



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL DESBALANCE DE
CORRIENTE EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN Y SUS POSIBLES EFECTOS EN EL
TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE UNA SUBESTACIÓN DE UN TRANSPORTISTA**

Pedro Alberto Alvarado Yat

Asesorado por el MBA. MSc. Ing. German Antonio Juárez Viduarre

Guatemala, julio de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL DESBALANCE DE
CORRIENTE EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN Y SUS POSIBLES EFECTOS EN EL
TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE UNA SUBESTACIÓN DE UN TRANSPORTISTA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

PEDRO ALBERTO ALVARADO YAT

ASESORADO POR EL MBA. MSc. ING. GERMAN ANTONIO JUÁREZ
VIDUARRE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, JULIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
EXAMINADORA	Ing. Sergio Leonel Gómez Bravo
EXAMINADORA	Ing. Edgar Estuardo Chaj Ramírez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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 CARACTERIZACIÓN DEL DESBALANCE DE CORRIENTE EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN Y SUS POSIBLES EFECTOS EN EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE UNA SUBESTACIÓN DE UN TRANSPORTISTA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 26 de abril de 2022.

Pedro Alberto Alvarado Yat



EEPMI-PP-0628-2022

Guatemala, 26 de abril de 2022

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL DESBALANCE DE CORRIENTE EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN Y SUS POSIBLES EFECTOS EN EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE UNA SUBESTACIÓN DE UN TRANSPORTISTA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión y uso eficiente de la energía - Uso eficiente en sistemas de transporte**, presentado por el estudiante **Pedro Alberto Alvarado Yat** carné número **200819389**, 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 Energía Y Ambiente.

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,

"Id y Enseñad a Todos"

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

Mtro. German Antonio Juárez Vidaurre
Asesor(a)



Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría

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





EEP-EIME-0628-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria 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: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL DESBALANCE DE CORRIENTE EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN Y SUS POSIBLES EFECTOS EN EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE UNA SUBESTACIÓN DE UN TRANSPORTISTA**, presentado por el estudiante universitario **Pedro Alberto Alvarado Yat**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink is written over a circular official stamp. The stamp contains the text: "UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA", "DIRECCIÓN ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA", and "FACULTAD DE INGENIERIA".

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, abril de 2022

LNG.DECANATO.OI.541.2022

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 INVESTIGACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL DESBALANCE DE CORRIENTE EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN Y SUS POSIBLES EFECTOS EN EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE UNA SUBESTACIÓN DE UN TRANSPORTISTA**, presentado por: **Pedro Alberto Alvarado Yat**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, julio de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme el don de la vida, y porque en su santa voluntad, le ha parecido bien, que hoy cumpla este gran sueño.
- Mi padre** Pedro Alvarado, por su amor incondicional, esfuerzos y sacrificios hechos para que pudiera tener la oportunidad de prepararme académicamente.
- Mi madre** Olga Yat, que desde el cielo celebra conmigo esta meta alcanzada.
- Mi esposa** Lucky Cabrera, por su amor, apoyo y comprensión a lo largo de estos años, en los que en muchas ocasiones dejé de compartir con ella, por alcanzar este sueño.
- Mi tía** Rosa Yat, por su gran apoyo en los momentos más difíciles de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de formarme académicamente a nivel superior y fomentar en mí, la conciencia social.
Facultad de Ingeniería	Por darme los conocimientos y las herramientas necesarias para poder desarrollarme profesionalmente.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por el apoyo para poder culminar mi carrera universitaria.
Mi asesor	German Juárez, por su motivación, consejos y apoyo en la elaboración del presente trabajo de graduación. Y por su gran amistad.
Comisión Nacional de Energía Eléctrica	Por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente, además de conocer a grandes profesionales y amigos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
3.1. Contexto General	9
3.2. Descripción del problema	10
3.2.1. Formulación del problema	10
3.2.1.1. Pregunta central	10
3.2.1.2. Preguntas auxiliares	10
3.3. Delimitación del problema	11
4. JUSTIFICACIÓN	13
5. OBJETIVOS	17
5.1. General.....	17
5.2. Específicos	17
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	19

7.	MARCO TEÓRICO	21
7.1.	Sistemas Eléctricos Trifásicos.....	21
7.1.1.	Origen.....	21
7.2.	Sistemas eléctricos trifásicos balanceados	23
7.3.	Corriente de neutro	24
7.4.	Tipos de cargas.....	25
7.4.1.	Cargas resistivas.....	26
7.4.2.	Cargas inductivas.....	26
7.4.3.	Cargas capacitivas	26
7.5.	Sistemas eléctricos trifásicos desbalanceados	27
7.5.1.	Origen de los sistemas trifásicos no balanceados..	28
7.5.1.1.	Cargas no balanceadas	28
7.5.1.2.	Dispositivos y fallas monofásicas.....	28
7.6.	Transformadores de potencia	29
7.6.1.	Definición.....	30
7.6.2.	Transformadores de potencia y distribución.....	30
7.6.3.	Relevancia del transformador de potencia	31
7.6.4.	Vida útil del transformador de potencia	32
7.6.5.	Fallas más comunes y aislamientos en el transformador	33
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	35
9.	METODOLOGÍA	39
9.1.	Características del estudio	39
9.2.	Unidades de análisis	39
9.3.	Variables	40
9.4.	Fases del estudio	41

9.4.1.	Fase 1: gestión o recolección de la información	41
9.4.2.	Fase 2: objetivo específico 1	42
9.4.3.	Fase 3: objetivo específico 2	42
9.4.4.	Fase 4: objetivo específico 3	42
10.	CRONOGRAMA.....	43
11.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	45
12.	REFERENCIAS.....	47

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Conexiones trifásicas estrella y delta	22
2.	Derivaciones de un sistema trifásico	29
3.	Cronograma	43

TABLAS

I.	Variables en estudio	40
II.	Bitácora de análisis para documentar procesos	41
III.	Recursos necesarios para la investigación	45

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Fase A
B	Fase B
C	Fase C
Z	Impedancia
kV	Kilovoltio
MW	Megavatios
N	Neutro
%	Porcentaje
V	Voltaje

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
ANSI	American National Standards Institute.
Armónicos	Ondas senoidales de diferente frecuencia que distorsionan una onda fundamental.
Bitácora	Instrumento para llevar un control, hacer anotaciones o tener registros.
Campo magnético	Espacio en la cual tienen lugar fenómenos magnéticos debido a la influencia de un cuerpo con propiedades magnéticas.
Cargas	Componente de un circuito eléctrico que ofrece mayor o menor oposición al paso de la corriente.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
Corriente	Circulación de electrones a través de un determinado medio como un conductor eléctrico.
CT	Transformador de corriente.
Desbalance	Desequilibrio de corrientes en un sistema eléctrico.

Efecto Joule	Es el calentamiento de los conductores eléctricos por el paso de la corriente.
Flicker	Es una variación rápida y cíclica de la tensión, que causa una fluctuación correspondiente en la luminosidad de las lámparas a una frecuencia detectable por el ojo humano.
Hueco de tensión	Fenómeno eléctrico que se produce de forma repentina en un punto particular de la red eléctrica, y que da lugar a una disminución de la tensión por debajo de un valor umbral (habitualmente 0.9 p.u.) como consecuencia de un aumento extremo de la corriente.
IEC	International Electrotechnical Commission.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
NEC	National Electrical Code.
Neutro	Punto de referencia dentro de un sistema eléctrico de potencia con tensión igual a cero voltios.
Potencia alterna	Onda senoidal con doble frecuencia, producto de la multiplicación de la onda de corriente y la onda de voltaje en un circuito eléctrico alterno.
PT	Transformador de potencial.

Red de distribución	Red eléctrica energizada con voltajes por debajo de los 13,800 voltios.
Subestación	Conjunto de elementos eléctricos, electromecánicos, obra civil, entre otros, destinados para la transmisión y distribución segura de la energía eléctrica.
Tensión	Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, medida en Voltios.
Transformador	Dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico.
Transportista	Agente del subsector eléctrico, que se encarga del transporte de energía eléctrica por medio de líneas de alta tensión.

