



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS MÉTODOS
DEL CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL DESBALANCE DE CORRIENTE EN EL SISTEMA DE
TRANSPORTE DE ENERGÍA EN GUATEMALA**

Pablo Roberto Juárez Chen

Asesorado por el M.A. Ing. Edson Omar Mazariegos Marcial

Guatemala, enero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS MÉTODOS
DEL CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL DESBALANCE DE CORRIENTE EN EL SISTEMA DE
TRANSPORTE DE ENERGÍA EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

PABLO ROBERTO JUÁREZ CHEN

ASESORADO POR EL M.A. ING. EDSON OMAR MAZARIEGOS MARCIAL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

GUATEMALA, ENERO DE 2023

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

| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| EXAMINADOR | Ing. Saúl Cabezas Durán |
| EXAMINADOR | Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez |
| EXAMINADOR | Ing. Milton Alexander Fuentes Orozco |
| SECRETARIO | Ing. 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 EL ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS MÉTODOS DEL CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL DESBALANCE DE CORRIENTE EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE DE ENERGÍA EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha noviembre de 2022.

Pablo Roberto Juárez Chen



EEPFI-PP-2093-2022

Guatemala, 16 de noviembre 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 EL ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS MÉTODOS DEL CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL DESBALANCE DE CORRIENTE EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE DE ENERGÍA EN GUATEMALA.**, 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 **Pablo Roberto Juárez Chen** carné número **201314012**, 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"

Mtro. Edson Omar Mazariegos Marcial
Asesor(a)

Edson Omar Mazariegos Marcial
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 18816

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-1714-2022

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 EL ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS MÉTODOS DEL CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL DESBALANCE DE CORRIENTE EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE DE ENERGÍA EN GUATEMALA.**, presentado por el estudiante universitario **Pablo Roberto Juárez Chen**, 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

The image shows a handwritten signature in black ink 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, noviembre de 2022

LNG.DECANATO.OI.034.2023

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 EL ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS MÉTODOS DEL CÁLCULO Y MEDICIÓN DEL DESBALANCE DE CORRIENTE EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE DE ENERGÍA EN GUATEMALA**, presentado por: **Pablo Roberto Juárez Chen**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, enero de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por permitirme alcanzar una más de mis metas y bendecirme en cada una de las etapas de este camino.
- Mis padres** Enma Chen y Jarvyn Juárez por guiarme, darme buenos consejos y apoyado en todo este proceso para cumplir este sueño, mi eterno agradecimiento.
- Mis hermanos** Eder, Karla y Jarvyn Juárez, por su apoyo y compañía durante mi vida.
- Mis abuelos** Eudelia López, Juana Gonzales y Santiago Chen, por sus sabias enseñanzas y consejos durante toda mi vida.
- Mi novia** Jarimma Nájera por su apoyo y compañía durante este proceso.
- Familia y amigos** Edson Mazariegos, Marcos Miranda, Pablo Abad, Miguel Pérez y Adin Lemus por el apoyo brindado en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|---|--|
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por ser la <i>alma mater</i> que me dio la oportunidad de desarrollarme en forma intelectual y profesional en la vida. |
| Facultad de Ingeniería | Por permitirme ser parte de tan renombrada facultad y proporcionarme los conocimientos que me permitieron realizar este trabajo de graduación. |
| Mis amigos | Por acompañarme durante la carrera. |
| Mi asesor | M.A. Ing. Edson Omar Mazariegos Marcial, por guiarme durante el trabajo de graduación. |
| Familia y amigos en general | Por todo su cariño, enseñanzas, consejos y apoyo incondicional. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VII |
| GLOSARIO | IX |
| RESUMEN..... | XI |
| | |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| | |
| 2. ANTECEDENTES | 3 |
| | |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 7 |
| | |
| 4. JUSTIFICACIÓN | 11 |
| | |
| 5. OBJETIVOS | 13 |
| 5.1 General | 13 |
| 5.2 Específicos | 13 |
| | |
| 6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN | 15 |
| | |
| 7. MARCO TEÓRICO..... | 17 |
| 7.1. Transmisión y distribución de energía eléctrica..... | 17 |
| 7.1.1 Transporte de energía | 18 |
| 7.1.2 Clasificación de las líneas eléctricas | 18 |
| 7.1.2.1. Líneas de transmisión..... | 18 |
| 7.1.2.2. Líneas de subtransmisión..... | 19 |
| 7.1.3 Eficiencia en el transporte de energía | 19 |

| | | |
|----------|---|----|
| 7.1.4 | Sistema de energía eléctrica en Guatemala..... | 20 |
| 7.1.5 | El marco institucional y regulatorio del subsector eléctrico de Guatemala | 20 |
| 7.1.5.1. | Estructura del subsector eléctrico de Guatemala..... | 20 |
| 7.1.6 | Sistema Eléctrico Nacional..... | 21 |
| 7.2. | Desbalance de voltaje | 22 |
| 7.3. | Desbalance de Corriente..... | 23 |
| 7.3.1. | Efectos adversos debido al alto porcentaje de desbalance de corriente | 23 |
| 7.3.1.1. | Efectos en motores de inducción | 24 |
| 7.3.1.2. | Efectos en transformadores | 24 |
| 7.3.1.3. | Efectos en líneas..... | 24 |
| 7.3.2. | Sistema trifásico | 25 |
| 7.3.3. | Sistematrifásico equilibrado..... | 26 |
| 7.3.4. | Fase | 26 |
| 7.3.5. | Ángulo fase | 26 |
| 7.3.6. | Corriente defase..... | 27 |
| 7.3.7. | Desequilibrio delíneas | 27 |
| 7.3.8. | Desequilibrio en cargas..... | 27 |
| 7.4. | Componentes simétricas..... | 27 |
| 7.4.1. | Orden defases..... | 28 |
| 7.4.2. | Sistema simétrico | 29 |
| 7.4.2.1. | Secuencia cero..... | 29 |
| 7.4.2.2. | Secuencia positiva | 30 |
| 7.4.2.3. | Secuencia negativa | 30 |
| 7.5. | Normativas..... | 31 |
| 7.5.1. | Normativa de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) | 31 |

| | | |
|----------|---|----|
| 7.5.2. | Normativa del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE por sus siglas en inglés)..... | 33 |
| 8. | PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS | 35 |
| 9. | METODOLOGÍA..... | 39 |
| 9.1 | Metodología de comparación entre dos métodos del cálculo de medición del desbalance de corriente, entre dos normativas..... | 39 |
| 9.1.1. | Tipo de estudio | 39 |
| 9.1.2. | Fases de estudio | 39 |
| 9.1.2.1. | Exploración Bibliográfica | 40 |
| 9.1.2.2. | Exploración de normas y artículos específicos del desbalance de corriente..... | 40 |
| 9.1.2.3. | Recolección de datos para el análisis del desbalance de corriente..... | 41 |
| 9.1.2.4. | Análisis de datos..... | 42 |
| 10. | TÉCNICAS DE ANÁLISIS | 45 |
| 11. | CRONOGRAMA..... | 47 |
| 12. | FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO | 49 |
| | REFERENCIAS | 51 |
| | APÉNDICES | 59 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Estructura del sub sector eléctrico de guatemala en orden jerárquico... 21
2. Proceso del funcionamiento del sub sector eléctrico guatemalteco. 22
3. Representación de las secuencias de fase. 31

TABLAS

- I. Fases y tiempo de la investigación..... 48
- II. Recursos necesarios para la investigación 49

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------------------------|---|
| ° | Ángulo |
| a | Ángulo de Fase 120° |
| a² | Ángulo de Fase 240° |
| I | Corriente |
| I_a | Corriente de Fase “a” |
| I_b | Corriente de Fase “b” |
| I_c | Corriente de Fase “c” |
| k | Intervalo de Medición |
| = | Igual que |
| I_{mp} | Máxima desviación de corriente de las fases |
| % | Porcentaje |
| ΔDIP (%) | Porcentaje de desbalance de corriente |
| I_A⁺ | Secuencia positiva de corriente |
| I_A⁻ | Secuencia negativa de corriente |
| V_{neg} | Secuencia negativa voltaje |
| V_{pos} | Secuencia positiva voltaje |
| V | Voltaje |

GLOSARIO

| | |
|----------------------------|--|
| Ángulo | Figura geométrica formada bien por dos líneas planas que concurren en un punto. |
| Ángulo de fase | Ángulos de fase cero y dos magnitudes senoidales alternas de igual frecuencia. |
| Balance | Equilibrio de algo existente. |
| CNEE | Comisión Nacional de Energía Eléctrica. |
| Corriente Eléctrica | Magnitud física que expresa la cantidad de electricidad que fluye por un conductor en la unidad de tiempo. |
| Corriente alterna | Corriente eléctrica que invierte periódicamente el sentido de su movimiento. |
| Desbalance | Perder el equilibrio de algo existente. |
| Eficiencia | Capacidad de lograr los resultados deseados con el mínimo posible de recursos. |
| Fase | Intensidad de una corriente eléctrica alterna en un momento determinado. |

| | |
|------------------------------|--|
| IEEE | Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. |
| Líneas de transmisión | Utilizadas para transportar energía eléctrica. |
| NTCSTS | Norma Técnica de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones. |
| Porcentaje | Proporción que toma como referencia el número 100. |
| Secuencia | Continuidad, sucesión ordenada. |
| Sistema trifásico | Sistema de producción, distribución y consumo de energía eléctrica compuesto por tres corrientes alternas monofásicas. |
| Sistema Simétrico | Es cuando las corrientes o tensiones trifásicas son iguales en tamaño y magnitud, pero con distinto ángulo de fase. |
| Tolerancia | Máxima diferencia que se tolera o admite entre el valor nominal y el valor real o efectivo. |
| Voltaje eléctrico | Es la diferencia de potencial eficaz (RMS) entre dos fases. |

RESUMEN

El desbalance de corriente es un cálculo que se realiza en el sistema del transporte de energía a base de mediciones en puntos estratégicos las cuales establece la normativa técnica de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, este índice se da a los participantes en un porcentaje, la norma indica un rango de tolerancia y al ser sobrepasado indica que un participante está afectando la calidad en cuanto a parámetro de desbalance de corriente.

Debido a que la baja eficiencia en las mediciones genera problemáticas y al considerar las ambigüedades en el cálculo de la medición de dicho desbalance, trae consigo plantearse un marco comparativo para establecer si se excede el rango de tolerancia permitido.

