovoltaicos en una instalación industrial?, para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares.

- ¿Cómo se compone la distorsión armónica que aporta el inversor a la instalación en función de su porcentaje de carga?
- ¿Qué influencia tiene la amplificación de los armónicos con las resonancias?
- ¿Cómo aumenta de la disipación de energía en capacitores producida por la distorsión armónica adicional de los inversores?
- ¿Cómo aumentan las pérdidas en los transformadores de distribución por la distorsión adicional de los inversores?

Con la primera pregunta se conocerá como aporta la distorsión en función de que cantidad de energía aporte a la red. Con la segunda pregunta se determinaría como afecta a la amplificación de la distorsión las resonancias que se originan de la existencia de la distorsión obtenida de la primera pregunta. Con la tercera y cuarta pregunta se determinará como aumentarán las pérdidas energéticas debido a los resultados de la amplificación la cual será resultado de la pregunta dos. Esto permitirá evaluar las pérdidas adicionales más relevantes y por ende cuantificar la reducción de eficiencia.

3.4. Delimitación del problema

El estudio solo contempla las instalaciones industriales que contengan generación de energía mediante paneles fotovoltaicos. Aunque no se discriminan las instalaciones que no son del tipo industrial por la naturaleza del estudio, no tiene mucha relevancia si no se tiene bancos de compensación reactiva, sin embargo, la distorsión armónica afecta directamente al sistema de distribución por lo cual no es indiferente las instalaciones residenciales y del sector público.

Por la naturaleza del estudio la geografía no toma relevancia. No se estudia los efectos producidos en los sistemas de transmisión ni en los sistemas de generación tradicional debido a que el estudio toma relevancia por el tendiente cambio en pro de la generación distribuida, que toma como principal escenario la red de distribución. Tampoco se profundizará en las pérdidas nominales debido a que son las pérdidas si consideradas normalmente.

4. JUSTIFICACIÓN

Se desea seguir la línea de investigación “2 eficiencia energética en el sector público, empresarial y domiciliar” específicamente en la sección b, estimación de la eficiencia energética en proyectos con recursos renovables, porque el mercado tiende al cambio con relevancia de la generación distribuida renovable y esto hace necesarios los estudios técnicos.

Realizar el estudio permitirá conocer principalmente los efectos sobre la eficiencia que produce la distorsión armónica tomando como principales partes relacionadas los inversores de paneles solares, los transformadores eléctricos de distribución y los bancos de compensación reactiva, así como criterios técnicos que ayuden a minimizar dichos efectos. El estudio podría dar una visualización de cómo debe ser el crecimiento ordenado de una red de distribución con GDRs y usuarios autoprodutores con excedentes de energía para que la distorsión armónica no involucre aumento de pérdidas demasiado elevadas, o daños a equipos eléctricos de otros segmentos de la red.

A nivel normativo puede obtenerse criterios técnicos que deberían de cumplir los dueños de instalaciones que contemplen generación de electricidad mediante paneles fotovoltaicos y con esto evitar que los usuarios finales terminen pagando un aumento de pérdidas tan elevado con lo cual se beneficia a la sociedad guatemalteca. También a nivel normativo, se obtendrían eliminaciones o reducciones de sanciones económicas por incumplimiento a la norma Técnica del Servicio de Distribución, referente al factor de potencia y tolerancia a distorsión armónica individual y total.

5. OBJETIVOS

General

Evaluar el impacto sobre la eficiencia que provocan los inversores fotovoltaicos en una instalación industrial.

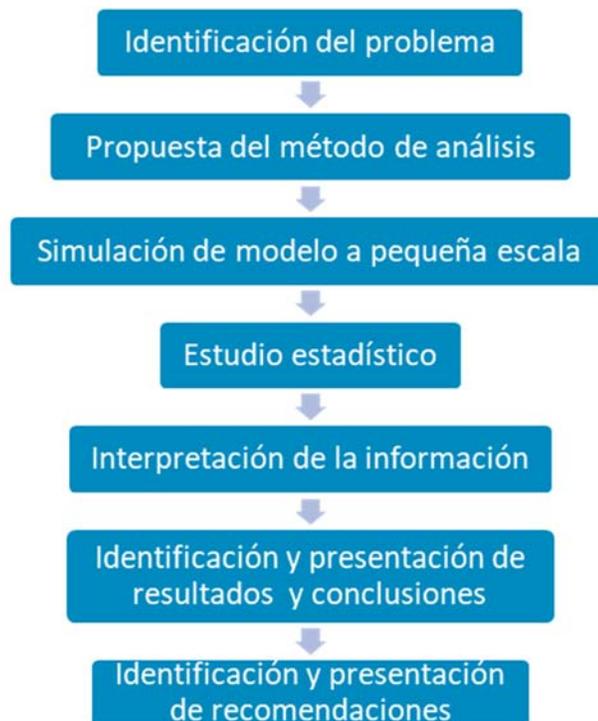
Específicos

- Determinar la composición de la distorsión armónica que aporta el inversor a la instalación en función del porcentaje de carga del inversor.
- Establecer la influencia y el mecanismo físico que origina las resonancias en las amplificaciones de los armónicos.
- Estimar el aumento de la disipación de energía en capacitores producida por la distorsión armónica adicional de los inversores.
- Calcular el aumento de las pérdidas en los transformadores de distribución por la distorsión adicional de los inversores.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN

Se requiere estudiar el impacto sobre la eficiencia producido por las pérdidas energéticas adicionales que se originan o se amplifican debido a la interacción de los transformadores eléctricos, bancos de compensación reactiva e inversores fotovoltaicos y así evaluar las pérdidas de energía por efecto de la distorsión armónica en una instalación con paneles fotovoltaicos. También se requiere establecer criterios técnicos para un crecimiento ordenado de un sistema de generación distribuido.

Figura 2. **Esquema de solución**



Fuente: elaboración propia.