RESUMEN

Los desequilibrios de las redes eléctricas trifásicas son sumamente frecuentes, más si son líneas de distribución de energía en donde un buen porcentaje de las cargas, corresponde a conexiones de viviendas familiares. Dado que son cargas del tipo monofásicas y se hacen de manera empírica, las fases de cada circuito quedan en desequilibrio, provocando así un desbalance de corriente, tensión y otros fenómenos contraproducentes en cada conductor, principalmente la aparición de corrientes de neutro, las cuales, según su magnitud, pueden ser nocivas para el buen funcionamiento de la red de distribución. Este problema tiene como consecuencia principal el aumento de pérdidas por efecto joule en conductores e histéresis en los transformadores.

Se plantea por medio de esta investigación, caracterizar el desbalance de corriente presente en las redes de distribución, y describir que efectos nocivos pueda tener para un transformador de potencia. En el área de regulación de la calidad de la energía, éste y otros parámetros son estudiados y calificados en diferentes países, sin embargo encontrar información específica y amplia del daño a los equipos provocado por el desbalance de corriente no es muy habitual, por lo que se sentará un precedente con esta investigación para aquellas personas interesadas en el tema y sobre todo describir la posible afectación en el transformador de potencia, uno de los equipos más importantes de un sistema eléctrico de potencia.

Con el resultado propuesto, se espera obtener un documento que apoye a las instituciones encargadas de regular la calidad de energía tanto de Guatemala como de países del área cercanos. Asimismo, si se mejora o

empieza a evaluar adecuadamente el desbalance de corriente, traerá consigo la mejora de la calidad de energía, áreas de oportunidad para las empresas involucradas en la generación, transporte y distribución de energía, actualización de las actuales normativas referentes al tema y en sí, un aporte positivo para el sector energético.

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación, se enfoca en hacer una revisión bibliográfica de un tema relacionado con el transporte y distribución de energía eléctrica, desde el punto de vista de las cualidades o características principales que debe tener la electricidad como un producto final. Específicamente, el estudio se centra en el desbalance o desigualdad de la corriente en las redes de distribución de energía, las cuales son principalmente del tipo monofásicas.

Los efectos de este desbalance de corriente, es un tema poco estudiado en comparación con otros parámetros que se miden para controlar la calidad de energía. No obstante en Guatemala, el desbalance de corriente es evaluado por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE). Por tal motivo, la presente investigación buscará ahondar en el tema, y a la vez tratará de determinar un posible efecto adverso en el transformador de potencia; equipo del cual se derivan las redes troncales de distribución de energía eléctrica, y el cual es el más importante de todos los elementos que forman parte de una subestación de transformación. En ese sentido, la presente investigación se considera como una caracterización de los referidos efectos.

El desbalance de corriente es una condición anormal de funcionamiento de los sistemas eléctricos trifásicos, ya que corrientes de distinta magnitud circularán en cada una de las líneas eléctricas. El problema se da principalmente, por una inadecuada distribución de cargas monofásicas al final de las líneas de distribución de energía. Esta situación aumenta las pérdidas en la distribución de energía, entre otros.

Para describir el fenómeno y determinar su efecto, se estará usando la técnica de revisión documental; de tal manera que se hará una búsqueda exhaustiva de toda la literatura relacionada al tema, incluyendo artículos científicos, estudios, tesis, normativas o estándares internacionales como IEEE, NEC o ANSI. También se hará uso de las normativas relacionadas al tema utilizadas por otros países. Se usará también, la información nacional relacionada al tema, la cual es publicada por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

Con la información ya recopilada, se procederá a clasificarla y depurarla, haciendo uso de técnicas de la investigación cualitativa, como por ejemplo el uso de bitácoras de registro de procesos, para ir registrando el avance en la investigación. Posteriormente, en base a los objetivos de cada fase del estudio, se hará la discusión de resultados y la emisión de conclusiones. Considerando que se hará una recopilación documental y el uso de información pública, además teniendo en cuenta que se cuentan con los medios necesarios para la realización de la presente investigación (recurso humano, tecnológico, etc.), la investigación será factible.

En el capítulo uno se detallará los resultados de investigaciones previas, que tengan relación con el tema de la presente investigación, con el fin de conocer los enfoques y alcances que dichas investigaciones han tenido.

En el capítulo dos se presentará toda la base teórica que sustentará a la investigación. Se enfocará principalmente en la descripción de los sistemas eléctricos trifásicos y las causas de su desbalance, la importancia de los transformadores de potencia y sus características esenciales, así como los daños más severos que pueden sufrir; en fin todo lo relacionado a las dos variables de la investigación.

En el capítulo tres se hará el desarrollo de la investigación, iniciando con la descripción de la metodología a usar, describiendo su diseño, enfoque alcance, unidad de análisis, variables y técnicas de análisis de información.

Posteriormente se desarrollará cada una de las fases de la investigación, las cuales son cuatro y corresponden a responder cada uno de los objetivos planteados para dar respuesta a la pregunta principal de la investigación. En estas fases, básicamente se busca determinar la relación que exista entre el desbalance de corriente en las redes de distribución y sus efectos en el transformador de potencia, en los siguientes elementos o parámetros: potencia alterna, bobinas y campo magnético.

Al finalizar las fases de la investigación, se hará una organización de la información obtenida, haciendo uso de técnicas recomendadas para el análisis y recopilación de información en investigaciones cualitativas.

En el capítulo cuatro se realizará la discusión de resultados, se hará la comparativa de la forma en que las distintas normativas y países se adentran en la evaluación del desbalance de corriente; asimismo, se hará una discusión de los resultados de las fases del estudio, de tal manera que se puedan obtener conclusiones para dar respuesta al objetivo principal de la investigación.

Finalmente, se agregarán anexos relacionados a datos estadísticos del desbalance de corriente de Guatemala y de países donde hallan datos de este tipo, a manera de tener una perspectiva general del tema.

2. ANTECEDENTES

En el trabajo de investigación ejecutado por Casaravilla y Echinope (2005), describen que se hará un análisis de las diferentes formas empleadas en algunos países para la estimación del desbalance de tensión y de corriente, y se propondrán pasos a seguir simplificados para la estimación de dichos desbalances.

Con los resultados del desbalance de tensión, aplicados a un caso específico, se migrará a realizar los cálculos del desbalance de corriente de una manera simplificada para sistemas de distribución. También, indican, que para medir la calidad de energía, se deben establecer ciertos parámetros o límites que no deben excederse en fenómenos como armónicos y flicker, huecos de tensión, desbalance de tensiones y de corrientes. Un sistema desbalanceado, se da cuando el módulo y/o el ángulo de desfase entre las componentes fundamentales de un sistema trifásico no son iguales.

La causa principal de este desbalance es la distribución de cargas monofásicas no balanceadas. El desbalance originará pérdidas por efecto joule en los conductores y también provocará un alterado funcionamiento de los motores asíncronos que se hallan con mucha frecuencia en las fábricas. Para poder sustentar el apoyo del artículo a la presente investigación:

El principal motivo para la existencia de redes trifásicas desbalanceadas lo constituye la distribución de ciertas cargas monofásicas no equilibradas a lo largo de la red, que a su vez cambia a lo largo del

tiempo dependiendo de la hora del día. (Casaravilla y Echinope, 2005, p. 1)

En la investigación desarrollada por Suárez, Di Mauro, Anaut y Agüero (2010), muestran los resultados de un estudio enfocado en las corrientes de neutro derivado del tipo de cargas que se le conecten a un sistema de alimentación trifásico; se hicieron simulaciones mediante un software combinando cargas balanceadas, desbalanceadas, simétricas y asimétricas. También se estudió el efecto de tener fuentes con armónicos de tensión en las corrientes de neutro. Como resultado se obtuvo, que es más importante el efecto de las cargas en las fuentes que viceversa.