Por lo que el presente diseño de investigación busca aplicar un marco comparativo de mediciones y cálculo del desbalance de corriente en el sistema de transporte de energía entre dos métodos, utilizando parámetros distintos, que permitirá que el sistema de transporte de energía en el país, en especial para las instancias correspondientes, no tengan una baja eficiencia en las mediciones de dicho desbalance, por lo que tener otro método, reducirá las sanciones que se presentan por la CNEE al sobrepasar la tolerancia y la inversión en instalaciones por parte de las instancias involucradas así como la tentativa actualización de la norma actual.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de transporte de energía en Guatemala tiene incertidumbre en el método que se utiliza para el cálculo de medición del desbalance de corriente, dado que la utilización de un solo método genera duda respecto a la exactitud o precisión en el cálculo de la medición, ya que no considera variables como es el ángulo de fase de cada corriente, lo cual puede derivar en sanciones para los participantes en dicho sistemas por no cumplir el rango de tolerancia establecido en la normativa, así mismo dejar fuera de servicio varias subestaciones y afectar al usuario final.

La presente investigación busca comparar la eficiencia en el cálculo de medición de corriente de los métodos empleados tanto en la norma IEEE-1159, la cual considera parámetros distintos como es la variación del ángulo de fase a base de componentes simétricas, como con la norma de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), teniendo como parámetros la variación del cálculo en función del ángulo de fases, así como la variación del rango de tolerancia, si la hubiese.

Se espera que, en la comparación de estos dos métodos, se establezca una mayor certeza en la medición, evitando pérdidas en el sistema y sanciones por el incumplimiento de la normativa actual que permita que los participantes no se cuestionen con respecto a la aplicación de un solo método, así mismo evitar que las problemáticas de incrementos en las reparaciones y modificaciones de las instalaciones sea por cálculos erróneos.

La metodología para emplearse se basa en un análisis comparativo, el cual conllevará a una revisión documental, así como el análisis de los métodos del cálculo de la medición mencionada en las normativas. Se realizará un estudio a partir de datos que serán proporcionados por la CNEE, los cuales son registros de las mediciones, se evaluará la variación en el cálculo y el rango de las tolerancias de dichas mediciones.

En el capítulo 1, se realizará una revisión bibliográfica sobre la base teórica relacionada con el proceso de transmisión y distribución de energía eléctrica, que tiene un punto clave para el análisis del tema, como las líneas de transmisión y su eficiencia al transportar energía eléctrica, así mismo se mencionará el marco institucional y regulatorio del subsector eléctrico de Guatemala. En el capítulo 2 se hará referencias e el tema del Desbalance de corriente y los efectos que tiene en el sistema, como son los desequilibrios, la corriente de fase y ángulo de fase que para el estudio tienen mucha relevancia.

En el capítulo 3, se hace referencias a el método de componentes simétricas, que se basa en el teorema de Fortecue, el cual permite el análisis de diferentes fallas en un sistema trifásico al aplicar las secuencias cero, negativa y positiva, para el caso que se necesite analizar. El capítulo 4 hará referencia a las normativas, las cuales, en sus artículos específicos, se plantea la forma de análisis del cálculo de desbalance de corriente, y se determinara cual de ambos métodos es el más efectivo para dicho cálculo.

2. ANTECEDENTES

Se presentan estudios relacionados con el cálculo del desbalance de corriente los cuales son de mucha significancia y relevancia, debido a que cuentan con la comprensión necesaria para poder analizar los impactos, metodologías y comparaciones que se tienen con distintas normativas empleadas.

En el artículo científico *Cuantificación del Desbalance Admisible en Corrientes, para Redes de Distribución Eléctrica de Baja Tensión*. Pascual *et al.*, (2017). El estudio realizado en Argentina indica que las cargas que suministran un sistema de distribución de electricidad muestran peculiaridades muy distintas. Dichas cargas pueden generar que las corrientes de cada fase sean distintas en ángulo y magnitud, lo que se le conoce como un desbalance de corriente. Así mismo, las corrientes que están desbalanceadas tienden a provocar que varíe el valor nominal de las tensiones por cada fase, por ello se presenta un desequilibrio de voltaje. La metodología que se utiliza analiza cómo se comporta la línea de distribución, en relación con los ítems de calidad del producto técnico, considerando la relación que se tiene en los componentes de serie positiva y negativa. (Pascual, *et al.*, 2017)

En el informe técnico *Análisis de Comportamiento Operativo de Desbalance de Corriente en el Nodo de Calidad de la Subestación Tuxtla li del Nodo del Bus I Y Bus li*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, se plantea que el proceso de la elaboración de una reglamentación sobre la calidad en la utilidad de la distribución de energía eléctrica hay diversos parámetros que se pueden clasificar, desde el desempeño en la red y así poder establecer parámetros de

referencia que no deberían de ser superados, por lo que el desbalance en dicha red de distribución trae como consecuencia la disminución de la eficiencia en la misma, por lo que el estudio se fundamenta en la definición del factor de desbalance, el cual se basa en las componentes de secuencia positiva y secuencia negativa que aplica para tensiones y corrientes. La metodología del informe se basa en el método matemático de aplicación de fórmulas establecidas por normas, para obtener el desbalance de corriente y la elaboración de gráficas con ayuda de Excel. (Santos, 2019)

En el artículo científico *Perturbaciones Eléctricas*. Fornieles, (2020) plantea que, para el cálculo del desequilibrio en tensión y corriente, el máximo desvío que se debe tener es el valor que promedian las tres fases en un porcentaje, este porcentaje es el desequilibrio de corriente o tensión. Por lo que el cálculo de estos desequilibrios se realiza a nivel de normas, emplea el procedimiento de componentes simétricas, por lo que el artículo se basa en el método matemático para calcular las componentes simétricas, del cual se desglosa el cálculo de secuencias negativa, positiva y cero, para analizar cada fasor por estas secuencias.

En el artículo científico *Código de Red: Calidad de la Potencia (Parte 3: Desbalance)* se indica que el desbalance de corriente como de tensión, se produce en los sistemas trifásicos y que dependen de las cargas, la cual variará el tipo de alimentación de cada una de ellas, es decir, si es monofásica. El desbalance de corriente o de tensión se da cuando los fasores son distintos en relación con su magnitud, así como el desviamiento angular entre sí, el desbalance se da por instalaciones eléctricas deficientes y el mal funcionamiento de variadores de velocidad para motores. (Guevara, 2020)

En el artículo científico *Metodología para Determinar la Distribución de Corrientes de Desbalance en Líneas Aéreas de Transmisión de Energía Eléctrica*. Jaramillo, Fonseca y Pérez, (2020), mencionan la importancia de la línea de transmisión, por lo que el diseño de estas debe ser cuidadosamente considerado para la operación constata que estas tienen, por lo cual deben estar preparadas por cualquier contingencia o desbalance que se presente, es por ello por lo que se realiza un estudio técnico de dos métodos los cuales se basan en el cálculo de la corriente, analizándola por medio de secuencias de fase.

En la tesis *Impacto del Desbalance de Cargas en Líneas de Distribución de Energía Eléctrica* se encontró que:

Los transformadores al presentarse un desbalance eléctrico llegan a tener fallas, esto causa que el aceite que tienen estos transformadores generan contaminación ambiental, debido a los gases tóxicos que se liberan, lo que pone en riesgo la salud y el ambiente natural, por lo que el objetivo principal en el que centra el estudio es representar que pasa con los circuitos de baja tensión cuando presenta un desbalance y genera interrupciones de energía, es decir el impacto técnico económico que genera los circuitos de baja tensión cuando presentan desbalance en sus fases. (Carrillo, 2021, p. 1).

En la tesis *Metodología Para Reducir El Desbalance de la Demanda Mediante Sistemas de Medio Voltaje en Corriente Directa*. Se plantea que:

En un sistema de distribución trifásica, las corrientes de carga tienen que ser iguales en magnitud en todas las fases de dicha red, la cual tendrán un desfase de 120° una fase de otra. El objetivo de estudio principal para el sistema eléctrico debe ser mantener un rango de balance admisible a

través de un equilibrio de cargas, para ser considerado un sistema balanceado. Se expresa que un sistema de media tensión en corriente directa tiene la capacidad de amortiguar desbalances. (Simba, 2021, p. 1)

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El transporte de energía eléctrica es la forma en que se transmite la electricidad a elevadas tensiones, esta pasa por líneas de transmisión y subestaciones lo cual forma la red de transporte. Para poder transportar energía eléctrica es necesario aumentar el nivel de tensión y así poder evitar pérdidas de energía. Las instalaciones de alta tensión son las que se encargan de transportar la electricidad desde las centrales generadoras hasta las subestaciones.

Al hablar de eficiencia energética engloba muchas aristas que se pueden desglosar en procesos y mecanismos de implementación, medición y cálculo de las mismas, por lo que el sistema de transporte de energía en Guatemala está teniendo cierta incertidumbre en el método empleado para la medición del desbalance de corriente en dicho sistema, debido a que la utilización de solo un método y una norma específica para dicha medición es ambigua, debido a que no considera todos los parámetros que conlleva un desbalance.

La variabilidad de la medición del desbalance energético por la utilización de un solo método trae consigo incertidumbre, debido a que la utilización de solo un método, a pesar de haber sido utilizado por mucho tiempo, puede ser comparado con otro método de medición y realizar la comparativa de cuán eficiente son las dos mediciones, observar la variabilidad de la excedencia de la tolerancia o si éstas quedan dentro del rango establecido como se observa en el informe estadístico publicado por la CNEE, las empresa de transporte de energía eléctrica tuvieron un mayor porcentaje de mediciones fuera de tolerancia establecida, y el comportamiento del desbalance de corriente desde el año 2017 va en aumento.

La excedencia en la tolerancia trae a efecto problemáticas que afectan al sistema, por lo que la implementación de un nuevo método para realizar una comparativa será muy eficiente en cuestión de reducir la incertidumbre que se está dando por realizar la medición con un solo método. La norma actual limita la medición del desbalance de corriente al no considerar la variable de ángulo de fase, estimando solamente un promedio y considerar qué tan desviada está la medición de esta medida, dicha excedencia trae a efecto problemas de calidad del servicio del sistema de transporte de energía eléctrica, por lo que se vería afectado el usuario final.

La baja eficiencia en las mediciones del desbalance de corriente en el sistema de transporte se debe a que la comparación de los valores de corriente de cada fase solo considera un promedio de las corrientes de estas y se compara con cada fase, tomando en consideración la desviación de corriente que tendrá cualquiera de estas tres, respecto al promedio, esta baja eficiencia en la medición del desbalance de corriente trae incrementos en las reparaciones o modificaciones de las instalaciones para que el rango del desbalance de corriente no afecte el servicio de transporte, es por ello que se propone el análisis comparativo de otro método de medición para tener una mejor certeza en las mismas, puesto que el método actual utilizado se basa en la medición y cálculo de voltajes mas no específicamente en medición de corriente.