7. MARCO TEÓRICO

El problema que se desea tratar en el presente estudio es sobre cómo afecta a la eficiencia de una instalación eléctrica industrial el tener un sistema de generación fotovoltaico conectado eléctricamente en baja tensión, ya que típicamente por la naturaleza de dicha instalación tiende a verse la necesidad de corrección de factor de potencia, lo cual involucra bancos de capacitores.

En el desarrollo teórico del estudio propuesto involucra conceptualizar como se ve afectado un transformador eléctrico de distribución debido a suministrar corriente armónica a la carga conectada, y de cómo se ve afectada por la amplificación de la distorsión armónica debido a las micro resonancias producidas en los capacitores debido a la distorsión armónica en tensión que producen los inversores del sistema de generación fotovoltaico.

7.1. Eficiencia y pérdidas energéticas

El ahorro y la eficiencia energética lo describe Schallenberg Piernavieja Izquierdo, Hernández, Unamunzaga, García, Díaz y Subiela (2008), como efectuar un gasto de energía menor del habitual, lo cual corresponde a reducir el consumo de energía mediante actuaciones correctas, sin sacrificar el confort.

7.2. Inversores fotovoltaicos

Según Hart, (2001) el inversor es un circuito electrónico de potencia convertidor DC/AC en el cual la potencia fluye desde su entrada en corriente

continúa hasta su salida en corriente alterna, de tal manera que es un acople entre estos dos sistemas, con un solo sentido de conversión.

7.3. Problemas asociados a armónicos

A continuación, se describen los problemas asociados a los armónicos

7.3.1. Transformadores eléctricos

La distorsión armónica en transformadores es considerada el problema más crítico en cualquier instalación eléctrica, ya que produce elevaciones desmesuradas de temperatura, lo cual fatiga el aislamiento, reduce la vida útil del equipo y consecuentemente produce cortes de suministro y/o daños físicos a personas e infraestructura.

Al transformador le afecta tanto la distorsión armónica en tensión como en corriente, en menor medida la distorsión armónica en tensión la cual provoca cambios en las curvas de magnetización de transformadores, posibles elevaciones de corriente inrush, y posibles vibraciones con niveles audibles por encima de lo recomendado por las normas de fabricación.

La distorsión armónica en corriente afecta al transformador directamente por el aumento de corrientes parásitas en los devanados, lo cual provoca que los conductores que constituyen las bobinas se calienten con niveles de carga de hasta el 50 %, según la cantidad de distorsión que suministre, lo cual lleva a utilizar métodos normados para asignar una potencia máxima la cual puede suministrar dicho transformador, a esto normalmente se le conoce como una desclasificación por factor k como lo indica (UL-1561, 1994), o reducción por factor de distorsión armónico de IEEE.

7.3.2. Capacitores

Aunque los efectos negativos producidos en los capacitores normalmente se pueden considerar como de menor magnitud en comparación con los transformadores eléctricos, no se debe subestimar ya que típicamente un capacitor puede verse sometido a sobrecargas excesivas y ante no tener medios de desconexión adecuados y obstrucciones a las protecciones por sobrepresión de algunos capacitores, suele producirse incendios asociados a la expansión acelerada producida por la ignición del dieléctrico del interior de los capacitores..

La distorsión armónica en tensión es principalmente el problema, debido a que la reactancia de cualquier capacitor es inversamente proporcional a la frecuencia del voltaje del punto donde esté conectado eléctricamente, eso implica que la corriente a través del capacitor tendrá componentes armónicos las cuales aumentarán cuanto más alto sea el grado del armónico en tensión, lo cual dará como consecuencia calentamiento en el capacitor por sobrecarga y además aportará distorsión armónica en corriente lo cual a su vez afectará también al transformador eléctrico.

También se tiene aumento en la corriente inrush, lo cual es relevante cuando los capacitores se utilizan en bancos de compensación reactiva automático (de conmutación controlada según requerimiento de KVAR de la carga).

7.4. Pérdidas en transformadores eléctricos

Según IEEE Std C57.12.90, (2015) e IEEE Std C57.12.91, (2011) las pérdidas totales en los transformadores P_T son la suma de las pérdidas debidas a la carga P_{LL} y las pérdidas no debidas a la carga P_{NL} o pérdidas en vacío.

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

7.4.1. Pérdidas no debidas a la carga en transformadores eléctricos

Las normas técnicas de IEEE C57.123,(2019) e IEC 60076-1, (2011) brindan un método con el cual se puede obtener valores de pérdidas en vacío al considerar distorsión armónica en su excitación. Se emplea los cálculos del voltaje rms V_{RMS} y del voltaje rms promedio $V_{avg-rms}$.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{ex}^2(t) dt} \quad (2)$$

$$V_{avg-rms} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \left(\frac{2}{T} \int_0^{T/2} v_{ex}^2(t) dt \right) \quad (3)$$

El método de IEEE utiliza el valor de un coeficiente K, el cual se calcula mediante la siguiente expresión.

$$K = \left(\frac{V_{rms}}{V_{avg-rms}} \right)^2 \quad (4)$$

El valor de pérdida en vacío P_{NL} es calculada mediante los valores de la potencia medida P_m y las potencias P_1 y P_2 lo cual representa las pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas respectivamente. En caso de no conocerse la proporción de P_1 y P_2 IEEE recomienda usar cada una como 0.5 por unidad.

$$IEEE: \quad P_{NL} = \frac{P_m}{P_1 + KP_2} \quad (5)$$

De manera parecida IEC utiliza el valor de un coeficiente d , el cual se calcula mediante la siguiente expresión.

$$d = \frac{V_{avg-rms} - V_{rms}}{V_{avg-rms}} \quad (6)$$

El valor de pérdida en vacío P_{NL} es calculada mediante la potencia medida P_m y el coeficiente d con la siguiente expresión.

$$IEC: \quad P_{NL} = P_m(1 + d) \quad (7)$$

Es relevante mencionar que tanto el método de IEEE como el de IEC son válidos para una distorsión total en voltaje moderada, es decir entre el 3 % y el 5 %.