Adicional se describe también, el impacto negativo en los sistemas de alimentación y de manera especial en las corrientes que circulan en el neutro, derivado de las cargas no lineales como computadoras y lámparas LED. La corriente del neutro en un 20 % de los comercios de los Estados Unidos es mayor que la corriente en las fases del sistema, según un estudio descrito en el artículo. Indican también que su estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento de la corriente del neutro al variar parámetros de las fuentes de alimentación. Para poder sustentar el apoyo del artículo a la presente investigación:

Otro aspecto importante a considerar cuando estas cargas son conectadas a sistemas trifásicos, es el nivel de corriente en el conductor de neutro que suele ser elevado y superar a la corriente de fase. Estudios realizados en Estados Unidos de América, revelaron que más del 20 % de los complejos comerciales tienen en sus instalaciones corrientes de neutro superiores a las corrientes de línea. (Suárez et al., 2010)

En la investigación desarrollada por Cadavid y Gallego (2003), indican proporcionar algunos conceptos básicos de la corriente del neutro provocada por cargas no lineales; se describe que, en un estudio realizado en Estados Unidos, aproximadamente en el 23 % de los lugares analizados, la magnitud del parámetro indicado superaba la magnitud nominal existente en los conductores de líneas vivas, ya que el valor máximo existente en el conductor neutro debe ser el 20% del valor de las líneas vivas. Para poder sustentar el apoyo del artículo a la presente investigación los autores afirman que: en sistemas trifásicos de cuatro hilos, se espera que la corriente en el conductor de neutro sea inferior al 20% de la corriente de fase, si las cargas son razonablemente balanceadas.

En la investigación desarrollada por Piumetto, Gómez y Vaschetti (2014), indican haber realizado un estudio sobre como la inserción de Generación en las redes eléctricas de las compañías distribuidoras, debe ser monitoreada de tal manera que no tenga injerencia negativa en los parámetros de calidad de energía en dichas redes. Indican que hicieron un estudio real en una provincia de Córdoba, Argentina, y, mediante la simulación por medio de software, concluyeron que es positiva la influencia de la generación distribuida en los sistemas de distribución.

En ese sentido, indican que el desbalance de tensión o corriente implica un impacto negativo para un sistema de potencia, puesto que se producen componentes de secuencia negativa u homopolar que aumentan las pérdidas en los equipos de los sistemas eléctricos de potencia, y que pueden afectar varios nodos mediante la propagación. El estudio se centra en la inserción de generación distribuida y sus efectos en los balances de tensión y corriente de un sistema físico escogido. Para poder sustentar el apoyo del artículo a la presente investigación:

En general los efectos del desbalance se resumen en la aparición de componentes de secuencia inversa y homopolar que dan como resultado pérdidas adicionales de potencia y energía, calentamiento adicional de máquinas que limita la capacidad de carga nominal, reducción en el transporte de potencia en los sistemas de distribución y propagación del desbalance a otros nodos de conexión de la red. (Gómez, 2005). (Piumetto et al., 2014, p. 92)

En el trabajo investigativo llevado a cabo por Álvarez, Torres y Espinosa (2021), en el Caso de estudio subestación Tallapiedra en la Universidad Tecnológica de la Habana, describen una falla ocurrida en una subestación de transformación 110/13.8 kV, específicamente en un CT ubicado junto a un elemento de compensación reactiva, el cual se dañó por completo derivado de una gran corriente circulando por él. También señalan, que los elementos de compensación reactiva se pueden configurar en estrella o delta, y que poseen protecciones como lo son fusibles internos o externos.

A la vez indican que, los CT's son importantes en el esquema para proteger a los distintos elementos de compensación reactiva y que son configurados de acuerdo a las necesidades de cada subestación. Para poder sustentar el apoyo del artículo a la presente investigación:

Los transformadores de corriente conectados al neutro que se emplean para la protección de desbalance 60N [10], poseen una relación de transformación pequeña. Esto es debido, a que necesitan medir con cierta precisión la corriente de desbalance producto a la salida de servicio de las unidades que componen al banco, para evitar que las unidades restantes estén sometidas a sobretensiones no admisibles [11]. (Álvarez et al., 2021, p. 2)

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desbalance de corriente en sistemas eléctricos trifásicos, puede ser un indicador de mala calidad de energía eléctrica, dado que circulan corrientes altas por el conductor de neutro en estos sistemas. Esta corriente a su vez, puede dañar equipos importantes como transformadores. Además, el desbalance de corriente reduce el aprovechamiento de la energía eléctrica y esto a su vez, repercute en el medio ambiente, especialmente si la energía proviene de fuentes no renovables.

3.1. Contexto general

En Guatemala existen tres grandes empresas dedicadas a la distribución de energía eléctrica a lo largo del país. Dentro de los muchos parámetros de calidad que se miden en sus redes de distribución, se encuentra el desbalance de corriente, el cual se da principalmente por una mala distribución de cargas conectadas en su red. Con la creación de la Ley General de Electricidad en el año 1996, se emitieron una serie de normativas técnicas para regular este y otros parámetros relacionados al tema de calidad de energía.

La normativa específica que evalúa el desbalance de corriente en el país, impone una indemnización económica a favor del Transportista, la cual hace efectiva el distribuidor con quien se conecta. El desbalance de corriente ha venido incrementándose a lo largo del tiempo, saliendo de las tolerancias límites numerosos circuitos de distribución.

3.2. Descripción del problema

El desbalance de corriente se da principalmente por una mala distribución de cargas en los sistemas eléctricos trifásicos, principalmente en la red de media tensión como ocurre en Guatemala. Dentro de las principales causas del problema, se han identificado la mala distribución de cargas en dichos circuitos y el dinamismo de cargas. Como consecuencias, se han observado en primer lugar, el incumplimiento a la normativa actual, la afectación en calidad del servicio y una posible afectación en los transformadores de potencia a donde se conectan los principales circuitos eléctricos trifásicos.

3.2.1. Formulación del problema

La formulación del problema se realiza por medio de las preguntas que se detallan a continuación.

3.2.1.1. Pregunta central

¿Cuál es la caracterización entre el desbalance de corriente en las redes de distribución y los posibles efectos en el transformador de potencia en una subestación de un Transportista?

3.2.1.2. Preguntas auxiliares

Para responder a esta interrogante se deben contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuál es la relación que existe entre el desbalance de corriente en las redes de distribución y los posibles efectos en la potencia eléctrica alterna en el transformador de potencia?
- ¿Cuál es la relación que existe entre el desbalance de corriente en las redes de distribución y los posibles efectos en las bobinas del transformador de potencia?
- ¿Cuál es la relación que existe entre el desbalance de corriente en las redes de distribución y los posibles efectos en el campo magnético del transformador de potencia?

3.3. Delimitación del problema

Como se ha mencionado anteriormente, el desbalance de corriente tiene como causa principal la mala distribución de cargas monofásicas, que finalmente se conectan a la red eléctrica de las compañías Distribuidoras.

Como consecuencia del desbalance de corriente, surgirán corrientes no deseadas en los sistemas trifásicos que afectarán tanto a los equipos e instalaciones, como a la calidad del servicio de energía. Enfocándonos en los equipos, será de especial interés determinar el daño que pueda darse en el equipo más importante de una subestación de transformación: el transformador de potencia.

De lo descrito en los párrafos anteriores, surge la pregunta central: ¿Cuál es la caracterización entre el desbalance de corriente en las redes de distribución y los posibles efectos en el transformador de potencia en una subestación de un Transportista?

4. JUSTIFICACIÓN

Sabemos de la importancia mundial que tiene actualmente la electricidad, ya que sin ella, no serían posibles muchos procesos importantes para el desarrollo de la humanidad como lo son los procesos industriales, la producción y conservación de alimentos, iluminación, calefacción, entre muchos más. Junto con esta conciencia de la importancia de la electricidad en nuestro diario vivir, viene otro factor que actualmente cobra más relevancia, y es el de la calidad de energía, que al ver a la electricidad como un producto final, evalúa distintos parámetros como la calidad de onda, la regulación de tensión, los armónicos y flicker, las interrupciones y el desbalance de corriente.

Estos parámetros, afectan a los usuarios finales como a las empresas Distribuidoras y Transportistas de energía eléctrica. El parámetro de calidad de energía llamado desbalance de corriente, evalúa que las corrientes en un sistema eléctrico trifásico sean lo más parecidas posibles, caso contrario, existirán corrientes que se desplazarán por dichos sistemas que tendrán efectos nocivos tanto para los equipos de las empresas Distribuidoras como de las empresas de Transporte de energía; y que al final, se traducirán en costos más altos de mantenimientos o reemplazo de equipos.