Debido a las penalizaciones que se han dado por no estar en el rango de tolerancias en la medición del desbalance de corriente, por la aplicación de un solo método de medición y la utilización de una sola normativa, se llegó a tener incertidumbre en las mediciones y la excedencia en la tolerancia, dado que al no considerar el ángulo de las fases, no se tiene información acerca de los desbalances en ángulo y ello afecta a los equipos de la red de transporte, por lo

que la utilización de otro método para realizar mediciones y compararla con la actual será beneficioso para mejorar la calidad del sistemas de transporte.

Por lo anterior, se plantea la pregunta principal de este estudio:

¿Cuál es la eficiencia obtenida en la medición y cálculo del desbalance de corriente en el sistema de transporte de energía a partir de la aplicación del método utilizado por la norma IEEE, comparado con el actual?

Para poder dar respuesta a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuál es el rango de tolerancia alcanzado a partir de la aplicación del método establecido por la norma IEEE?
- ¿Qué diferencia tuvo el nuevo método en comparación con el que se tenía ya establecido?
- ¿Qué variaciones tuvo la excedencia de tolerancia permitida por el desbalance de corriente a partir del nuevo método?

4. JUSTIFICACIÓN

La realización de la presente investigación se justifica en el área Energética, específicamente dentro de la línea de investigación de uso Eficiente de la Energía en sistemas de transporte de energía de la maestría de energía y ambiente.

El desbalance de corriente en el sistema de transporte de energía eléctrica tiene gran importancia, debido a que la baja eficiencia en las mediciones genera problemáticas y al considerar las ambigüedades en el cálculo de la medición de dicho desbalance, trae consigo plantearse un marco comparativo para establecer si se está excediendo el rango de tolerancia permitido por la CNEE, de este modo se evitarían sanciones por no cumplir con este punto. Considerando esto, la comparación de otra metodología y la utilización de otra normativa contribuirá a la disminución de incertidumbre de un solo método, la cual utiliza otros parámetros para dicho cálculo, así como una propuesta para el ente regulador (CNEE) y la actualización de la normativa actual.

Bajo esta perspectiva la posibilidad de establecer un marco comparativo de mediciones y cálculo del desbalance de corriente en el sistema de transporte de energía entre dos métodos, utilizando parámetros distintos, permitirá que el sistema de transporte de energía en el país, en especial para las instancias correspondientes, no tengan una baja eficiencia en las mediciones de dicho desbalance, creando incertidumbre y el incumplimiento con la tolerancia permitida, esto trae a efecto problemáticas de incrementos en las reparaciones o modificaciones de las instalaciones. Para que el rango del desbalance de corriente no afecte el servicio de transporte, esta comparativa además de tener

otro método, reducirá las sanciones que se presentan por la CNEE al sobrepasar la tolerancia y la inversión en instalaciones por parte de las instancias involucradas para reducir y no sobrepasar dicho rango de tolerancia establecido, así como la irregularidad del servicio al consumidor final.

Por lo que el marco de comparación que se implementará considerando el ángulo de fase, el cual es un factor importante para el cálculo de medición, beneficiará a los participantes que influyen en el sistema de transporte, dado que en los últimos años los transportistas reportaron una cantidad mayor de puntos fuera de tolerancia.

La pertinencia y la relevancia social de esta investigación se enfoca en desarrollar un método de comparación de cálculo de medición y poner en práctica nuevas normativas, enfocadas al desbalance de corriente que permitirán mantener la certeza entre las empresas de transporte de energía y los órganos encargados de velar por el cumplimiento de normas técnicas del sistema eléctrico del país. Al no considerar el ángulo de las fases, no se tiene información sobre los desbalances en ángulo que afectan a los equipos de la red de transporte, por lo que dichos cálculos deben de realizarse de la mejor manera y que garanticen el funcionamiento óptimo del sistema para no afectar a los usuarios por inestabilidad del servicio, por lo tanto, en ello radica la importancia de este método de cálculo de medición y a la vez aporta innovación en la práctica y en los resultados. Lo anterior será una propuesta para el ente regulador (CNEE), que permitirá la actualización de la normativa actual.

5. OBJETIVOS

5.1 General

Determinar la eficiencia obtenida en la medición del cálculo del desbalance de corriente en el sistema de energía a partir del método (IEEE) y compararlo con el método actual (NTCSTS).

5.2 Específicos

1. Analizar el rango de tolerancia alcanzado a partir de la aplicación del método establecido por la norma IEEE.
2. Evaluar la diferencia de variables obtenidas en el nuevo método de comparación con el que se tiene actualmente especificado en la CNEE.
3. Determinar el cumplimiento del método a comparar de la norma IEEE, con base a los parámetros de tolerancia que se establecen en la norma actual.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Se plantea la utilización de un nuevo método para realizar una comparativa, debido a que el método actual toma las corrientes de fase, realiza un promedio y verifica qué tan desviados de la media están los valores de cada una de ellas, por lo cual se pone en entredicho que un método utilizado para el cálculo del desbalance de voltaje sea utilizado para corriente.

Al aplicar un nuevo método para el cálculo de medición del desbalance de corriente, se logrará establecer un marco comparativo de medición entre ambos métodos, evitando así la baja eficiencia en el cálculo de medición y reduciendo la incertidumbre que se tiene por solo implementar una metodología, la cual se adoptó hace más de 15 años. Esto hace que los participantes se cuestionen acerca de la eficiencia de la metodología actual y al momento de ser penalizados por su excedencia en el desbalance de corriente.

Los resultados de la presente investigación se verán reflejados en el área del sistema de transporte de energía de Guatemala, especialmente en los participantes que afecten la calidad del servicio de energía eléctrica, cuando incumplan y excedan el rango de la tolerancia establecida por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), razón por la cual el nuevo método a estudiar considera variables que el método actual no aplica, debido a que solo se realiza la comparación de los valores de corriente de cada fase y considera un promedio de las corrientes de las mismas, el cual se compara con cada fase tomando en consideración la desviación de corriente que tendrá cualquiera de estas tres respecto al promedio. Es por ello por lo que, al considerar la variable del ángulo de fase, se tendrá información sobre cada una de las fases con sus

desfases en ángulo y se verificará mediante el análisis matemático qué tan desviada esta la medición del indicador establecido por el ente regulador y así no afectar los equipos de la red de transporte.

La necesidad de realizar la presente investigación radica al identificar la situación en que se encuentran los participantes que integran el sistema de transporte, debido a la incertidumbre que se deriva de la baja eficiencia del método actual, existe un aumento en los puntos fuera de tolerancia en los últimos años, esta situación incrementa las reparaciones o modificaciones en las instalaciones para que el rango de desbalance no afecte el servicio de transporte, dejando fuera de servicio a varias subestaciones y la afectación al usuario final.

De acuerdo con ello, el nuevo método emplea variables como el ángulo de fase de la medición de las corrientes, en la cual se puede observar de mejor manera qué tan desbalanceadas se encuentran las corrientes por su magnitud y ángulo. Por tal motivo el marco comparativo servirá para reducir la incertidumbre con base a las variables analizadas, tener una nueva metodología del cálculo de medición y la tentativa actualización de la norma actual.

7. MARCO TEÓRICO

Al hablar de desbalance de corriente se describen fundamentos, conceptos y elementos básicos para el análisis y cálculo, como lo es el sistema de transmisión, la estructura del sistema eléctrico guatemalteco, componentes simétricas y normativas esenciales para el análisis del desbalance de corriente, por lo que a continuación se describen conceptos esenciales para su estudio.

7.1. Transmisión y distribución de energía eléctrica

A continuación, se introducen los fundamentos, conceptos y elementos básicos de la transmisión y distribución de la energía eléctrica, así como los elementos esenciales para su transmisión, conceptos fundamentales para el análisis del desbalance de corriente en líneas de transmisión.

Transmisión y distribución se refiere a las diferentes etapas de llevar la electricidad sobre postes y cables de generadores a un hogar o un negocio.

Al generar la electricidad, pasa por la red de transporte de energía que componen el medio físico con el que se realiza el transporte, dicho transporte está determinado por un sistema de cables los cuales cumple con la función de llevar la electricidad de la fuente generadora hasta nuestros negocio y hogares, a estos cables eléctricos se le denominan líneas, las cuales pueden ser subterráneas o aéreas y combinadas, las líneas de transmisión como de distribución se conoce comúnmente como la red. La transmisión y distribución son etapas separadas de la red eléctrica. (Fayos, 2009; Electricaplicada, 2022)

7.1.1 Transporte de energía

El sistema de transporte está conformado por líneas de transmisión y subestaciones de potencia, que son el medio de transferencia de la energía eléctrica desde los sitios de producción a los de consumo. La electricidad generada se transporta por medio de líneas de transporte elevando las tensiones, en conjunto con las subestaciones de servicio eléctrico, conforman la red de transporte. La elevación de la tensión es para conseguir transportar la electricidad disminuyendo las pérdidas de energía posible. Las líneas de alta tensión o líneas de transporte están constituidas por un elemento conductor y por los elementos de soporte. Estas, una vez reducida su tensión hasta la red de distribución, conducen la corriente eléctrica a largas distancias (Ministerio de Energía y Minas, [MEM], 2017, p. 3; Fundación Endesa, 2022).

7.1.2 Clasificación de las líneas eléctricas

“Las líneas eléctricas se pueden clasificar por su función en: Líneas de transmisión y Subtransmisión” (Nasimba V. y Nasimba J., 2020, p. 26).

7.1.2.1. Líneas de transmisión

Son utilizadas para transportar la energía eléctrica que es generada a largas distancias, con diferentes niveles de voltajes. Estas componen la conexión entre las diferentes centrales de generación como las redes de distribución. Para la elaboración de las líneas son utilizados conductores desnudos metálicos, que se obtiene mediante cableado de hilos metálicos alrededor de un hilo central. (Nasimba V. y Nasimba J., 2020, p.26)

“Las líneas de transmisión llevan potencia desde las estaciones de generación hasta las estaciones de recepción. La principal función de una línea de transmisión es llevar, transmitir potencia de una determinada distancia en forma eficiente y forma económica” (Haper citado en Nasimba V., Nasimba J., 2020, p. 14).