Para el cálculo de la distorsión total en tensión se emplea la expresión matemática siguiente, donde por practicidad los coeficientes V_k para $k = 1,2,3,4 \dots N$, pueden ser extraídos de la transformada rápida de Fourier lo cual se conoce como FFT.

$$TDH = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^N V_k}{V_1^2}} \quad (8)$$

Es necesario admitir que para distorsiones en voltaje por encima del 5% los resultados de dicho análisis tienden a tener demasiado error, para estos casos extremos se puede emplear la metodología de (Ramamurthy, y otros, 2017), la cual evidencia excelentes resultados.

7.4.2. Pérdidas debidas a la carga en transformadores eléctricos

La norma IEEE C57.110, (2018) describe como se compone las pérdidas debidas a la carga P_{LL} como la suma de las pérdidas I^2R como la potencia de corriente directa P_{DC} , las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados P_{EC} y las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósito, entre otros. P_{OSL} .

$$P_{LL} = P_{DC} + P_{EC} + P_{OSL} \quad (9)$$

También se describe como se compone las pérdidas totales por dispersión P_{TSL} en función de los resultados del ensayo de resistencia óhmica de los devanados y de las pérdidas debidas a la carga, las cuales se pueden obtener de los informes de ensayos de fabricación, y/o de rutina del último mantenimiento.

$$P_{TSL} = P_{LL} - A[I_H^2 R_H + I_x R_x] \quad (10)$$

Donde A es un coeficiente que define la proporcionalidad con el número de fases del sistema SO (1).

$$A = \begin{cases} 1.0, & \text{si } SO(1)=1 \varphi \\ 1.5, & \text{si } SO(1)=3 \varphi \end{cases} \quad (11)$$

IEEE define al factor armónico de pérdidas para las corrientes parásitas en los devanados como la contribución de cada componente armónico en relación con el orden de dicho armónico, define como se ve afectadas las pérdidas por corrientes parásitas dada una distorsión armónica en función de sus componentes espectrales, se calcula mediante la siguiente expresión.

$$F_{HL} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} \left[\frac{I_i}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{i=1}^{i=N} \left[\frac{I_i}{I_1} \right]^2} \quad (12)$$

También se define el factor armónico para las pérdidas por dispersión, este factor define la relación que existe entre las pérdidas por dispersión a frecuencia fundamental y como se ve afectado por una distorsión dada sus componentes espectrales.

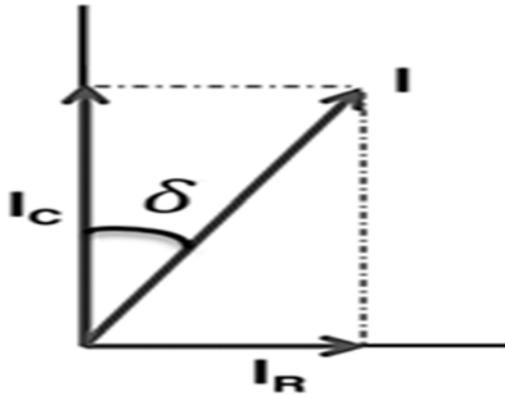
$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} \left[\frac{I_i}{I_1} \right]^2 h^{0.8}}{\sum_{i=1}^{i=N} \left[\frac{I_i}{I_1} \right]^2} \quad (13)$$

7.5. Aislamiento dieléctrico

Según Jiménez y Gómez, (2016), un dieléctrico perfecto tiene conductividad cero lo cual significa que no hay efectos de absorción. Un alto vacío es un ejemplo de un dieléctrico perfecto. En cambio, un dieléctrico imperfecto es un dieléctrico donde la energía necesaria para crear un campo eléctrico no se devuelve al campo eléctrico cuando se elimina la energía, y dicha energía se convierte en calor en el dieléctrico.

La mayoría de los dieléctricos probados se consideran dieléctricos imperfectos debido a la existencia de humedad y partículas libres, contaminantes, y otras moléculas polares inherentes. Cuando se aplica a un aislamiento cualquiera entre dos electrodos un voltaje C.A., por este circula una corriente aparente (con desfase entre voltaje y corriente diferente de 0 y 90°, en adelante). Esto sugiere que la corriente es consistente de dos componentes, uno en fase con la tensión y otro adelantado 90° con respecto a la tensión suministrada.

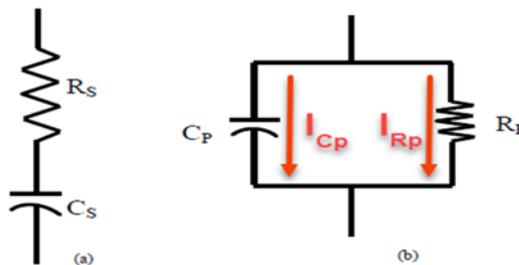
Figura 3. **Corrientes en un aislamiento**



Fuente: elaboración propia.

Que exista dicha corriente naturalmente sugiere que un aislamiento se puede modelar como una resistencia en paralelo a un capacitor o una resistencia en serie con un capacitor, cuyas magnitudes físicas son tales que produzcan la corriente medida, empleando el voltaje aplicado a la frecuencia aplicada.

Figura 4. **Circuito dieléctrico imperfecto: (a) circuito en serie; (b) circuito paralelo**



Fuente: IEEE (2013) *Guía IEEE para pruebas de campo de diagnóstico de transformadores de potencia, reguladores y reactores llenos de fluido.*

Aunque es posible determinar los parámetros de resistencia y capacitancia para un aislamiento dieléctrico simple y relativamente pequeño, para la mayoría de los análisis relacionados a estos parámetros no es necesario calcularlos ya que, para tener un indicador del estado del aislamiento, no se utilizan dichos parámetros.