En Guatemala, actualmente La Ley General de Electricidad y su Reglamento, mediante normas técnicas emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, regulan el indicador de desbalance de corriente mediante ciertas tolerancias límites, que no deben ser superadas por las empresas Distribuidoras de energía eléctrica en la operación diaria de sus instalaciones. Si estas tolerancias son superadas, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica

en conjunto con Administrador del Mercado Mayorista (AMM) impondrá una indemnización económica a favor del Transportista, que deberá ser acreditada por la Distribuidora con la cual se interconecta, con el propósito de incentivar a la dicha empresa, a corregir su problema de desbalance de corriente. En ese sentido, el presente trabajo se centra en hacer una revisión de diferente literatura relacionada a uno de estos estándares de calidad denominado desbalance de corriente, desde el punto de vista de los efectos técnicos y económicos que pueda tener en las instalaciones de un Transportista, específicamente en el transformador de potencia.

Como resultado de esta investigación, se obtendrá un análisis y/o estudio que servirá de referencia o consulta para toda persona interesada en el tema, o bien, como una guía de comparación con la normativa nacional, que podría incentivar una futura actualización en la forma de fiscalizar o evaluar el desbalance de corriente. Esto traería implícito una mejora en la calidad y eficiencia con que se distribuye la energía eléctrica, y con ello impactar directamente la calidad de energía que recibirán los hogares de las familias guatemaltecas.

Aunado a lo anterior, el producto obtenido de la presente investigación, podrá ser usada por los distintos entes reguladores del subsector eléctrico en países de la región, para mejorar o implementar la regulación del desbalance de corriente en sus naciones.

Por medio de esta investigación, se obtendrá un análisis y/o estudio descriptivo y fundamentado, que servirá de guía o referencia para las personas o entes reguladores de los subsectores eléctricos regionales interesados en el tema, a la vez que se dará un plus extra en cuanto a describir si el desbalance de corriente suscitado en las redes de distribución, puede tener efectos nocivos

en el transformador de potencia. En ese sentido, la presente investigación podrá ser motivadora de cambios o reformas o la implementación de la fiscalización del indicador de desbalance de corriente en países de la región, y con ellos beneficiar a los usuarios finales de electricidad al proveerle un servicio de mejor calidad.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Determinar la relación que existe entre el desbalance de corriente en las redes de distribución y los posibles efectos en el transformador de potencia de una subestación de un Transportista.

5.2. Específicos

- Determinar la relación que existe entre el desbalance de corriente en las redes de distribución y los posibles efectos en la potencia eléctrica alterna del transformador de potencia de una subestación de un Transportista.
- Identificar la relación que existe entre el desbalance de corriente en las redes de distribución y los posibles efectos en las bobinas del transformador de potencia en una subestación de un Transportista.
- Analizar la relación que existe entre el desbalance de corriente en las redes de distribución y los posibles efectos en el campo magnético del transformador de potencia de una subestación de un Transportista.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

La institución estatal que regula el problema principal podría tomar como referencia los resultados de la presente investigación, los cuales podrían ayudar a identificar causas y proponer soluciones que para mitigar el aumento del desbalance de corriente a nivel nacional, y de esa manera impactar positivamente el buen funcionamiento del subsector eléctrico guatemalteco.

Una primera parte sería afrontar y describir el fenómeno como tal del desbalance de corriente, con apoyo en literatura de ingeniería eléctrica como artículos científicos, tesis, estándares internacionales, entre otros. La segunda parte, sería tomar la guía de los objetivos específicos para ir avanzando en la investigación. La tercera parte, sería describir la situación actual de Guatemala frente al tema estudiado, tanto de la parte normativa como de los índices de desbalance en los circuitos de distribución. Finalmente en base a las tres anteriores, hacer conclusiones y recomendaciones.

De acuerdo a investigaciones previas, se tiene poca información del desbalance de corriente, por lo que un estudio a profundidad del tema, sería un aporte novedoso para el sector energético. En base a las líneas de investigación, se ajusta muy bien a la línea de Impactos Económicos en Proyectos de Transporte, aunado a esto que actualmente la regulación de dicho problema conlleva el tema económico en la línea de indemnizaciones.

Se analizará también, estándares como IEEE, NEC o IEC, que darán un soporte internacional muy acertado para el tema de desbalance de corriente.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Sistemas eléctricos trifásicos

Cuando se desea transportar y distribuir la electricidad a los diferentes lugares donde se necesite, se opta por utilizar redes de tres conductores, ya que éste tipo de configuraciones ofrece muchas ventajas tanto técnicas como económicas, respecto a las redes de un solo conductor.

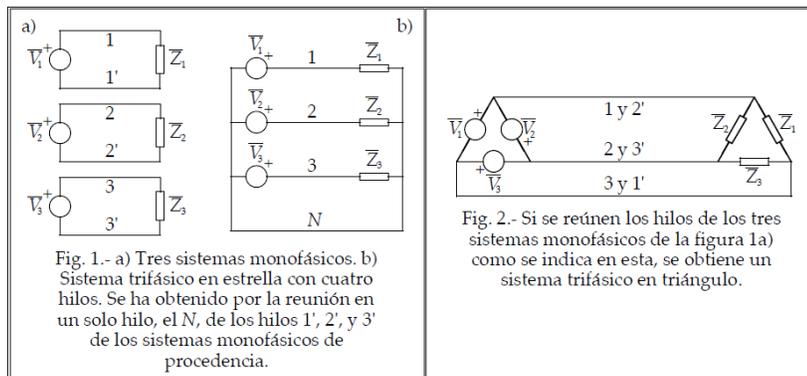
7.1.1. Origen

Estos sistemas surgieron como resultado de la unión de tres sistemas monofásicos, y habitualmente, se pueden conectar en configuración estrella, uniendo un conductor de cada sistema monofásico por medio de un hilo (neutro), y, la conexión delta, en donde se sustituyen pares de conductores de cada uno de los sistemas monofásicos (Quintela, Redondo, Melchor, Arévalo y Redondo, 2005). La Figura 1 muestra lo indicado anteriormente.

Es importante recordar, que los sistemas eléctricos trifásicos están compuestos de generadores y de cargas. Dentro de todo el proceso relacionado a la energía eléctrica, los generadores son los primeros elementos que aparecen, ya que de ellos se obtiene la electricidad que será transportada por las redes trifásicas; es por eso y por las ventajas de los sistemas de tres conductores, que estos dispositivos están diseñados principalmente con tres terminales de salida. Las cargas son los últimos elementos dentro del proceso, y para efectos de análisis de circuitos, se les identifica como impedancias. Las

cargas pueden clasificarse como inductivas, capacitivas y resistivas, como se describirá más adelante.

Figura 1. Conexiones trifásicas estrella y delta



Fuente: Quintela et al. *Teorema de la potencia de multipolos y medida de potencia en sistemas trifásicos*. Consultado 15 de marzo de 2022. Recuperado de <https://electricidad.usal.es/Principal/Circuitos/Descargas/MedidaPotenciaTrifasica.pdf>

Estos sistemas alimentan principalmente cargas grandes, como lo son fábricas, comercios, motores etc. Para que el sistema se dé en las mejores condiciones, estas cargas deberán ser lo más idénticamente posible en cuanto a su impedancia para cada conductor. (Grainger y Stevenson, 1996).

Finalmente, como apoyo a las ventajas de los sistemas trifásicos respecto a los sistemas monofásicos, se puede agregar que la potencia instantánea es constante en estos sistemas, pese a que las potencias individuales tengan variaciones en el tiempo; por lo que el conjunto de las tres potencias compensara la variación individual. (Rodríguez, s.f.).

7.2. Sistemas eléctricos trifásicos balanceados

Estos sistemas se caracterizan, porque las ondas senoidales de voltaje y/o corriente están desfasadas 120 grados en el tiempo una con respecto a la otra, además, las magnitudes pico de éstas señales deben tener la misma magnitud. Fasorialmente, los sistemas trifásicos balanceados se dan cuando los fasores de cada fase, se encuentran separados 120 grados geométricos y su magnitud (tamaño del vector) es la misma.