7.1.2.2. Líneas de subtransmisión

Estas líneas son las que van desde las subestaciones hasta los centros de consumo como son las industrias, domicilios y alumbrado público, los niveles de tensión utilizados están por debajo de los 34.5 kV. Los conductores en media tensión siguen siendo desnudos, pero en baja tensión se usan conductores aislados, para mayor seguridad en zonas urbanas. (Nasimba V. y Nasimba J., 2020, p.27)

7.1.3 Eficiencia en el transporte de energía

El aprovechamiento máximo de las vías de transporte de energía eléctrica ha sido uno de puntos clave para el desarrollo de la industria energética, debido a que el sector de transporte de energía es donde inciden muchos costos operacionales los cuales están sujetos a muchas variables.

En un sistema el cual trabaja en corriente alterna, el factor de potencia es una relación crucial, ya que este afecta directamente la eficiencia de transporte energético. (Duarte, 2021, p. 12)

Así mismo el equilibrar las fases del sistema para contar con un sistema balanceado, ya que los efectos de desequilibrio o desbalance se dan por las cargas entre fase-neutro, fase-fase (monofásicas), dichos efectos son desequilibrios en corrientes de neutro elevadas y corrientes de en las fases

desiguales (componentes simétricas), dicho desequilibrio disminuye significativamente la eficiencia de los sistemas de distribución y transporte. (Rivas, 2014, p. 2).

7.1.4 Sistema de energía eléctrica en Guatemala

El sistema de energía eléctrica en Guatemala está conformado por toda la infraestructura física que permite cumplir con el abastecimiento de energía eléctrica al país, con índices de seguridad, calidad y precios competitivos. (Ministerio de energía y Minas [MEM], 2017)

El subsector eléctrico del país, que pertenece al sector energético se divide en tres grandes áreas: generación, transporte y distribución. (MEM, 2017; Pulso Capital [PC], 2021).

7.1.5 El marco institucional y regulatorio del subsector eléctrico de Guatemala

A continuación, se presenta la estructura del subsector eléctrico.

7.1.5.1. Estructura del subsector eléctrico de Guatemala

El ente rector es el Ministerio de Energía y Minas, el ente regulador se encuentra concentrado en la figura de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) y el ente operador del sistema y del mercado eléctrico es el Administrador del Mercado Mayorista. (Ministerio de Energía y Minas [MEM], 2009)

Todas las responsabilidades y actúas de estas entidades, relacionadas con el subsector eléctrico, están amparadas en la Política Energética y regidas

por el marco regulatorio conformado por la Ley General de Electricidad y su reglamento, acuerdos gubernativos (110-2002 y 244-2003), la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable y su reglamento, así como los reglamentos, normas y resoluciones emitidas por la CNEE y el AMM. (Pulso Capital [PC], 2021)

Figura 1. **Estructura del subsector eléctrico de Guatemala en orden jerárquico**



Fuente: AGTE (2021). *Foro Transporte de Energía Eléctrica*.

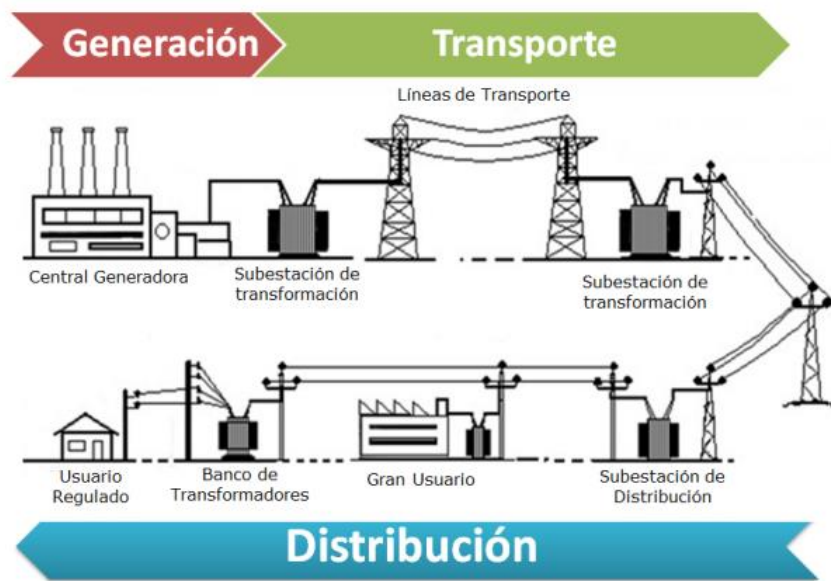
7.1.6 Sistema Eléctrico Nacional

Se le conoce como Sistema Eléctrico Nacional al conjunto de instalaciones, centrales de generación, líneas de transmisión, subestaciones eléctricas, redes de distribución, equipo eléctrico, y centros de carga, es decir, toda la infraestructura eléctrica destinada a la prestación del servicio, mediante

las cuales se ejecutan las operaciones de la energía eléctrica entre distintas regiones del país.

La energía eléctrica es producida en las centrales de generación y transmitida por medio de líneas de transporte, después al sistema de distribución, para ser finalmente utilizada por las industrias, comercios y los hogares. (AGTE, 2021; MEM, 2017)

Figura 2. **Proceso del funcionamiento del subsector eléctrico guatemalteco**



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2017). *Subsector Eléctrico de Guatemala*.

7.2. Desbalance de voltaje

Se presenta un desbalance de voltaje cuando las magnitudes de las tensiones de fase difieren y los ángulos de los fasores son distintos a las condiciones balanceadas, por lo que este fenómeno ocurre cuando en un sistema trifásico donde los voltajes y/o ángulos entre fases no son iguales.

El desequilibrio de tensión se considera como un problema de calidad de la energía de significativa preocupación, en la distribución de electricidad. Aunque las tensiones normalmente están equilibrados a nivel de generación y de transmisión, las tensiones a nivel de distribución pueden desequilibrarse debido al sistema desigual de impedancias y a la distribución de las cargas monofásicas. (López y Ventura, 2019, p. 41)

7.3. Desbalance de corriente

Un sistema de distribución trifásico de energía eléctrica presenta un desbalance en corrientes cuando sus módulos son desiguales y/o cuando los ángulos de separación entre los fasores de las mencionadas corrientes se apartan de los 120° entre sí.

Los sistemas desbalanceados pueden estudiarse a través de su descomposición en tres sistemas trifásicos compuestos por: un sistema balanceado de secuencia positiva o directa coincidente con la secuencia del sistema de distribución en estudio, un sistema balanceado de secuencia negativa o inversa, el cual posee una secuencia opuesta a la del sistema de distribución y una secuencia homopolar o cero, compuesta por una terna de fasores de igual magnitud y fase. (Pascual, *et al.*, 2017, p. 2)

7.3.1. Efectos adversos debido al alto porcentaje de desbalance de corriente

- Activación de protecciones fundadas en flujos de corrientes de secuencia negativa.

- Degradación de la productividad de máquinas rotatorias, resultado de par invertido.
- Extensión del desbalance de corriente en las redes de transmisión y aumento de los daños por transmisión y distribución. (Guillen, *et al.*, 2020; López, 2017)

7.3.1.1. Efectos en motores de inducción

“Cuando son alimentados con tensiones desequilibradas, éstos producen pérdidas adicionales. Un desequilibrio de 2 % en las tensiones hará que las corrientes tengan un desbalance de 17 %, el cual causara una elevación de temperatura de 65°C (cuando normalmente seria de 40°C)” (Rodríguez, 2015, p. 13).

7.3.1.2. Efectos en transformadores

Al ser sometidos a tensiones de secuencia negativa la transforman de la misma forma que las tensiones de secuencia positiva. Sin embargo, cuando se trata de tensiones de secuencia homopolar, depende del tipo de conexión tanto del primario como del secundario, y sobre todo de la presencia de un conductor de neutro. (Rodríguez, 2015, p. 13)

7.3.1.3. Efectos en líneas

Los desequilibrios de las cargas incrementan las perdidas en las líneas de distribución, por lo que un desequilibrio causa una duplicación de la perdida en la línea, se dice que la potencia perdida por un desbalance se multiplica por seis veces respecto a la potencia que se pierde con una carga equilibrada. (Rodríguez, 2015, p. 13)

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 citado en Piumetto, *et al.*, 2014, p. 95).

7.3.2. Sistema trifásico

Como se menciona en Moreno y Curbelo, (2019) según “el número de fases de las fuentes de alimentación, los sistemas eléctricos pueden ser bifásicos, trifásicos, tetrafásicos, etc.” (p. 4).

Un sistema trifásico es aquel sistema de producción, distribución y consumo de energía eléctrica compuesto por tres corrientes alternas monofásicas de frecuencia y amplitud similar que representen un valor eficaz y presenten una diferencia de fase entre ellas de 120° eléctricos.

Este proceso debe darse en un orden determinado y cada una de las corrientes monofásicas que conforman el sistema recibe el nombre de fase. En este caso, se reconoce a un sistema como trifásico siempre que sus corrientes mantengan magnitudes iguales y estén desfasadas simétricamente. En caso de no cumplirse alguna de estas condiciones anteriores, el sistema de tensiones quedaría desequilibrado, más concretamente llamado sistema desbalanceado. (Pepe Energy, 2022)

7.3.3. Sistema trifásico equilibrado

Un sistema trifásico de tensiones será equilibrado cuando las corrientes cumplan la igualdad de frecuencias y la amplitud que presentan un desfase de 120° entre ellas, dicho equilibrio es técnicamente inalcanzable, ya que el continuo cambio de cargas conectadas a la red, o posibles fallos que puedan aparecer, provocan que las magnitudes eléctricas se encuentren en constante variación respecto de su valor teórico, por lo que en todo momento los sistemas sufrirán un mayor o menor desequilibrio. (Hurtado, 2017, p 15).

7.3.4. Fase

“El término fase se aplica tanto al desplazamiento temporal relativo entre las tensiones o corrientes en un sistema trifásico, como a aquella parte de un sistema trifásico donde se encuentran dichas tensiones o corrientes” (Franco, 2018, p.11).

7.3.5. Ángulo de fase

El ángulo de fase, de desfasaje o simplemente fase, sobre una tensión alterna, es el ángulo que conforma el vector generador, respecto de un eje horizontal, es decir la desigualdad entre ángulos de fase cero y dos magnitudes senoidales alternas de igual frecuencia (Frankce, 2007; Órganos de Palencia, 2021).