7.5.1. Tangente delta y factor de disipación

La tangente delta o factor de disipación, son conceptos equivalentes, uno denota su composición matemática y la otra su sentido físico ya que expresa una medida de la calidad del aislamiento, según (Jiménez & Gómez, 2016), el factor de disipación es un indicador de las pérdidas dieléctricas en el aislamiento y que la absorción de humedad en conjunto con el deterioro asociados a los esfuerzos térmicos incrementan dichas pérdidas, por lo cual es sugerible que se evalúe en el tiempo las condiciones del aislamiento.

7.5.2. Pérdidas debidas a la distorsión armónica en tensión de los capacitores

Las pérdidas en los capacitores a menudo se dan en función de la tangente delta o factor de disipación la cual se expresa como $\tan(\delta)$.

Figura 5. Datos técnicos de un capacitor

TDK

Film Capacitors – Power Factor Correction **B32344ExxxxAxxx**
PhiCap capacitors **B32344E-series**

Construction

- Dielectric: Polypropylene film
- Non PCB, semi-dry biodegradable resin
- Extruded round aluminum can with stud
- Provided with ceramic discharge module
- Dual safety system

Features

- Three-phase, delta connected
- Self-healing technology
- Naturally air cooled (or forced air cooling)
- Indoor mounting

 file # E106388
 C22.2 N°190 MC # 236094
 GOST

Typical applications

- For Power Factor Correction

Terminals

- Optimized capacitor safety terminals

Mounting

- Threaded stud at bottom of can
(max. torque for M12 = 10 Nm)

Technical data and specifications

Characteristics	
Rated capacitance C_R	According to specification table
Tolerance	-5 / +10%
Connection	D (Delta)
Rated voltage V_R	According to specification table
Rated frequency f_R	50 Hz and 60 Hz
Output	According to specification table
Rated current I_R	According to specification table
$\tan \delta_v$ (dielectric)	0.2 W / kvar



FILM PFC PM October 2011

Please read *Cautions and warnings* and *Important notes* at the end of this document. Page 2 of 10

Fuente: TDK (2011). *Capacitores de película- corrección del factor de potencia*. Consultado el 20 de septiembre de 2020. Recuperada de <https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/20/50/ds/B25669A5467J375.pdf>

El sentido físico de brindar las pérdidas en término de la tangente delta es poder cuantificar fácilmente las pérdidas totales de una batería de capacitores ya que los watts serán la cantidad de KVAR, de la batería multiplicado por la tangente delta. Según (Vicuña, 2010) las pérdidas energéticas reales en los capacitores

suelen verse afectadas por la distorsión armónica en tensión que presente el punto donde esté conectado el capacitor o la batería de capacitores.

$$P_{CT} = Q_{f_0} * \tan(\delta_{f_0}) + \sum_{i=3}^N Q_i * \tan(\delta_i(f)) \quad (14)$$

Esta representación de las pérdidas en los capacitores establece que las pérdidas reales tendrán dos componentes, la componente fundamental es decir $Q_{f_0} * \tan(\delta_{f_0})$ y otro que es producto de los armónicos el cual contempla para cada armónico en tensión la potencia reactiva Q_i la cual es dependiente de la frecuencia y la representación de la tangente delta en función de la frecuencia la cual se calcula mediante la ecuación (15).

$$\delta_i(f) = \tan(\delta_{f_0}) + 2\pi f_i R_s C \quad (15)$$

Esto significa que las pérdidas que se dan en un banco de compensación reactiva se ven afectada con proporción al orden del armónico, lo cual significa que un armónico más elevado tendrá mayor efecto negativo en la eficiencia.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DE MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. DISTORSIONES EN UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA

- 1.1 Distorsión armónica en corriente.
- 1.2 Distorsión armónica en tensión.
- 1.3 Problemas típicos ocasionados por la distorsión armónica.
- 1.4 Fuentes de distorsión en corriente.
- 1.5 Fuentes de distorsión en tensión.

2. INVERSORES FOTOVOLTAICOS

- 2.1 Efecto fotoeléctrico y generación de energía.
- 2.2 Necesidad de los convertidores DC/AC.
- 2.3 Relación entre etapas de tiristores y la distorsión aportada a la red.
- 2.4 Relación entre porcentaje de carga y distorsión armónica suministrada por un inversor fotovoltaico.

3. ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DEBIDO A LA DISTORSIÓN ARMÓNICA.
 - 3.1 Pérdidas adicionales en transformadores.
 - 3.1.1 Pérdidas debidas a la excitación con distorsión armónica en tensión.
 - 3.1.2 Pérdidas debidas al suministrar distorsión armónica en corriente a la carga.
 - 3.1.2.1 Pérdidas por corriente parásita en los devanados
 - 3.1.2.2 Pérdidas por dispersión en fijaciones, depósito, etc.
 - 3.1.2.3 Factor armónico de pérdidas para las corrientes parásitas.
 - 3.1.2.4 Factor armónico de pérdidas por dispersión.
 - 3.2 Pérdidas adicionales en capacitores.
 - 3.2.1 Aislamiento dieléctrico y factor de disipación.
 - 3.2.2 Cuantificación de las pérdidas nominales y adicionales en capacitores.
 - 3.2.3 Resonancia en bancos de compensación reactiva y la amplificación armónica.
 - 3.2.4 Inductancia característica.
 - 3.2.5 Efecto de resonancia y condición crítica.
 - 3.2.6 Influencia de la distorsión armónica en la resonancia.
 - 3.2.7 Desplazamiento en la frecuencia de resonancias.
 - 3.2.8 Efecto de conmutación de carga capacitiva.
4. MODELO EXPERIMENTAL
 - 4.1 Justificación del modelo experimental.
 - 4.2 Caracterización del modelo experimental en función de aspectos constructivos.
 - 4.3 Variación de parámetros.