Al respecto de fasores, García y Riaño (2018) los definen de la siguiente manera: “Un fasor es un número complejo compuesto por una magnitud y un ángulo relativo para representar una señal sinusoidal de voltaje y de corriente” (p. 67). El uso de fasores ofrece una ventaja para el análisis y estudio de los sistemas trifásicos, dado que es más fácil usar una notación de vector y ángulo giratorio, que el uso de las ecuaciones del tipo senoidales tanto de corriente como de voltaje; los cálculos se simplifican considerablemente, así como el proceso para la recolección de información de la red eléctrica. (Hart, Uy, Gharpure, Novosel, Karlsson y Kaba, 2001)

Según Rodríguez (s.f.), un sistema trifásico balanceado deberá cumplir los siguientes requisitos:

- Los generadores producen un sistema equilibrado de tensiones. Esto significa que las tres tensiones son de igual valor eficaz y existe un desfase de 120° (es decir, $2\pi/3$ radianes) entre cada par de ellas.
- Las tres corrientes i_R , i_S e i_T también forman un sistema equilibrado de corrientes. Es decir, tienen el mismo valor eficaz y están desfasadas 120° entre sí.

- Las impedancias forman un sistema equilibrado de impedancias. Esto significa que las tres impedancias tienen el mismo valor eficaz y el mismo factor de potencia.

Se podría decir entonces, que el desfase de 120 grados y las magnitudes constantes de voltaje y corriente, son indispensables para que se dé un sistema trifásico balanceado.

7.3. Corriente de neutro

Como se mencionó anteriormente, las configuraciones básicas para la conexión de sistemas trifásicos, suelen ser en estrella o en delta, y tendrán tres o cuatro conductores. Si los sistemas son balanceados, puede existir o no el cuarto conductor, denominado conductor de neutro; es decir, que con o sin este conductor el sistema funcionara de la misma manera si y solo si, el sistema está balanceado (Rodríguez, s.f).

La corriente de neutro tiene su origen en la suma fasorial de las tres corrientes de fase de los sistemas trifásicos; si el sistema es balanceado, las componentes se anularán dando como resultado una corriente igual a cero; caso contrario, si el sistema es desbalanceado, las corrientes serán diferentes y por ende el resultado de la suma de las tres corrientes no será igual a cero, circulando una corriente por el conductor del neutro de magnitud variable, dependiente las condiciones de desbalance del sistema. No obstante, tener un sistema balanceado al 100 % es sumamente difícil.

En sistemas con un porcentaje de balanceo aceptable, la corriente de neutro debe rondar por el 20 % de las corrientes que circulen por los otros tres conductores de fase; no obstante, la corriente que circule por el conductor de

neutro se puede incrementar por el tipo de las cargas conectadas, entre las cuales se tienen: laptops, multifuncionales, equipos electrónicos entre otros (Cadavid y Gallego, 2003).

Como ya se mencionó y se abordará más a detalle posteriormente, tener un sistema trifásico balanceado 100 % es muy difícil de conseguir, sin embargo los efectos en equipos y sistema en general de la corriente de neutro, incentivan a crear métodos para reducir el valor de la misma a valores más bajo posibles, o bien, tolerables por los equipos, sin que estos sufran daños adicionales.

7.4. Tipos de cargas

Las cargas van a ser aquellos elementos o dispositivos que finalmente se conectaran a las líneas de alimentación eléctrica y en donde termina la cadena de suministro de energía, como por ejemplo: residencias, alumbrado público, industrias, comercios, entre otros. También se les puede llamar centros de consumo o demanda, y se clasifican en tres diferentes categorías: inductivas, capacitivas y resistivas.

García, Sellschopp y Vargas (2016) al respecto de las cargas, mencionan lo siguiente:

En una red o circuito eléctrico, a los elementos pasivos conectados en paralelo se les conoce como cargas, ya que por medio de ellos la energía eléctrica se consume dependiendo de la intensidad de corriente que circule en ellas, por lo que dicha corriente se le conoce como corriente de carga de características resistiva, inductiva o capacitiva dependiendo de la predominancia que se tenga. (p. 29)

7.4.1. Cargas resistivas

En esta clasificación se incluyen aquellas cargas que tienen mayor cantidad o predominancia de elementos puramente resistivos, como lo son calentadores de agua, hornos eléctricos, planchas, bombillas incandescentes, entre otros. En este tipo de cargas, no existe desfase entre la tensión y la intensidad que haya en estos elementos.

7.4.2. Cargas inductivas

Las cargas inductivas se caracterizan por tener predominancia de elementos que contienen en su interior inductores o bobinas, por ejemplo: motores, computadoras, luces LED, dispositivos electrónicos en general. Vale la pena resaltar, que las cargas de tipo inductivo, son las que se hallan habitualmente en los diferentes centros de consumo. Asimismo, la tensión y la intensidad en estos elementos no estarán alineados o en fase, existiendo 90 grados de separación entre los vectores de dichos parámetros.

7.4.3. Cargas capacitivas

Si en las cargas inductivas predominaban elementos que tuvieran en su interior muchos inductores o bobinas, en las cargas capacitivas deben predominar aquellos elementos en cuyo interior exista gran cantidad de capacitores; no obstante, es muy raro encontrar este tipo de cargas en los distintos centros de consumo, y si se encuentran, se hallan como bancos trifásicos de capacitores, instalados en fábricas o industrias con propósitos de corregir algún problema de factor de potencia. En este caso, la corriente se adelanta al voltaje en 90 grados.

Se puede decir entonces, que de los tres tipos de cargas, las más frecuentes de hallar, serán las cargas inductivas en donde existe un desfase entre corriente y voltaje, donde la primera se adelanta en 90 grados respecto a la segunda.

7.5. Sistemas eléctricos trifásicos desbalanceados

Contrario a las características de simetría observadas en las configuraciones trifásicas equilibradas, en este tipo de sistemas, no se observa igualdad ni en la longitud de los vectores de voltaje y corriente, ni en el ángulo de separación de estos parámetros. Este tipo de escenarios son los que mayormente se encuentran en la vida cotidiana, dado que las conexiones realizadas para alimentar las distintas cargas se hacen de forma experimental, provocando así que, en las redes trifásicas, una fase tenga más usuarios o cargas conectadas que otra. Issouribehere, Barbero y Barbera (2009) indican lo siguiente:

El desbalance de una variable trifásica es una condición en la que las tres fases presentan diferencias en el módulo y/o desplazamientos angulares entre fases distintos de 120 grados eléctricos. La variable trifásica indicada de manera genérica puede ser indistintamente, la tensión fase-neutro- la tensión de línea o la corriente en un sistema trifásico. (p. 1)

Existen muchos circuitos primarios trifásicos desbalanceados debido a que para alimentar las cargas utilizan transformadores monofásicos, tienen dispositivos de accionamiento monofásico o monopolar y la mayoría de las fallas son monofásicas (Gómez y Zapata, 2007). Otra de las causas, es que se conectan muchas cargas a la red de distribución de manera experimental,

obviando así, la importancia de conectar cargas de manera balanceada (De la Cruz, 2019).

7.5.1. Origen de los sistemas trifásicos no balanceados

En los subtítulos siguientes se describe el origen de los sistemas trifásicos no balanceados.

7.5.1.1. Cargas no balanceadas

Si bien las redes de distribución están conformadas por numerosos circuitos trifásicos, finalmente a la mayoría de los usuarios se les alimenta con líneas y transformadores monofásicos que se derivan de las líneas trifásicas, en vez de construir directamente un sistema trifásico; esto se debe a que es más económico hacer derivaciones monofásicas para alimentar a los usuarios finales, que construir líneas trifásicas (Gómez y Zapata, 2006). La Figura 2, explica de mejor manera esta situación.

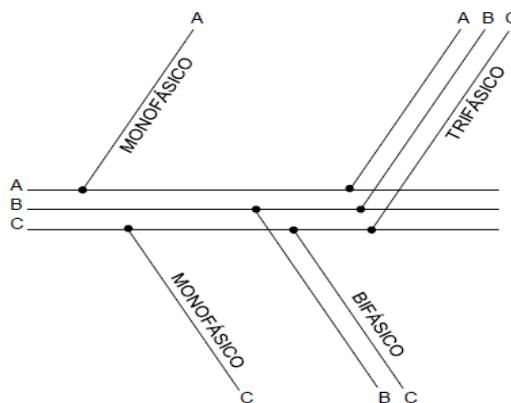
7.5.1.2. Dispositivos y fallas monofásicas.