7.3.6. Corriente de fase

La corriente fase es la correspondiente a cada elemento del sistema, se indica que cada una de las corrientes monofásicas que conforman el sistema recibe el nombre de fase. (Pepe Energy, 2022)

7.3.7. Desequilibrio de líneas

Las líneas eléctricas tienen desequilibrios continuamente ya que es teóricamente imposible que, en todo momento, las cargas se encuentren indistintamente distribuidas a lo largo de las fases. Dichos desequilibrios producirán, pérdidas en las líneas eléctricas, calentamientos y pérdidas de par y potencia en las máquinas eléctricas, y otras consecuencias. (Hurtado 2017, p. 13)

7.3.8. Desequilibrio en cargas

El desequilibrio en cargas puede deberse a la distribución desigual de las cargas monofásicas en baja tensión, esto puede ocurrir en zonas rurales alejadas, donde existen largas líneas eléctricas de transporte, pero también en los sistemas de distribución de las grandes ciudades, donde se producen fuertes demandas monofásicas, como por ejemplo las cargas debidas a la iluminación. (Hurtado, 2017, p. 17)

7.4. Componentes simétricas

El método de componentes simétricas se basa en el teorema de Fortescue el cual nos permite analizar las diversas fallas del sistema trifásico, el cual

consiste en descomponer el sistema asimétrico en las componentes simétricas del sistema original. (Martínez, 2014)

La idea del método consiste en suponer que todo circuito trifásico asimétrico puede ser expresado por medio de la suma o composición de tres sistemas simétricos, los que a su vez son fácilmente solubles. Este método de análisis hace posible la predicción, fácil y exactamente, del comportamiento de los sistemas de potencia durante las condiciones de cortocircuito asimétricos o cargas desbalanceadas. (Ferro, 2010, p.2)

El método puede ser utilizado para dar solución a cualquiera de los sistemas que estén en condiciones desiguales en un preciso momento.

“Las fallas asimétricas a las que se refieren son:

- Falla monofásica a tierra
- Falla Bifásica a tierra
- Falla bifásica
- Pérdida de un conductor” (Martínez, 2014, p. 3).

7.4.1. Orden de fases

Las corrientes y los voltajes de corriente alterna en los circuitos trifásicos deben de tener secuencias de fases, como por ejemplo al considerar tensiones senoidales desde una frecuencia provista, un equipo trifásico alcanza cierto punto en un ciclo, ya sea este el positivo máximo en determinado tiempo. Cierta momento después el voltaje de una fase distinta logra el mismo punto de su etapa, y esto ocurre con la última fase. (Martínez, 2014)

Si el máximo de la tensión de la fase A, es seguido por el máximo de la fase B, y a su vez por el máximo de la fase C, se dice que el orden de fases es ABC; por el contrario, si el máximo de la tensión de la fase A es seguido por el máximo de la fase C y luego por la fase B, se dice que el orden de fases es ACB, el orden de fases depende del sentido de rotación, de la construcción y conexiones de los devanados del generador y de la denominación de los terminales. (Martínez, 2014, p. 3)

7.4.2. Sistema simétrico

Si las corrientes o tensiones trifásicas de una frecuencia son de igual tamaño en su magnitud y son diferentes una con otra teniendo el mismo ángulo de desfase, se determina que las corrientes y las tensiones forman un sistema equilibrado o simétrico. (Martínez, 2014)

“Un sistema de ‘n’ fasores desequilibrados puede ser descompuesto en ‘n-1’ sistemas equilibrados de secuencia diferente y de separación angular $2\pi/n$, más un sistema de fasores de igual magnitud y fase llamado secuencia cero” (Quintana, 2017, p. 25).

7.4.2.1. Secuencia cero

“La secuencia positiva o directa está formada por tres fasores de la misma amplitud, separados 120° entre sí, y con la misma secuencia de fases que el sistema original” (Quintana, 2017, p. 25).

“La terna de secuencia positiva corresponde al flujo de potencia que proviene de la red hacia la carga. La potencia suministrada tiene únicamente representación de secuencia positiva” (Rodríguez, 2015, p. 12)

7.4.2.2. Secuencia positiva

“La secuencia positiva o directa está formada por tres fasores de la misma amplitud, separados 120° entre sí, y con la misma secuencia de fases que el sistema original” (Quintana, 2017, p. 25).

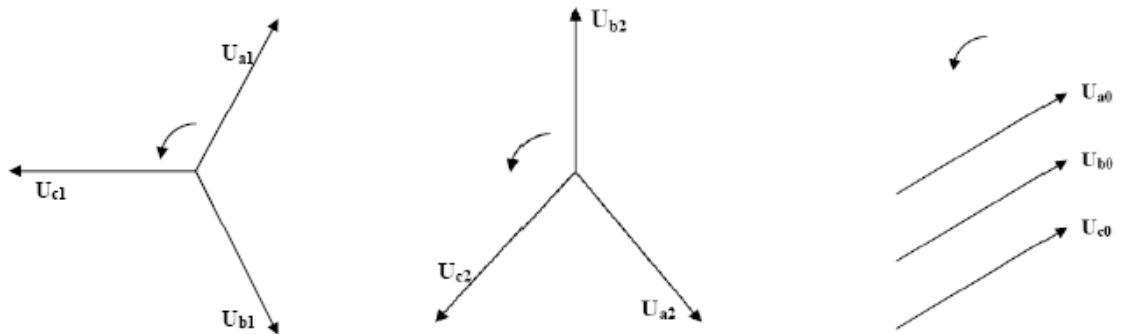
“La terna de secuencia positiva corresponde al flujo de potencia que proviene de la red hacia la carga. La potencia suministrada tiene únicamente representación de secuencia positiva” (Rodríguez, 2015, p. 12).

7.4.2.3. Secuencia negativa

“La secuencia negativa o inversa está formada por tres fasores con la misma amplitud (en general, distinta a la amplitud de la secuencia directa), desfasados 120° pero con una secuencia de fases opuesta al sistema original” (Quintana, 2017, p. 25)

“La terna de secuencia negativa, la componente negativa, es una indicación de la medida de desequilibrio existente en el sistema, o sea, de la falta de simetría entre los fasores de tensión en el punto de conexión” (Rodríguez, 2015, p. 12).

Figura 3. **Representación de las secuencias de fase**



Fuente: Ferro (2010) *El método de componentes simétricas*.

7.5. Normativas

A continuación, se plantean las diversas normativas.

7.5.1. Normativa de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE)

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica es un órgano técnico que pertenece al Ministerio de Energía y Minas (MEM). La CNEE es la responsable de regular el subsector eléctrico, la cual tiene como función principal ejecutar la Ley General de Electricidad, velar por los derechos de quienes son usuarios y prevenir prácticas injustas, así como la definición de las tarifas de transmisión, distribución y la difusión de normas técnicas. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica [CNEE], 2022; Ministerio de Energía y Minas [MEM], 2009)

En el Artículo 31 se plantea la Calidad del Desbalance de Corriente.

El índice para evaluar el desbalance de corriente de los participantes se determinará sobre la base de comparación de los valores de corriente de cada

fase, medidos en el punto de entrega y registrados en cada Intervalo de Medición (k). Este índice estará expresado como un porcentaje.

$$\Delta DIP (\%) = [3(Imp)/(Ia + Ib + Ic)] \times 100$$

Donde:

ΔDIP (%): Porcentaje de Desbalance de Corriente por parte del Participante,

Imp: Máxima desviación de corriente de cualquiera de las fases, respecto al promedio de la corriente de las tres fases, registrada en el Intervalo de Medición k,

Ia: Corriente en la fase a registrada en el Intervalo de Medición k,

Ib: Corriente en la fase b registrada en el Intervalo de Medición k,

Ic: Corriente en la fase c registrada en el Intervalo de Medición k”

(Comisión Nacional de Energía Eléctrica [CNEE], 2010, p. 189).

Artículo 32. En este se plantea la tolerancia para el desbalance de corriente. Se establece una tolerancia de diez por ciento (10 %), para el Desbalance de Corriente. Se considera que un Participante afecta la calidad del servicio de energía eléctrica cuando en un lapso mayor al cinco por ciento, del correspondiente al total del Período de Medición Mensual, las mediciones muestran que el Desbalance de la Corriente ha excedido el rango de tolerancias establecidas. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica [CNEE], 2010, p. 189)

Artículo 33. “Control para el Desbalance de Corriente. Las mediciones serán realizadas en los puntos que el Transportista considere necesarios a efectos de identificar a los Participantes que afecten la calidad del servicio de su

Sistema de Transporte” (Comisión Nacional de Energía Eléctrica [CNEE], 2010, p. 189).

Cabe realizarse una aclaración sobre las dos tolerancias que establece la norma, la tolerancia de un 10 % que es para un registro específico y la tolerancia de un 5 % que incluye todos los registros en un mes, esta última es la más importante, ya que dicho registro del 5 % del total de mediciones indicara si la medición está fuera del rango de tolerancia, entonces se dice que el participante afecta la calidad en cuanto al parámetro de desbalance de corriente.

Es muy relevante hacer mención que el estudio se realizará por la incertidumbre entre los entes encargados del transporte de energía, la cual en los últimos años han reportado una cantidad mayor de puntos fuera de tolerancias, pero son transportistas que tienen conectado a sus sistemas a agentes participantes y distribuidores por lo que tienen una carga significativa, esto puede estar aumentando dichos puntos fuera de tolerancia. Además, es importante mencionar que los demás agentes que no consideran una carga significativa como anteriormente se menciona, reportaron puntos fuera de tolerancia, por lo que acá vemos la importancia de este estudio. (CNEE, 2021, pp.16-18)

7.5.2. Normativa del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE por sus siglas en inglés)

Es una sociedad técnica y profesional que se dedica a la estandarización y entre su principal función está promover la creatividad, el desarrollo y la integración, emplear los avances en las tecnologías de la información, electrónica y ciencias, para el beneficio de la humanidad y de los mismos profesionales. (Ruiz, 2015)

En la normativa *Práctica recomendada de IEEE para Monitoreo de la calidad de la energía eléctrica* Estándar 1159-2009 se menciona desbalance o desequilibrio de voltaje y de corriente.

Desequilibrio (voltaje o corriente): “La relación entre el componente de secuencia negativa y el componente de secuencia positiva, generalmente expresado como un porcentaje. Syn: desequilibrio (voltaje o corriente)” (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos [IEEE], 2009, p. 2).

Apartado 4.4.4. El desequilibrio (a veces llamado desequilibrio) en un sistema trifásico se define como la relación entre la magnitud del componente de secuencia negativa y la magnitud del componente de secuencia positiva, expresada como porcentaje. Esta definición se puede aplicar para voltaje o corriente. Normalmente, el desequilibrio de tensión de un servicio trifásico es inferior al 3 %. El desequilibrio de corriente puede ser considerablemente mayor, especialmente cuando hay presentes cargas monofásicas. Matemáticamente, el desequilibrio de voltaje está representado por la Ecuación [1]. (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos [IEEE], 2009, p. 15)

$$\% \text{ Desequilibrio} = \frac{|V_{neg}|}{|V_{Pos}|} \times 100\% \quad (1)$$

V_{neg} : Voltaje secuencia Negativa

V_{pos} : Voltaje Secuencia Positiva (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos [IEEE], 2009, p. 15).