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

A continuación, se detallan los elementos metodológicos que se considerarán en el estudio del impacto sobre la eficiencia de los inversores fotovoltaicos.

9.1. Características del estudio

El enfoque del estudio propuesto es mixto, predominantemente cuantitativo, ya que este se basará en el análisis de las pérdidas adicionales que producen la distorsión que aportan a la red los inversores fotovoltaicos, para lo cual se utilizarán mediciones periódicas de parámetros eléctricos relacionados con dichas pérdidas y se buscará obtener las cualidades de los dispositivos para minimizar las pérdidas adicionales.

El alcance es exploratorio dado que el estudio propuesto se centra en el análisis de las pérdidas que se producen por utilizar generación fotovoltaica, las cuales no han sido analizadas ni consideradas con la relevancia debida y que puede en el futuro producirse de manera desmesurada al aumentar la generación de energía distribuida en Guatemala.

El diseño adoptado será experimental debido a que la información recabada a partir de mediciones eléctricas se empleará para estimar indirectamente las pérdidas teóricas asociadas a la distorsión armónica y se contrastará mediante análisis correlativo que tan buenas son las estimaciones de dichas pérdidas comparadas con las mediciones directas de las mismas.

9.2. Unidades de análisis

La unidad de análisis será la eficiencia en una instalación eléctrica industrial simulada, la cual se encuentra dividida en elementos dados por la distorsión adicional de los inversores, perfil de carga conectada, el aumento de pérdidas en bancos de compensación reactiva y transformadores de distribución, de la cual se extraerán muestras de forma no probabilística, que serán estudiadas en su totalidad.

9.3. Hipótesis

La reducción de la eficiencia causado por el aumento de las pérdidas energéticas adicionales (debido a la distorsión armónica) en las instalaciones industriales con generación fotovoltaica puede tener una causalidad principalmente relacionada a las interacciones que existen entre inversores fotovoltaicos, bancos de compensación reactiva y transformadores de distribución.

9.4. Variables

En la tabla I se nombran y describen teóricamente las variables en estudio y se define como se realizará la obtención de los valores para su posterior utilización.

Tabla I. **Definición teórica y operativa de variables**

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Porcentaje de carga de inversor fotovoltaico [%]	Cantidad de energía generada en porcentaje de su capacidad nominal.	Se obtendrá por medio de la medición instantánea del analizador AR(4) de la figura 4 y de la capacidad según placa de datos del fabricante.
Distorsión armónica adicional de los inversores fotovoltaicos. [%]	Es la cuantificación de la deformación de una onda de corriente o de tensión la cual se representa como amplitudes porcentuales a la fundamental de ondas con múltiplos de la frecuencia fundamental.	Se obtendrá la distorsión en tensión adicional como el resultado de la diferencia temporal medida con AR(4) y AR(5) de la figura 4 y la distorsión en corriente adicional será obtenida de la medida principalmente como la discrepancia entre AR(2) y AR(3) en la figura 4.
Influencia en el consumo de energía de la carga [watt]	Cantidad de watts que puede aumentar la carga debido a la disipación de calor y/o magnetización de núcleos ferromagnéticos.	Se obtiene de la medición de AR(3) en la figura 4 y la comparación en el tiempo según el porcentaje de carga del inversor y de la cantidad de distorsión aportada medida según AR(4).
Aumento de disipación de energía en los capacitores. [Watt]	Cantidad de watts que aumenta el consumo en los capacitores y a paramenta debido a la disipación de calor producido por la distorsión armónica adicional de los inversores.	Se obtendrá analíticamente mediante modelo teórico, y experimentalmente de la medición de AR(5) en la figura 4. y de cámara termográfica Fluke TiS75 (temperatura), para evidenciar aumentos de disipación de calor.

Continuación tabla I.

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Pérdida energética en transformadores eléctricos	Pérdidas de energía la en un transformador debido a condiciones nominales y adicionales por suministrar corriente con distorsión armónica que se disipa en calor.	Se obtendrá analíticamente mediante modelo teórico, y experimentalmente entre la diferencia de potencia entre AR(2) y AR(1)

Fuente: elaboración propia.

9.5. Fases del estudio

Se consultará literaturas relacionadas al estudio propuesto, las cuales servirán como fundamento teórico y estado del arte de los problemas que han sido observados y de mejoras que surgieron en estudios que involucre la generación fotovoltaica. Así mismo se plantea un método de estimación de las pérdidas energéticas producidas por la distorsión armónica aportada por los inversores fotovoltaicos el cual se someterá a prueba mediante la implementación de un modelo real a pequeña escala en el cual se efectuarán mediciones simultáneas de parámetros eléctricos según figura 6. Por lo cual se presentan las distintas fases consideradas por el investigador como procedimiento para la culminación del estudio propuesto.