Sucede también, que se utilizan numerosos dispositivos de protección y seccionamiento monofásicos, como por ejemplo: fusibles, seccionadores, interruptores, PT's, CT's y pararrayos, los cuales ante una falla, se accionan abriendo la línea monofásica al cual pertenecen, dejando así, desbalanceado el sistema trifásico del cual se derivan. Sumado a esto, datos estadísticos muestran que entre 7 y 8 de cada 10 problemas suscitados en las subestaciones y/o líneas del tendido eléctrico en general, tienen como origen problemas en líneas monofásicas. Esto refuerza la idea, que otras de las

causas del desbalance en las redes trifásicas, se debe a la operación de elementos monofásicos (Gómez y Zapata, 2006).

A manera de resumen, se podría decir que una red trifásica esta desbalanceada cuando las cargas que se conectan en cada una de sus líneas requieren diferente potencia eléctrica, tanto por su tamaño, tipo y cantidad, ocasionando de esa manera, que una línea este más sobrecargada que otra.

Figura 2. **Derivaciones de un sistema trifásico**



Fuente: De la Cruz. *Corrección de simetría de corrientes en redes eléctricas de distribución mediante óptima conexión de transformadores monofásicos empleando búsqueda exhaustiva.*

Consultado 20 de marzo de 2022. Recuperado de

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18065/1/UPS%20-%20ST004377.pdf>

7.6. Transformadores de potencia

Los detalles y clasificación de los transformadores de potencia se describen en los siguientes subtítulos.

7.6.1. Definición

Los transformadores de potencia son elementos eléctricos conformados básicamente por un núcleo de material ferromagnético, dos bobinas o devanados y un campo magnético producido al conectar corriente eléctrica en una de estas bobinas. Su funcionamiento se basa en la ley de inducción de Faraday y cumple la importante misión de transformar tensiones entre sus dos devanados (sin que haya conexión física entre ambos), ya sea aumentando o reduciendo los niveles de tensión conectados en alguno de estos elementos.

Ortiz (2016) los define de la siguiente manera:

Los transformadores son dispositivos pasivos que utilizan el principio de inducción electromagnética (Ley de Faraday) para elevar o reducir la tensión de la energía suministrada. Estos dispositivos poseen dos tomas, una de alta tensión y otra de baja tensión. Su devanado primario es aquél por el que entra la energía, siendo el secundario por el que sale; aunque hay que considerar que son máquinas reversibles, es decir, se pueden alimentar por cualquiera de los dos lados. Ambos devanados están eléctricamente aislados, de modo que cualquier daño producido en el circuito primario, no se propaga al secundario. (p. 17)

7.6.2. Transformadores de potencia y distribución

Ortiz (2016) indica que los transformadores de potencia, son aquellos que están instalados en las grandes centrales generadoras de electricidad, transformando a niveles altos el voltaje para transmitir la energía eléctrica a bajas corrientes, y también se encuentran instalados en las subestaciones eléctricas para reducir a niveles más bajos el voltaje y poder ser distribuidos.

Los transformadores de distribución se usan para alimentar las cargas finales o usuarios, ya que operan a voltajes medios y bajos.

También apunta a que la mayoría de los países clasifica como transformadores de distribución, a aquellos que se encuentran instalados en la red de distribución, alimentan cargas residenciales, industriales y comerciales y operan con voltajes inferiores a los 36 kV; mientras que los transformadores de potencia están instalados en subestaciones y grandes centrales generadoras y operan a niveles de voltaje superiores a los 36 kV.

7.6.3. Relevancia del transformador de potencia

Por su importante y peculiar función, de elevar o bajar los niveles de tensión para hacer posible que la electricidad pueda llegar desde donde se produce hasta donde se utiliza, así como por su precio elevado y considerando que toma meses adquirir uno nuevo para reemplazarlo, el transformador de potencia se considera el equipo más importante de una subestación.

Flores, Mombello, Rattá y Jardini (2007) al respecto de la importancia del transformador, indican que su función debe “ser un enlace confiable entre las distintas partes de un sistema de potencia que están a diferentes niveles de tensión” (p. 50).

En relación con el costo de un transformador, Zorrilla, Céspedes y García (2020) indican lo siguiente:

Adicionalmente, la sustitución de dichos activos después de una falla súbita o mantenimiento correctivo a menudo no es una alternativa económicamente óptima, ya que los costos asociados a esta pueden ser

enormes y muchos de los modos de falla dependen de las condiciones de trabajo de cada transformador. (p. 184)

En esa misma línea de ideas, Cerón, Orduña, Aponte y Romero (2014) señalan que: “Este es un equipo de capital intensivo y puede alcanzar hasta el 60 % del total de la inversión de una subestación, además es fundamental para la operación de cualquier sistema de potencia” (Naderian et al., 2009, p. 101).

Flores et al. (2007) refiriéndose a la vida útil y su relación con la temperatura apuntan lo siguiente:

está diseñado para lograr una vida útil de 20-35 años y una vida mínima de 25 años a temperaturas de funcionamiento comprendidas entre 65 °C y 95 °C [2]. Aunque en la práctica la vida de un transformador de potencia podría llegar a 60 años con un mantenimiento adecuado. (p. 50)

Finalmente, Cerón et al. (2014) indican que “El costo promedio de reemplazo de un transformador de 100 MVA puede alcanzar los US\$ 2 millones y puede tomar de 18 a 24 meses su construcción (Energy D., 2014)” (p. 101).

7.6.4. Vida útil del transformador de potencia

Al igual que los distintos tipos de máquinas eléctricas, los transformadores están también sujetos a desgastes, esfuerzos térmicos, mecánicos y eléctricos, condiciones atmosféricas de intemperie entre otros. Asimismo, una mala operación de los mismos, una falla eléctrica externa, falta de mantenimiento serán factores que también afectarán la vida útil y buen funcionamiento de estos equipos. Uno de los factores más determinantes para

mantener en buenas condiciones un transformador es su temperatura de operación.

Estos equipos vienen con un rango de temperatura al cual pueden funcionar que ronda alrededor de los 65-95 grados centígrados, como se mencionó anteriormente; no obstante, aunque podría creerse que un aumento más allá de su temperatura nominal no podría afectar tanto al transformador, se estima que un incremento de 10 grados en la temperatura acortara a la mitad de años la vida de dicho equipo. Razón por la cual, los encargados de operar y maniobrar estos elementos tienen especial cuidado en el control de temperatura al cual se encuentran funcionando estos equipos.

7.6.5. Fallas más comunes y aislamiento en el transformador

Una de las fallas más comunes, según un estudio realizado a una muestra de 94 transformadores de potencia de más de 25 MVA alrededor del mundo, fueron las fallas en aislamiento, principalmente de los embobinados y bushings (Álvarez y Del Pozo, 2007). Es preciso recordar que los aislamientos, tal como su nombre lo indica, tienen como objetivo aislar eléctricamente aquellas partes o elementos de un dispositivo eléctrico, tanto de otras partes de ese mismo elemento como de un elemento externo, esto con el propósito de evitar que existan cortocircuitos que puedan afectar gravemente a los distintos elementos eléctricos. Ortiz (2016) al respecto del aislamiento en transformadores indica lo siguiente: “Los fluidos utilizados en transformadores cumplen la doble función de ser aislante eléctrico, y medio de refrigeración.” (p. 22).

Enfocándose en el aislamiento de los devanados del transformador, Flores et al. (2007) indican lo siguiente: “El papel impregnado con aceite se utiliza con

gran profusión como aislamiento de los devanados del transformador, razón por la que en la industria rige la premisa que: *la vida del transformador es la vida del papel*". (p. 50). Según las guías de carga de IEEE e IEC, el envejecimiento del aislamiento del transformador, dependen casi exclusivamente de la degradación térmica de las características del papel aislante de los embobinados (Flores et al., 2007).

Como se mencionó anteriormente, es muy importante controlar la temperatura en estos equipos, de manera especial, la temperatura de sus devanados. Puesto que estos elementos se encuentran instalados en el núcleo de los transformadores, medir directamente su temperatura resulta imposible, por lo que la medición se hace de forma indirecta, midiendo la temperatura del aceite dieléctrico en el que se encuentran sumergidos estos elementos (Ortiz, 2016).