Cabe destacar que esta ecuación es aplicable para voltaje como para corriente, con la utilización de las componentes simétricas antes mencionadas.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

JUSTIFICACIÓN

OBJETIVOS

NECESIDADES A CUBRIR O ESQUEMA DE SOLUCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica

1.1.1. Transporte de Energía.

1.1.2. Clasificación de las Líneas Eléctricas

1.1.2.1. Líneas de Transmisión

1.1.2.2. Líneas de Subtransmisión

1.1.3. Sistema de Energía Eléctrica en Guatemala.

1.1.4. Eficiencia en el Transporte de Energía.

1.1.5. El marco Institucional y Regulatorio del Subsector Eléctrico de Guatemala

1.1.5.1. Estructura del Subsector Eléctrico de Guatemala.

1.1.6. Sistema Eléctrico Nacional

1.2. Desbalance de Voltaje

1.3. Desbalance de Corriente

1.3.1. Efectos Adversos Debido al Alto Porcentaje de Desbalance de Corriente

1.3.1.1. Efectos en Motores de Inducción

1.3.1.2. Efectos en Transformadores

1.3.1.3. Efectos en Líneas

1.3.2. Sistema trifásico

1.3.3. Sistema trifásico equilibrado

1.3.4. Fase

1.3.5. Ángulo de Fase

1.3.6. Corriente de Fase

1.3.7. Desequilibrio en Líneas

1.3.8. Desequilibrio en cargas

1.4. Componentes Simétricas

1.4.1. Orden de fases

1.4.2. Sistema simétrico

1.4.3. Secuencia cero

1.4.4. Secuencia positiva

1.4.5. Secuencia negativa

1.5. Normativas

1.5.1. Normativa de la comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE)

1.5.2. Normativa del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE por sus siglas en inglés)

1.6. Análisis y exploración de normativas por comparar

1.7. Estudio de fórmulas y análisis matemático de las mismas

1.8. Aplicación del teorema de componentes simétricas y análisis de la variación el ángulo de fase

1.9. Elaboración de plan estratégico para la toma de decisiones del periodo de datos y transportista a analizar

1.10. Análisis de datos con base a fórmulas de normativas en comparación en una hoja de cálculo

1.11. Análisis grafico para la verificación de la variación de tolerancias

1.12. Presentación de discusión de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1 Metodología de comparación entre dos métodos del cálculo de medición del desbalance de corriente, entre dos normativas

La eficiencia energética engloba muchas aristas que se pueden desglosar en procesos y mecanismos de implementación, medición y cálculo.

El sistema de transporte de energía en Guatemala está teniendo incertidumbre en el método empleado para la medición del desbalance de corriente, debido a que la utilización de solo un método y una norma específica para dicha medición es ambigua, debido a que no considera cierto parámetro que conlleva un desbalance.

9.1.1. Tipo de estudio

Se considera un tipo de estudio tipo cuantitativo descriptivo aplicado, debido a que, con bases de métodos conocidos, se busca la mejora con otro método del cálculo de la medición del desbalance de corriente, aplica el análisis de componentes simétricas, la cual se pretende sea aplicada esta comparación en un futuro.

9.1.2. Fases de estudio

A continuación, se presentan las fases que se realizarán para llevar a cabo el estudio.

9.1.2.1. Exploración bibliográfica

Como primera fase se tendrán la revisión bibliográfica, específicamente de las normas a comparar y así tener los componentes necesarios para el estudio, así mismo los antecedentes que avalan la investigación.

9.1.2.2. Exploración de normas y artículos específicos del desbalance de corriente

Se tendrá como base específica la norma Técnica de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones (NTCSTS) de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, que es la que rige todo el proceso de la calidad del servicio de transporte, la cual en el su artículo 31 menciona el proceso del cálculo del Desbalance de corriente, el cual permite determinar el grado de desviación que se tiene por parte de los participantes.

El cálculo se realiza con la siguiente ecuación, la cual nos da un dato en porcentaje.

$$\Delta DIP (\%) = [3(I_{mp}) / (I_a + I_b + I_c)] \times 100 \quad (1)$$

Las corrientes analizadas son de las tres fases registradas en un intervalo de medición, representadas en la ecuación por I_a , I_b e I_c .

Luego de haber realizado el cálculo, el resultado es un indicador, que en el artículo 32 hace mención que, si este indicador supera las tolerancias establecidas de un 10 % de un registro y un 5 % del total de los registros en un periodo de tiempo de medición, este se considera fuera de rango, por tanto, de mala calidad.

Este proceso se comparará con el método establecido por la norma IEEE 1159, la cual establece el método por el que se analiza el desbalance de corriente, se tomará en consideración el método de componentes simétricas del teorema de Fortescue, específicamente la secuencia negativa y positiva.

El cálculo se realiza con las siguientes ecuaciones, la cual nos da |n dato en porcentaje, pero con la variabilidad del ángulo de fase y la magnitud de las secuencias antes mencionadas.

$$\% \text{ Desequilibrio} = \frac{|V_{neg}|}{|V_{Pos}|} \times 100\% \quad (2)$$

$$I_{A+} = \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C) \text{ Secuencia Positiva} \quad (3)$$

$$I_{A-} = \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C) \text{ Secuencia Negativa} \quad (4)$$

Las ecuaciones 3 y 4 representan las corrientes de secuencia positiva (IA+) y secuencia negativa (IA-), estas se analizan respecto a las corrientes de cada fase, IA, IB e IC, con los ángulos de fase representados por $a=120^\circ$ y $a=240^\circ$.

9.1.2.3. Recolección de datos para el análisis del desbalance de corriente

Se requerirá que la Comisión Nacional de Energía Eléctrica brinde informes que contengan datos de las mediciones durante un periodo determinado, para poder analizar los registros de las mediciones y así poder explorar y realizar el análisis matemático respectivo entre los dos métodos, teniendo en consideración la variable del ángulo de fase del método con el cual se comparará. Los datos obtenidos por el método actual y el método de comparación se analizarán con base a las variables del ángulo de fase y la

variación de la tolerancia, si la hubiera, en función de lo que establece la norma de la CNEE.

Mediante análisis matemático se realizará la deducción de componentes simétricas del teorema de Fortescue, las cuales son de mucho interés para el método a comparar.

9.1.2.4. Análisis de datos

Los datos obtenidos se registrarán en el programa Excel, para realizar un análisis gráfico, con la variación de los métodos y las variables a estudiar, en estas graficas se estudiará el rango de variación, si hubiera, que se obtendría por el método comparativo en función de la tolerancia que indica la norma actual.

- Tabulación de datos requeridos por la CNEE en una hoja de cálculo (Excel).
- Aplicación de fórmulas

Aplicación de la formula establecida por la norma de la CNEE.

Aplicación de la formula establecida por la norma de la IEEE 1159.

- Análisis y medición de variables

Análisis de variable del ángulo de fase

Análisis de verificación de variación de tolerancia

Medir la variación del ángulo de fase en la fórmula de la IEEE 1159

Medir la medición promedio de las corrientes desbalanceadas

Medir cantidad de datos que no cumplan el parámetro de tolerancia

Medir el porcentaje de variabilidad en el total de la medición

- Comparación entre las metodologías establecidas en cada Norma

Método del cálculo del “Índice para evaluar el Desbalance de Corriente de los Participantes”, en la Norma Técnica de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones (NTCSTS).

Método de “Desequilibrio de Tensión y Corriente a partir de Secuencias de Fase”, en la Norma IEEE 1159.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

La información recopilada y los cálculos realizados se analizarán con base a los puntos mencionados a la norma actual, basados en la tolerancia y las variables a estudiar por el método por comparar.

- Análisis estadístico
- Análisis matemático
- Tablas con datos de las mediciones.
- Tabla de datos con los cálculos de los métodos establecidos por las dos normas.
- Diagrama de intervalos para la comparación del rango de tolerancias entre los dos métodos.

Al realizar un marco comparativo con tablas de datos y graficas se pretende obtener resultados que demuestren si hay alguna variación por la utilización de otro método para el cálculo de desbalance de corriente, si la variable del ángulo de fase es de gran significa para el cálculo del indicador que muestra si una medición es de mala calidad, o no cumple el rango de tolerancias establecido por la norma actual.

El análisis matemático, será para la aplicación de las componentes simétricas, desde su deducción hasta el proceso de aplicación.

Se aplicará análisis estadístico, para interpretar las medidas de tendencia central de los datos y como las medidas de variabilidad para el análisis de desviación de datos.

Los gráficos demostraran la variación de los métodos de cálculo y variables de cada método, así mismo un rango identificable de la reducción, aumento o no variación del porcentaje de excedencia en la tolerancia.

Por lo que los resultados realizados garantizaran el funcionamiento óptimo del sistema de transporte, ya que la aplicación de un solo método en el cálculo del desbalance genera ciertas ambigüedades, por lo que tener dos propuestas del indicador de dicho desbalance generará confianza, además de aportar una propuesta para el ente regulador CNEE, que podrá ser una actualización de la normativa actual.

Los métodos por comprar en este estudio son:

Método del cálculo del “Índice para evaluar el Desbalance de Corriente de los Participantes”, en la Norma Técnica de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones (NTCSTS).

Método de “Desequilibrio de Tensión y Corriente a partir de Secuencias de Fase”, en la Norma IEEE 1159.

11. CRONOGRAMA

El presente cronograma presenta las fases y tiempo en los que se realizará la investigación del análisis comparativo del cálculo del desbalance de corriente, el tiempo estimado de realización es de seis meses.