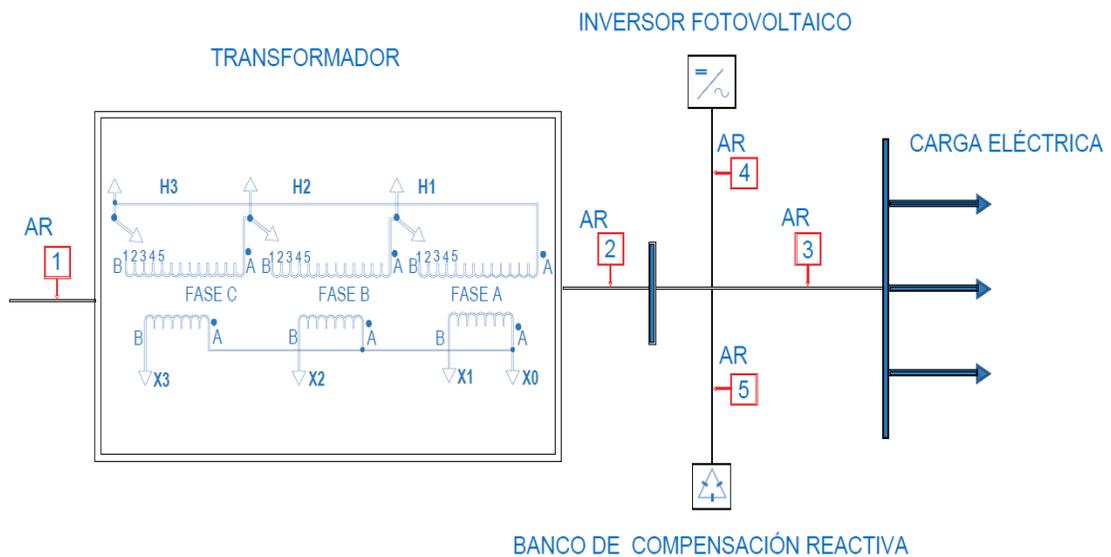
9.5.1. Fase 1: revisión de literatura

En esta etapa de la investigación se recopilará y fundamentará los conceptos, estado del arte, modelos tratados y las interacciones entre inversor fotovoltaico, banco de compensación reactiva y transformador eléctrico en pro de estimar las pérdidas energéticas asociadas a dichas interacciones.

9.5.2. Fase 2: gestión o recolección de la información mediante simulación real a pequeña escala.

Se recreará un modelo a pequeña escala de una instalación industrial típica, en el cual se efectuará mediciones simultáneas con analizadores de red (AR) en los puntos descritos en el siguiente diagrama.

Figura 6. Modelo experimental



Fuente: elaboración propia.

Mediante la implementación de este modelo a pequeña escala se recolectará los parámetros eléctricos como factor de potencia, potencia activa, reactiva y aparente asociada a cada punto de medición, también la distorsión individual y total en voltaje y corriente. También se obtendrá información de resultados de pruebas de fabricación certificados por laboratorio de pruebas de transformadores de Zetrak Guatemala S. A. y aspectos constructivos del transformador obtenidos del diseño electromecánico del transformador.

Se obtendrá también los valores nominales del inversor empleado e información de baterías de capacitores según fichas técnicas, y confirmación de tangente delta e inductancia equivalente del transformador y cableado certificado por el departamento de baja tensión de Zetrak Guatemala S. A.

9.5.3. Fase 3: modelado matemático del inversor y su distorsión aportada.

Se obtendrá la representación de como se origina la tensión sinusoidal y los mecanismos que definen la distorsión que aportan los inversores, lo cual se atribuye a su principio de operación, con esto se evidenciará la distorsión en función de la tecnología y de las etapas de la electrónica involucrada. El análisis se contrastará con las mediciones efectuadas en la fase 2.

9.5.4. Fase 4: modelar las amplificaciones de armónicos en función de la distorsión adicional aportada por el inversor.

Se abarcará los mecanismos naturales que originan que aumente la distorsión armónica, la cual dependerá de las reactancias involucradas en lazos cerrados los cuales estén alimentados con tensión que contenga distorsión armónica y de la operación crítica ante inercia en los dispositivos de conexión, corriente de inserción, rotación de fase y barridos de frecuencia que posibilitan resonancias transitorias.

9.5.5. Fase 5: modelar el aumento de pérdidas en los bancos de compensación reactiva en función de la distorsión adicional aportada por el inversor.

Se cuantificará analíticamente las pérdidas reales en los bancos de compensación reactiva tomando como consideración las reactancias en serie del transformador, cableado y capacitores, y los resultados del ensayo factor de disipación o tangente delta. Los resultados se contrastarán con las mediciones obtenidas en la fase 2, lo cual origina cuantificar las pérdidas asociadas únicamente a la distorsión adicional aportada por los inversores.

9.5.6. Fase 6: modelar el aumento de pérdidas en los transformadores de distribución en función de la distorsión adicional aportada por el inversor.

Se modelará matemáticamente las pérdidas reales en vacío de un transformador al ser excitado con tensión que contenga distorsión armónica y debido a suministrar corriente a carga no lineal. Los resultados se contrastarán con los datos obtenidos en la fase 2, con lo cual se podrá apreciar las pérdidas debidas únicamente a la distorsión adicional aportada por el inversor.

9.5.7. Calcular reducción de la eficiencia

Se obtendrá a partir del análisis teórico y en base a los datos obtenidos de la fase 2 para cuantificar la pérdida de eficiencia en la instalación la cual será bajo mismas condiciones de carga, la diferencia entre la eficiencia tras no tener conectado el inversor y la eficiencia con el inversor según su porcentaje de carga y distorsión aportada a la instalación.

9.5.8. Análisis del modelo matemático, el cual se validará con la información recolectada en la fase 2.

Modelo teórico:

- Con AR(2) se obtendrá la distorsión armónica en corriente y en tensión para cuantificar las pérdidas en el transformador eléctrico en conjunto con resultados de pruebas de fabricación y aspectos constructivos.
- Con AR(5) se obtendrá las mediciones de armónicos en tensión los cuales en conjunto con los resultados de tangente delta y medición de inductancia serie del tramo cableado-transformador para cuantificar las pérdidas totales en los capacitores

Modelo experimental:

- Con AR(1) y AR(2) se podrá obtener experimentalmente las pérdidas reales en el transformador, nominales y adicionales debido a suministrar corriente armónica.
- Con AR(2) y AR(3) se podrá obtener la comparación entre la distorsión en corriente producida por la carga y la total la cual incluirá la amplificación de distorsión producida por los capacitores al tener distorsión armónica en tensión.
- Con AR(5) se podrá obtener las pérdidas en los capacitores debido a la distorsión armónica.