Los transformadores de potencia están diseñados para soportar las temperaturas nominales de funcionamiento, sin embargo, el líquido dieléctrico que es uno de sus principales medios de enfriamiento se va degradando con el tiempo (Ortiz, 2016). Por lo que el control y medición constante de su temperatura, la correcta operación, evitar esfuerzos eléctricos y un buen plan de mantenimientos, serán claves para una larga vida útil de dicho equipo.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

- 1.1 Estudios previos (recientes)
- 1.2 Antecedentes

2. MARCO TEÓRICO

- 2.1. Sistemas Eléctricos Trifásicos
 - 2.1.1. Origen
- 2.2. Sistemas Eléctricos Trifásicos Balanceados
- 2.3. Corriente de Neutro
- 2.4. Tipos de Cargas
 - 2.4.1. Cargas resistivas
 - 2.4.2. Cargas inductivas
 - 2.4.3. Cargas capacitivas
- 2.5. Sistemas Eléctricos Trifásicos No Balanceados
 - 2.5.1. Origen de los Sistemas Eléctricos Desbalanceados
 - 2.5.1.1. Cargas no balanceadas

- 2.5.1.2. Dispositivos y fallas monofásicas
- 2.6. Transformadores de Potencia
 - 2.6.1. Definición
 - 2.6.2. Transformadores de Potencia y Distribución
 - 2.6.3. Relevancia del Transformador de Potencia
 - 2.6.4. Vida útil del Transformador de Potencia
 - 2.6.5. Fallas más comunes y aislamiento en el Transformador de Potencia
- 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
 - 3.1. Características del estudio
 - 3.1.1. Diseño
 - 3.1.2. Enfoque
 - 3.1.3. Alcance
 - 3.1.4. Unidad de análisis
 - 3.2. Variables
 - 3.3. Fases del desarrollo de la investigación
 - 3.3.1. Fase 1
 - 3.3.2. Fase 2
 - 3.3.3. Fase 3
 - 3.3.4. Fase 4
 - 3.3.5. Organización de la información
 - 3.3.5.1. Datos generales
 - 3.3.5.2. Datos específicos
 - 3.3.5.2.1. Desbalances
 - 3.3.5.2.2. Efectos del Desbalance
 - 3.3.5.2.3. Afectación de Transformador de Potencia

3.4. Obtención de insumos

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Documentos y normativas consultadas

4.2. Afectación del Transformador de Potencia derivado del desbalance de corriente

4.3. Discusión de Resultados

4.3.1. Relación Desbalance de corriente y daños en Transformador de Potencia

4.3.2. Normativa nacional vrs normativa Internacional.

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Características del estudio

El enfoque del estudio propuesto es cualitativo, ya que será una investigación documental, donde se buscará profundizar en la naturaleza de las variables elegidas.

El alcance es descriptivo, derivado de que buscará profundizar en las características del desbalance de corriente en las redes de distribución para poder exponer los efectos o consecuencias en un transformador de potencia.

El diseño adoptado será no experimental, puesto que la información del desbalance de corriente en las redes de distribución y sus posibles efectos en el transformador de potencia de una subestación de un transportista se analizará en su estado original sin ninguna manipulación; además será transversal, ya que se buscará analizar la interrelación de las variables en un momento dado.

9.2. Unidades de análisis

La unidad de análisis del estudio, serán las líneas de distribución de energía eléctrica que se conectan al secundario de los transformadores de potencia en una subestación transformadora y que normalmente son trifásicas, de las cuales se extraerán aquellas líneas que correspondan a empresas Distribuidoras de energía únicamente, para el análisis del desbalance de corriente.

9.3. Variables

Las variables en estudio se describen a continuación:

Tabla I. **Variables en estudio**

Variable (categoría)	Definición Teórica	Definición Operativa
Desbalance de corriente	El desbalance, tanto de tensión como de corriente, se considera cuando los fasores son desiguales en relación a su magnitud, así como cuando la separación angular entre ellos se aparta de los 120 grados entre sí. Dada esta definición, el desbalance se produce en los sistemas eléctricos trifásicos y este dependerá siempre de las cargas que son alimentadas, variando por el tipo de alimentación de cada una de ellas (cargas monofásicas) así como también por el tipo de cargas que sean (cargas no lineales).	Con la ayuda de Bitácora de análisis para documentar procesos, se llevará el registro y avance de las variables, en función de la cantidad de artículos, tesis, normativas, entre otros, según la dimensión de las variables. Las cantidades de artículos para cada dimensión están en el rango de 3 a 5, según importancia para el estudio y se detalla en la matriz de operacionalización.
Transformador de potencia	Un transformador es un dispositivo que cambia la potencia eléctrica alterna con un nivel de voltaje a potencia eléctrica alterna con otro nivel de voltaje mediante la acción de un campo magnético. Consta de dos o más bobinas de alambre conductor enrolladas alrededor de un núcleo ferromagnético común. Estas bobinas (normalmente) no están conectadas en forma directa. La única conexión entre las bobinas es el flujo magnético común que se encuentra dentro del núcleo.	Con la ayuda de Bitácora de análisis para documentar procesos, se llevará el registro y avance de las variables, en función de la cantidad de: artículos, tesis, normativas, entre otros, según la dimensión de las variables. Las cantidades de artículos para cada dimensión están en el rango de 3 a 5, según importancia para el estudio.

Fuente: elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, se usará la siguiente propuesta de bitácora para llevar a cabo la medición en el avance de la investigación.

Tabla II. **Bitácora de análisis para documentar procesos**

VARIABLE:					
DIMENSIÓN:					
No.	Título de documento	Tipo (tesis, artículo, libro etc)	Aporte a Investigación (Alto/Medio/bajo)	Útil (si/no)	% Transcripción de utilidad

Fuente: elaboración propia.

9.4. Fases del estudio

Se describirán a continuación cuatro fases del estudio, en las cuales básicamente se hará uso de la técnica de revisión documental, y posteriormente, una clasificación de los mismos, según sean adecuados para cada fase.

9.4.1. Fase 1: gestión o recolección de la información

En la primera fase se realizará una búsqueda, análisis, consulta y clasificación de las bibliografías, información y normativas relacionadas al tema, de manera que se puedan ampliar los conocimientos del desbalance de corriente en las redes de distribución enfocados en los efectos que pueda

causar a otros elementos de la red, de manera especial a los transformadores de potencia.

9.4.2. Fase 2: objetivo específico 1

En esta fase se determinará la relación que exista entre el desbalance de corriente en las redes de distribución y los posibles efectos en la potencia eléctrica del transformador de potencia al cual se conectan. Se usará la técnica de revisión documental para seleccionar los documentos que se ajusten a la temática tratada.

9.4.3. Fase 3: objetivo específico 2

En esta fase se identificará la relación que exista entre el desbalance de corriente en las redes de distribución y los posibles efectos en las bobinas del transformador de potencia al cual se conectan. Se usará la técnica de revisión documental para seleccionar los documentos que se ajusten a la temática tratada.

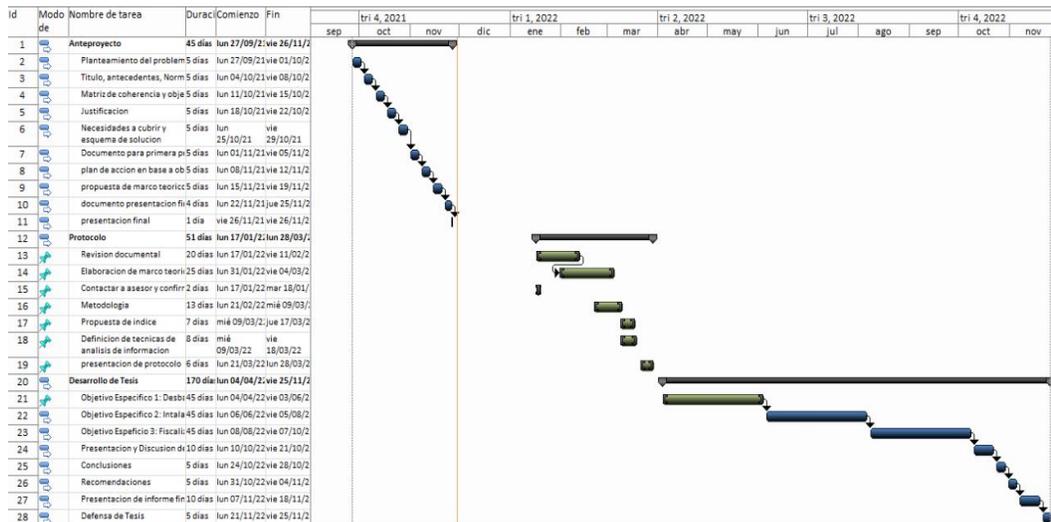
9.4.4. Fase 4: objetivo específico 3

En esta fase se identificará la relación que exista entre el desbalance de corriente en las redes de distribución y los posibles efectos en el campo magnético del transformador de potencia al cual se conectan. Se usara la técnica de revisión documental para seleccionar los documentos que se ajusten a la temática tratada.