Tabla I. Fases y tiempo de la investigación

| | | | | |
|--|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Inicio | Jun 18/07/22 - dom 24/15d | Jun 18/07/22 - vie 05/04/22 | Jun 18/07/22 - dom 24/07/22 | Comienzo: lun 18/07/22 - dom 24/07/22 |
| Búsqueda de informes del DOCC | 0 días | Jun 18/07/22 - lun 18/07/22 | 18/07 | Tecnológico/Humano |
| Definición de la metodología de la investigación | 15 días | Vie 05/04/22 - 2 | Comienzo: lun 08/08/22 - dom 14/08/22 | Tecnológico/Humano |
| Revisión de la literatura estadística al DOCC | 14 días | Jun 08/08/22 - sab 17/08/22 | Comienzo: lun 21/08/22 - dom 27/08/22 | Tecnológico/Humano |
| Búsqueda de Normas CNEE - IEEE | 8 días | Dom 08/08/22 - 17/08/22 | Comienzo: lun 15/04/22 - dom 21/04/22 | Tecnológico/Humano |
| Búsqueda de Normas CNEE - IEEE | 8 días | Jue 18/08/22 - lun 29/08/22 | Comienzo: lun 28/08/22 - dom 04/09/22 | Tecnológico/Humano |
| Comienzo: lun 28/08/22 - dom 04/09/22 | 7 días | Jue 24/08/22 - 29/08/22 | Comienzo: lun 26/09/22 - dom 02/10/22 | Tecnológico/Humano |
| Investigación de la metodología de la investigación | 70 días | Mar 30/08/22 - lun 26/09/22 | Comienzo: lun 24/10/22 - dom 30/10/22 | Tecnológico/Humano |
| Comienzo: lun 26/09/22 - dom 02/10/22 | 7 días | Mar 30/08/22 - 26/09/22 | Comienzo: lun 06/11/22 - dom 12/11/22 | Tecnológico/Humano |
| Realización Marco Teórico | 23 días | Mar 27/09/22 - Jue 27/10/22 | Comienzo: lun 13/11/22 - dom 19/11/22 | Tecnológico/Humano |
| Comienzo: lun 24/10/22 - dom 30/10/22 | 1 día | Vie 28/10/22 - vie 28/10/22 | Comienzo: lun 20/12/22 - dom 26/12/22 | Tecnológico/Humano |
| Elaboración de la metodología de la investigación | 1 día | Vie 28/10/22 - vie 28/10/22 | Comienzo: lun 27/12/22 - dom 01/01/23 | Tecnológico/Humano |
| Análisis de los Artículos enfocados al DOCC | 5 días | Jun 04/11/22 - vie 04/11/22 | Comienzo: lun 03/01/23 - dom 09/01/23 | Tecnológico/Humano |
| Estudio de las fórmulas en la metodología de la investigación | 10 días | Jun 11/11/22 - vie 18/11/22 | Comienzo: lun 10/01/23 - dom 16/01/23 | Tecnológico/Humano |
| Análisis de las variables en las diferentes normas | 15 días | Jun 18/11/22 - vie 25/11/22 | Comienzo: lun 17/01/23 - dom 23/01/23 | Tecnológico/Humano |
| Requisitos de datos por la metodología de la investigación | 25 días | Jun 25/11/22 - vie 02/12/22 | Comienzo: lun 24/01/23 - dom 30/01/23 | Tecnológico/Humano |
| Comienzo: lun 12/12/22 - dom 18/12/22 | 2 días | Jun 30/11/22 - vie 06/12/22 | Comienzo: lun 31/01/23 - dom 06/02/23 | Tecnológico/Humano |
| Establecer que datos de empresa se transportarán a analizarlos | 2 días | Jun 16/01/22 - dom 22/01/23 | Comienzo: lun 13/02/23 - dom 19/02/23 | Tecnológico/Humano |
| Establecer un período de datos a 2 días | 2 días | Jun 16/01/22 - dom 22/01/23 | Comienzo: lun 20/02/23 - dom 26/02/23 | Tecnológico/Humano |
| Análisis del incremento de componentes sinérgicos | 5 días | Mar 16/01/22 - dom 22/01/23 | Comienzo: lun 27/02/23 - dom 05/03/23 | Tecnológico/Humano |
| Tabulación de datos requeridos | 5 días | Vie 27/01/22 - Jue 02/02/23 | Comienzo: lun 06/03/23 - dom 12/03/23 | Tecnológico/Humano |
| Asignación de las fórmulas establecidas por norma de la CNEE | 5 días | Vie 02/02/23 - 09/02/23 | Comienzo: lun 13/03/23 - dom 19/03/23 | Tecnológico/Humano |
| Aplicación de la fórmula de la metodología de la investigación | 5 días | Vie 10/02/22 - Jue 16/02/23 | Comienzo: lun 20/03/23 - dom 26/03/23 | Tecnológico/Humano |
| Análisis de variable del Angulo de fase | 4 días | Vie 17/02/23 - sab 24/02/23 | Comienzo: lun 27/03/23 - dom 02/04/23 | Tecnológico/Humano |
| Comparación entre las metodologías establecidas en la Norma | 8 días | Jue 23/02/23 - lun 06/03/23 | Comienzo: lun 04/04/23 - dom 10/04/23 | Tecnológico/Humano |
| Análisis para verificar la Variación de tolerancias | 8 días | Mar 07/03/22 - Jue 16/03/23 | Comienzo: lun 11/04/23 - dom 17/04/23 | Tecnológico/Humano |
| Realización de Tablas comparativas | 6 días | Vie 17/03/23 - vie 24/03/23 | Comienzo: lun 18/04/23 - dom 24/04/23 | Tecnológico/Humano |
| Realización de Gráficos comparativos | 6 días | Jun 27/03/23 - dom 03/04/23 | Comienzo: lun 25/04/23 - dom 01/05/23 | Tecnológico/Humano |
| Comienzo: lun 03/04/23 - dom 09/04/23 | 0 días | Jun 27/03/23 - 03/04/23 | Comienzo: lun 02/05/23 - dom 08/05/23 | Tecnológico/Humano |
| FINAL | 0 días | Jun 03/04/23 - lun 03/04/23 | Comienzo: lun 09/05/23 - dom 15/05/23 | Tecnológico/Humano |

Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente trabajo de estudio se realizará con recursos propio, siendo una investigación de índole cuantitativo descriptivo aplicado, se tendrá en cuenta los siguientes recursos

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

| Recursos | Costo |
|--|-------------------|
| Viáticos (Combustible, alimentación, hospedaje, Saldo para llamadas) | Q 2,500.00 |
| Resmas de hojas | Q 150.00 |
| Tinta impresora | Q 300.00 |
| Total | Q 2,950.00 |

Fuente: elaboración propia.

- La información de datos de medición será solicitada a la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), tomando en cuenta el tiempo necesario para el trámite burocrático que este conlleva.
- Las normativas a implementar se encuentran en la web, para su análisis y aplicación.
- Para el análisis y aplicación de estudio se utiliza equipo de cómputo para el análisis de datos.

Tomando en consideración los recursos, el acceso a la información y el equipo para la investigación, se considera que es factible la realización de este estudio.

REFERENCIAS

1. Carrillo, A. (2021). *Impacto del desbalance de cargas en líneas de distribución de energía eléctrica*. (Tesis de licenciatura). Universidad Antonio Nariño. Repositorio de la Universidad Antonio Nariño. Colombia. Recuperado de <http://186.28.225.13/bitstream/123456789/2577/1/2020AlexisFernandoCarrilloOsorio.pdf>
2. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2010). *Compendio de normas técnicas emitidas por la comisión nacional de energía eléctrica*. Guatemala. CNEE.
3. Duarte B., (2020), *Estudio de tecnologías para la mejora de la eficiencia en el transporte de energía eléctrica en redes saturadas convencionales expuestas a la producción masiva de origen renovable: aplicación a la red española*. (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia, España: Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/171527/Duarte%20-%20Estudio%20de%20tecnologias%20para%20la%20mejora%20de%20la%20eficiencia%20en%20el%20transporte%20de%20energia%20elect..pdf?sequence=1>
4. Electricaplicada. (25 de agosto de 2022). *Elementos básicos de un sistema de transmisión eléctrica*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.electricaplicada.com/elementos-basicos-de-un-sistema-de-trasmision-electrica/>

5. Fayos, A., (2009). *Líneas eléctricas y transporte de energía eléctrica*. (1ª edición). España: Editorial Universitat Politècnica de València. Recuperado de https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/edb391c6-0b01-4629-8ce7e56e4fb60ca6/TOC_4062_04_01.pdf?guest=true
6. Ferro, G., (2010), *El Método de las Componentes Simétricas*, Mar del Plata, Argentina: Universidad Nacional de Mar del Plata. Recuperado de http://www3.fi.mdp.edu.ar/dtoelectrica/files/electrotecnia/e_im_8_circuitos_trifasicos.pdf
7. Foro Transporte de Energía Eléctrica en Guatemala. (25 de agosto de 2022). ¿Cómo funciona el sistema de transporte de energía eléctrica en Guatemala? [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://forotee.com.gt/noticias/como-funciona-el-sistema-de-energia-electrica-en-guatemala-trecca/>
8. Francesc Fornieles. (9 de noviembre del 2020). *Desequilibrio de tensión y corriente*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://fornieles.es/electrotecnia/desequilibrio-tension-y-corriente-componentes-simetricas/>.
9. Frankce, A. (8 de octubre 2007). *Ángulo de fase y desfase*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de https://www.academia.edu/10110456/%C3%81ngulo_de_fase_y_desfase

10. Fundación Endesa. (30 de agosto de 2022). *Transporte de electricidad*. ENDESA. Recuperado de <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/transporte-de-electricidad#:~:text=El%20transporte%20de%20electricidad%20se,el%20sevar%20su%20nivel%20de%20tensi%C3%B3n>.
11. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (2009). *Práctica recomendada de IEEE para Monitoreo de la calidad de la energía eléctrica*. Guatemala: Autor.
12. Jaramillo, D., Fonseca, A., Pérez, F. (febrero 2020). Metodología para determinar la distribución de corrientes de desbalance en líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica. *Revista Politécnica*, 44(2), 15-24. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/339855187_Metodologia_para_Determinar_la_Distribucion_de_Corrientes_de_Desbalance_en_Lineas_Aereas_de_Transmision_de_Energia_Electrica
13. López, J., Ventura, E. (2019). *Estudio del desbalance de tensiones y sus efectos en la calidad del producto técnico para sistemas de distribución a nivel industrial* (Tesis de licenciatura). Universidad de El Salvador. El Salvador. Recuperado de <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/19500/1/Estudio%20del%20desbalance%20de%20tensiones%20y%20sus%20efectos%20en%20la%20calidad%20del%20producto%20t%C3%A9cnico%20para%20Sistemas%20de%20Distribuci%C3%B3n%20a%20Nivel%20Industrial.pdf>