- Con AR(4) se podrá saber cuánta energía inyecta el inversor a la red, corregir el nivel de carga del transformador y cuantificar la corriente DC suministrada a tal porcentaje de carga que pudiera producirse en el momento de la medición.

9.5.9. Interpretación de información

Se estimará la correlación entre los resultados teóricos, los cuales serán estimados indirectamente a partir de algunas mediciones efectuadas empleando el modelado de los dispositivos que conforman el modelo de estudio, y los experimentales obtenidos de las mediciones directamente. Y se cuantificará la eficiencia de dicha instalación con algunas simplificaciones que quedará a criterio del investigador.

El modelado de los dispositivos permitirá obtener conclusiones operativas, y las características físicas que se pueden considerar como críticas o que eventualmente produzcan condiciones críticas de funcionamiento.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Se empleará el muestreo no probabilístico para registrar valores de magnitudes eléctricas, las cuales permitirán evaluar las pérdidas energéticas mediante series de tiempo, también se empleará el análisis correlativo para determinar que tan bien se ajustan los valores teóricos y los experimentales de las pérdidas energéticas.

Muestreo no probabilístico: mediante este método se obtendrán los datos de las mediciones de 5 puntos de conexión guardando registros periódicamente en el tiempo con analizadores de red, los cuales se emplearán para el análisis basada en una selección no aleatoria ya que se empleará un análisis en el tiempo usando todos los valores medidos.

El tipo de muestreo elegido brinda la ventaja de que la obtención de la información será más rápida ya que solo depende de la medición de un sistema a pequeña escala, en el cual el investigador conocerá la muestra y seleccionará las magnitudes eléctricas brindadas por los analizadores. Para el caso del estudio de evaluación del impacto sobre la eficiencia que provocan los inversores fotovoltaicos en una instalación industrial mediante simulación con implementación de un modelo a pequeña escala que se realizará, las muestras por obtener se fundamentarán en las siguientes variables:

- Distorsión armónica y porcentaje de carga del inversor fotovoltaico.
- Aumento de consumo de energía en las cargas eléctricas debidos a la distorsión adicional de los inversores.

- Aumento de disipación de potencia en capacitores debidos a la distorsión adicional de los inversores.
- Aumento de pérdidas en los transformadores de distribución debidos a la distorsión adicional de los inversores

Las cuáles serán resultados directos o indirectos de los siguientes registros de los analizadores de red.

- Armónico en corriente y voltaje de la carga, los aumentos debido a la resonancia de los capacitores y los aportes de los inversores.
- Potencia activa, reactiva, aparente de los puntos lo cual representará las pérdidas según circunstancia de análisis.
- Análisis multivariado: el análisis de las variables por estudiar serán del tipo multivariado ya que las pérdidas totales son el resultado de la interacción entre las variables medidas.

11. CRONOGRAMA

Para poder cumplir con los objetivos de la investigación en el tiempo estipulado, se apegará a los tiempos establecidos en la siguiente figura, que contempla el plan de acción teórico.

Figura 7. **Cronograma de actividades**

PLAN DE ACCIÓN														
ETAPA	2020				2021									
	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre
<i>Elaboración del marco teórico</i>														
<i>Diseño metodológico</i>														
<i>Redacción del protocolo</i>														
<i>Aprobación del protocolo</i>														
<i>Recolección de información</i>														
<i>Análisis e interpretación de la información</i>														
<i>Redacción del Informe Final</i>														
<i>Entrega y aprobación del Informe Final</i>														

Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para la recopilación de datos es necesario utilizar un modelo a pequeña escala lo cual involucra un transformador eléctrico, capacitores, inversor fotovoltaico, y múltiples cargas. También es necesario utilizar cinco analizadores de red para la cuantificación de las variables del estudio mediante medición indirecta, a partir de utilización de magnitudes eléctricas.

Se cuenta con el permiso de utilización de los dispositivos necesarios para el estudio así también con los cinco analizadores de red los cuales son propiedad de Zetrak Guatemala S.A., donde actualmente labora el investigador. La investigación que se desarrollará es factible ya que se cuenta con los recursos humanos, financiero, disponibilidad de equipos, acceso a la información y suministro, lo cual posibilitan la culminación de dicha investigación.

Tabla II. Recursos necesarios

ítem	Descripción	Costo Unitario	Cantidad	Total	%	Financiamiento	Tipo
1	Honorario del asesor	Q 0.00	1 mes	Q 0.00	0.00	Honórem	Recurso humano
2	Honorario del tesista	Q 1,500.00	8 meses	Q 12,000.00	5.33	Valor teórico	Recurso humano
3	Analizador AR6	Q 32,000.00	2 meses	Q 64,000.00	28.44	Propiedad de Zetrak Guatemala S. A.	Equipo
4	Analizadores CVM-A1500	Q 15,000.00	3 meses	Q 45,000.00	20.00	Propiedad de Zetrak Guatemala S. A.	Equipo
5	Transformador eléctrico	Q 45,000.00	1 mes	Q 45,000.00	20.00	Propiedad de Zetrak Guatemala S. A.	Equipo
6	Capacitores	Q 400.00	4 meses	Q 1,600.00	0.71	Propiedad de Zetrak Guatemala S. A.	Equipo

Continuación tabla II.