10. CRONOGRAMA

El detalle de cómo se organizan las actividades cronológicamente se detalla en la figura 3.

Figura 3. Cronograma



Fuente: elaboración propia.

11. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

A continuación, se muestran los recursos que se estarán utilizando para la realización de la investigación, en donde se tomó en cuenta que la misma será del tipo descriptiva. Al final se muestra un resumen del presupuesto aproximado.

Tabla III. **Recursos necesarios para la investigación**

Tipo de Recurso	Disponibilidad
Humano	<u>Investigador:</u> Pedro Alberto Alvarado Yat <u>Asesor (ad honorem):</u> Ing. German Juárez <u>Co-Asesor (ad honorem):</u> Ing. Carlos Morales
Financiero	Las normas técnicas internacionales afines al tema que no sean de libre acceso, serán costeadas por el investigador, o bien podrían ser proporcionadas por el asesor y co-asesor, dado que ellos son miembros de algunas instituciones que emiten dichas normativas.
Acceso a la información y permisos	La información se obtendrá por medio de los distintos buscadores académicos, libros, documentales, normativas internacionales y nacionales que sean de libre acceso. Si fuera necesario consultar alguna información nacional, se consultará la página web de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, en donde existe información pública.
Tecnológico	Se trabajará en la casa de habitación del investigador, donde se cuenta con el equipo de cómputo adecuado, impresora y acceso a internet.
Fuentes de financiamiento	Financiamiento propio
Costo aproximado	<u>Costo de Investigador:</u> - Q5,000.00 (9 meses) <u>Costo técnico:</u> Q500.00 (mes); Q4000.00 (9 meses) <u>Costo de Insumos:</u> Q100.00 (mes); Q 675.00 (9 meses) <u>Asesores:</u> - Q 700.00 (9 meses) <u>Otros:</u> Q100.00 (mes) Q 900.00 (9 meses) <u>Total:</u> Q 700.00 (mes); Q 11,275.00 (9 meses)

Fuente: elaboración propia.

Siendo los recursos aportados suficientes para la investigación, se considera que es factible la realización del estudio.

12. REFERENCIAS

1. Álvarez, R., y Pozo, M. d. (2007). *Mantenimiento de Transformadores de Potencia*. In XII Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRE (Foz de Iguazú, Brasil, 2007), 1-2. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/36793/Document_o_completo.04_Alvarez.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
2. Audevert, D. Á., Breffe, O. E., y Domínguez, J. E. (septiembre/diciembre de 2021). *Experiencia sobre la avería de un transformador de corriente ubicado en el neutro de un banco de condensadores. Caso de estudios subestación Tallapiedra*. *Ingeniería Energética*, 42(3), 2. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S181559012021000300056&script=sci_abstract&tlng=pt.
3. Cadavid, D. R., y Gallego, L. F. (octubre de 2003). *Armónicos y problemas de "Power Quality" en el conductor de neutro de sistemas trifásicos*. *Scientia et Technica*(22), 6. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4846323.pdf>.
4. Casaravilla, G., y Echinope, V. (2005). *Desbalances - Estudio de alternativas para su estimación*. Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, EPIM 05. Montevideo, Uruguay 2005. Recuperado de <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/21167/1/CE05.pdf>.

5. Cerón, A. F., Orduña, I. F., Aponte, G., y Romero, A. A. (2015). *Panorama de la Gestión de Activos para Transformadores de Potencia. Información Tecnológica*, 26(3), 100-104. Recuperado de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v26n3/art14.pdf>.
6. de la Cruz, A. S. *Corrección de simetría de corrientes en redes eléctricas de distribución mediante óptima conexión de transformadores monofásicos empleando búsqueda exhaustiva. [Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito]. Repositorio Institucional. Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18065>.*
7. Flores, W., Mombello, E., Rattá, G., y Jardini, J. A. (Marzo de 2007). *Vida de transformadores de potencia sumergidos en aceite: Situación actual. Parte I. Correlación entre la vida y la temperatura. IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, 5(1), 50,51. Recuperado de <https://www.researchgate.net/profile/W-Flores/publication/282250615>.
8. García, D. S., y Riaño, W. A. (2018). *Sincrofasores para detección de fallas eléctricas en líneas de transmisión. Visión Electrónica*, 67. Recuperado de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/issue/view/939>.
9. García-Villalón, J., Sellschopp-Sánchez, F., y Vargas-Salas, R. (2016). *Impacto de Sags de Tensión en Transformadores Trifásicos Δ -Y ante Diferentes Tipos de Cargas Trifásicas Balanceadas*.

Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo, 1, 29. Recuperado de <http://revistacid.itslerdo.edu.mx/coninci2016>.

10. Gómez, O., y Zapata, C. J. (mayo de 2007). *Efecto del desbalance en las cargas sobre la valoración de confiabilidad de un sistema de distribución de energía eléctrica*. *Revista de ingeniería*, 25, 53-55. Recuperado de <https://revistas.uniandes.edu.co/doi/epdf/10.16924/revinge.25.6>
11. Grainger, J. J., y Stevenson, W. D. (2001). *Análisis de Sistemas de Potencia*. McGraw-Hill.
12. Hart, D. G., Uy, D., Gharpure, V., Novosel, D., Karlsson, D., y Kaba, M. (2001). *Unidades PMU Supervisión de las redes eléctricas: un nuevo enfoque*. *Revista ABB*, 1, 58. Recuperado de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54864184/58-61_M800_-_SPA-with-cover-page.
13. Issouribehere, P., Barbero, J., y Barbera, G. (mayo de 2009). *Estudio comparativo de las diferentes definiciones de los factores de desbalance de tensiones y corrientes en los sistemas trifásicos*. *Comité de Estudio C4 - Desempeño Técnico del Sistema*, 13, 1. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/36357/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

14. Ortiz, F. Aportaciones a la clasificación energética de *transformadores de potencia* [Tesis de Doctorado, Universidad de Cantabria]. Repositorio Institucional. Recuperado de <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/8326>.
15. Piumetto, M., Gómez, J. C., y C.Vaschetti, J. (2014). *Reducción de los Factores de Desbalance en un Sistema de Distribución de Media Tensión debido a la Inserción de Generación Distribuida*. *Información Tecnológica*, 25(4), 91-102. Recuperado de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v25n4/art12.pdf>.
16. Quintela, F. R., Redondo, R. C., Melchor, N. R., Arévalo, J. M., y Redondo, M. M. (2005). *Teorema de la potencia de multipolos y medida de potencia en sistemas trifásicos*. *Revista técnica sobre la construcción e ingeniería de las instalaciones*, 399, 72. Recuperado de <https://electricidad.usal.es/Principal/Circuitos/Descargas/MedidaPotenciaTrifasica.pdf>.
17. Rodríguez, M. A. (2010). *Circuitos de corriente alterna trifásica*. Recuperado de <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38489956/Trifasica-with-cover-page-v2.pdf?Expires>.
18. Suárez, J. A., Mauro, G. F., Anaut, D. O., y Agüero, C. (2010). *Parámetros que Afectan la Corriente de Neutro en Presencia de Armónicos*. *Información Tecnológica*, 21, 13. Recuperado de <https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v21n1/art12.pdf>.

19. Zorrilla, J. D., Céspedes, A., y García, D. F. (2020). *Técnicas para el diagnóstico de transformadores de potencia: Una revisión crítica*. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(2), 184-185. Recuperado de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ingeniare/v28n2/0718-3305-ingeniare-28-02-184.pdf>.