7	Inversor fotovoltaico	Q 15,000.00	1 mes	Q 15,000.00	6.67	Propiedad de Zetrak Guatemala S. A.	Equipo
8	Motores (carga)	Q 6,000.00	2 meses	Q 12,000.00	5.33	Propiedad de Zetrak Guatemala S. A.	Equipo
9	Rectificador (carga)	Q 4,500.00	1 mes	Q 4,500.00	2.00	Propiedad de Zetrak Guatemala S. A.	Equipo
10	Equipo de computo	Q 10.00	8 meses	Q 80.00	0.04	Financiamiento propio	Equipo de oficina
11	Internet	Q 250.00	8 meses	Q 2,000.00	0.89	Financiamiento propio	Suministros
12	energía eléctrica	Q 75.00	8 meses	Q 600.00	0.27	Financiamiento propio	Suministros
13	Impresora y consumibles	Q 15.00	8 meses	Q 120.00	0.05	Financiamiento propio	Equipo de oficina
14	Transporte	Q 1,300.00	8 meses	Q 10,400.00	4.62	Financiamiento propio	Transporte
15	viáticos	Q 500.00	4 días	Q 2,000.00	0.89	Financiamiento propio	Comida y hospedaje
Subtotal				Q 214,300.00			
Imprevisto (5%)				Q 10,715.00			
Total				Q 225,015.00			

Fuente: elaboración propia.

El ítem 2 representa un valor teórico el cual no se tomará en cuenta como gasto real por parte del investigador. Las filas de color verde es equipo del cual se dispone y/o que se considera como gasto frecuente con o sin la ejecución de la investigación y que no representara ningún gasto económico extra, lo cual equivale a un 87.81 % (lo cual incluye la asesoría a honórem).

Los ítems 11, 12, 13 y 15 representan los costos de inversión para la realización de la tesis, lo cual comprende principalmente el pago de servicios, equipos de los cuales no se dispone actualmente y viajes que no se consideran típicos, corresponde al 3.88 % del costo total de inversión.

13. REFERENCIAS

1. Agüero, J., Barbera, G., Issouribehere, F., Mayer, H., Díaz, J., y Castro, N. (2016). *Experiencias en la incorporación de energía solar fotovoltaica en establecimientos de baja tensión*. Buenos Aires, Argentina: Agencia de Protección Ambiental.
2. Blas, M. (2015). *Metodología para analizar el impacto de los Armónicos generados por las centrales Eólicas y fotovoltaicas en los sistemas Eléctricos de potencia*. (Tesis de Maestría). Instituto Politecnico Nacional, México.
3. Elmoudi, A. (2006). *Evaluation of Power System Harmonic Effects on Transformers [Evaluación de los efectos armónicos del sistema de potencia en transformadores]*. (Tesis doctoral). Universidad Tecnológica de Helsinki, Finlandia.
4. Fortes, R. R., Buzo, R. F., y de Oliveira, L. C. (Noviembre, 2020). Harmonic distortion assessment in power distribution networks considering [Evaluación de la distorsión armónica en redes de distribución de energía considerando la inyección de componentes de DC desde inversores fotovoltaicos]. *Electric Power Systems Research*, 188 (1). Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779620303254>.

5. Hart, D.(2001). *Eléctronica de potencia*. Madrid, España: Pearson Educación, S. A.
6. IEC 61000-2-4. (2002). *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility... [Compatibilidad electromagnética (EMC). Parte 2-4: Medio ambiente. Niveles de compatibilidad en plantas industriales para perturbaciones conducidas de baja frecuencia]*. Estados Unidos. 26 de junio de 2002.
7. IEEE Std C57.12.91. (2011). *IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers [Código de prueba estándar IEEE para transformadores de potencia y distribución de tipo seco]*. New York, Estados Unidos. 13 de febrero de 2012.
8. IEEE 519. (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems [Prácticas recomendadas por IEEE y requisitos para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica]*. New York, Estados Unidos 11 de junio de 2014.
9. IEEE C57.12.90. (2015)., *Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers [Código de prueba estándar IEEE para transformadores de regulación, potencia y distribución sumergidos en líquido]*. New York, Estados Unidos 3 de noviembre de 2016.
10. IEEE C57.110. (2018). *Recommended Practice for Establishing Liquid Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents*. Práctica

recomendada para establecer la capacidad del transformador de distribución y potencia sumergida en líquido y seco cuando se suministran corrientes de carga no sinusoidales] New York, Estados Unidos. 31 de octubre de 2010.

11. IEEE C57.123, (2019). *IEEE Guide for Transformer Loss Measurement [Guía IEEE para la medición de pérdidas de transformadores]*. New York, Estados Unidos 7 de noviembre de 2019.
12. Jiménez, G., y Gómez, G. (Julio-Septiembre, 2016). Comportamiento de los aislamientos sólidos de transformadores de potencia en condiciones ambientales no controladas. *Tecnología en Marcha*, 29 (3),99-116. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5710303>
13. Lemozy, N , Vinson, E., y Jurado, A. (Junio, 20216. Estudio del incremento de las pérdidas y sus efectos en transformadores con cargas alineales. *Ingeniería Eléctrica*. 310, 54-66. Recuperado de https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/ie310_revista_aea_lemory_transformadores_con_cargas_alineales.pdf
14. Ramamurthy, J, Chiesa, N., Høidalen, H., Mork, B., Stenvig, N. y Manty, A. (Mayo, 2017). Influence of voltage harmonics on transformer no-load loss measurements and calculation of magnetization curves [Influencia de los armónicos de voltaje en el transformador, mediciones de pérdida sin carga y cálculo de las curvas de magnetización]. *Electric Power Systems Research*, 146, 43-50. Recuperado de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779617300317>

15. Resolución CNEE No 09-99. Normas Técnicas del Servicio de Distribución. Diario de Centroamérica. Guatemala. 7 de abril de 1999.
16. Schallenberg, J., Piernavieja, G., Hernández, C., Unamunzaga, P., García, R., Díaz, M., Subiela, V. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Gran Canaria: Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.
17. UL-1561. (1994). Dry Type General Purpose Power Transformers. Northbrook, Illinois. 23 de marzo de 1999.
18. Vicuña, C. (Octubre, 2010). Efectos de pérdidas internas en condensadores. *Electro Industria*, 78,1-3. Recuperado de <http://www.emb.cl/electroindustria/revista.mvc?edi=78>

14. APÉNDICES

Apéndice 1. Analizadores de red



Fuente: elaboración propia.