14. López, O., (2017). *Balanceo de circuitos de distribución primaria 6, 31 y 162 de Santa Clara* (Tesis de licenciatura). Universidad Central Marta Abreu de las Villas. Santa Clara, Cuba. Recuperado de <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/8035/Osniel%20L%c3%b3pez%20Ruiz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
15. Martínez, A., (2014), "*Cuadernillo: método de las componentes simétricas*" (1ª edición) Buenos Aires, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional. Recuperado de https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/electrica/3_anio/electrotecnia_2/Metodo_de_las_componentes_simetricas_-_Teoria.pdf
16. Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Subsector eléctrico en Guatemala*. Guatemala: MEM. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/Subsector-El%C3%A9ctrico-en-Guatemala.pdf>
17. Moreno I., Curbelo J. (2019). *Análisis de circuitos trifásicos* (1ª edición.). Santa Clara, Cuba: Universidad Central Marta Abreu de la Villas. Recuperado de <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/12489/An%C3%A1lisis%20Circuitos%20Trif%C3%A1sicos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
18. Nasimba, V., Díaz, O., Nasimba, J. (2020, 2 febrero). *Introducción a las líneas de transmisión*. (1ª edición). Ecuador: Grupo Compás. <http://142.93.18.15:8080/jspui/bitstream/123456789/718/1/Vi%CC%81ctor%20F.%2030-%2010-2020%20.pdf>
19. Órganos de Palencia. (23 de diciembre de 2021). *¿Qué es el ángulo de fase?* [Mensaje en un blog]. Recuperado de:

<https://organosdepalencia.com/biblioteca/articulo/read/280373-que-es-el-angulo-de-fase>

20. Pascual, H., Maccarone, J., Albanese, A., Fata, O., Clemente, C. (2017). *Cuantificación del desbalance admisible en corrientes, para redes de distribución eléctrica de baja tensión*. Buenos Aires, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata. Recuperado de: <https://ria.utn.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12272/2403/Cuantificaci%3b3n%20del%20desbalance%20admisible%20en%20corrientes%2c%20para%20redes%20de%20distribuci%3b3n%20el%3b3n%20de%20baja%20tensi%3b3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
21. Pepe Energy. (30 de agosto de 2022). *¿Qué es un sistema trifásico?* [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.pepeeenergy.com/blog/glosario/definicion-sistema-trifasico/>
22. Piumetto, M., Gómez J., Vaschetti J. (abril 2014). Reducción de los factores de desbalance un sistema de distribución de media tensión debido a la inserción de generación distribuida. *Ingeniería eléctrica*, 25(4), 91-102. Recuperado de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642014000400012
23. Pulso Capital. (23 de febrero de 2021). *¿Cómo funciona el sistema de energía eléctrica en Guatemala?* [Mensaje en un blog]. Recuperado de

<https://pulsocapital.com/como-funciona-el-sistema-de-energia-electrica-en-guatemala/>

24. Quintana, P., (2017), *Compensación de desequilibrios en redes eléctricas mediante convertidores electrónico de potencia y redes de secuencia*. (Tesis de grado), Universidad Politécnica de Madrid. España. Recuperado de https://oa.upm.es/45247/1/TFG_PILAR_QUINTANA_HURTADO.pdf

25. RADTHINK. (16 de enero 2020). *Código de red: calidad de la potencia parte 3: desbalance*. RADTHINK. Recuperado de <https://radthink.com.mx/codigo-de-red-calidad-de-la-potencia-3/#:~:text=El%20desbalance%2C%20tanto%20de%20tensi%C3%B3n,los%20120%C2%B0%20entre%20s%C3%AD.>

26. Rivas, C., (enero 2014). Eficiencia energética en sistemas de distribución eléctrica. *Dínamo técnico*, 13, 10-11. Recuperado de https://elinsa.org/wp-content/uploads/eficiencia_energetica_distribucion_electrica.pdf

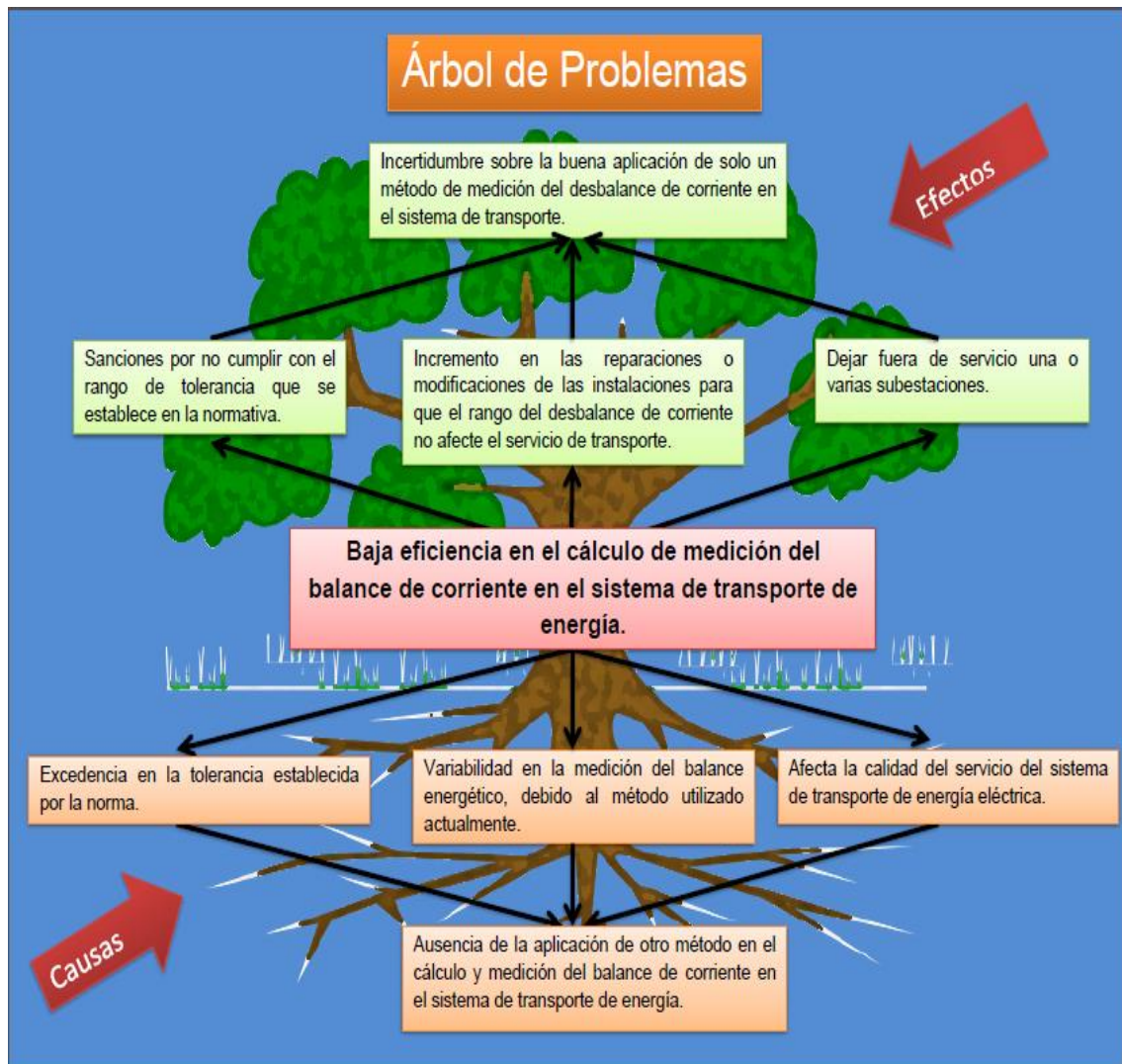
27. Rodríguez, E., (2015), *Análisis del desequilibrio en redes de distribución de baja tensión*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Sevilla. España: Recuperado de https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/5555/descargar_fichero/An%C3%A1lisis+del+desequilibrio+en+redes+de+distribuci%C3%B3n.pdf

28. Ruiz, L., (enero 2015). La asociación técnica internacional más grande del mundo para el beneficio de la humanidad. *IEEE: una oportunidad de desarrollo para el ingeniero actual*. 1, 1-5, Recuperado de <http://r9.ieee.org/peru-pes/wpcontent/uploads/sites/83/2015/01/IEEE-Hoy-Luis-Ivan-Ruiz-Flores.pdf>

29. Santos, A, (2019). *Análisis de comportamiento operativo de desbalance de corriente en el nodo de calidad de la subestación Tuxtla II del nodo del bus I y bus II.* (Tesis de licenciatura) Tecnológico nacional de México. México. Recuperado de <http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/handle/123456789/1/browse?type=subject&value=Desbalance>
30. Simba, B. (2021). *Metodología para reducir el desbalance de la demanda mediante sistemas de medio voltaje en corriente directa.* (Tesis de licenciatura) Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito]. Repositorio de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19778/1/UPS%20-%20TTS241.pdf>

APÉNDICES

Apéndice 1. Árbol de problema



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Matriz de coherencia

| Pregunta General | Objetivo General | Objetivos Específicos | Variables | Magnitudes | Indicadores | Metodología |
|--|---|--|---|---|---|--|
| <p>¿Cuál es la eficiencia obtenida en la medición y cálculo del desbalance de corriente en el sistema de transporte de energía a partir de la aplicación del método utilizado por la norma IEEE, comparado con el actual?</p> | <p>Determinar la eficiencia obtenida en la medición del cálculo del desbalance de corriente en el sistema de energía a partir del nuevo método (IEEE) y compararlo con el método actual (NTCSTS).</p> | <p>Analizar el rango de tolerancia alcanzado a partir de la aplicación del método establecido por la norma IEEE.</p> | <p><u>Variable independiente:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Metodología para el cálculo del desbalance de corriente. • Tolerancia establecida por la norma actual. <p><u>Variable Dependiente:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Incertidumbre en el método del cálculo de medición del desbalance de corriente. • Tolerancia alcanzada por la metodología a nueva. | <ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de Desbalance de Corriente (%) • Ángulo de Fase en Grados (°) • Corriente en Amperios (A) • Valores por Unidad (p.u.) | <p>Para la Variable Independiente:</p> <p>a) Método único b) Utilización de una sola normativa.</p> <p>Para la Variable Dependiente:</p> <p>a) Variables de específicas de la medición. b) Variabilidad de la medición. c) Baja eficiencia en las mediciones del desbalance de corriente.</p> | <p>Tipo de Investigación: <i>Exploratoria.</i> Con base a métodos conocidos, se busca la mejora con un nuevo método, ya que no existe un estudio previamente específico. <i>Aplicada.</i> Se tiene el interés de que la metodología de comparación sea aplicada en un futuro.</p> <p>Nivel de la investigación: Debe ser entendida como un método comparativo para futuras aplicaciones.</p> <p>Método: Estudio exploratorio, aplicado</p> <ul style="list-style-type: none"> • Revisión Documental. • Recolección de Datos • Análisis matemático. <p>Población: Datos extraídos de fuentes confiables.</p> |
| | | <p>Evaluar la diferencia de variables obtenidas en el nuevo método de comparación con el que se tiene</p> | <p><u>Variable independiente:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Angulo de fase de las corrientes medidas. <p><u>Variable Dependiente:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Corriente de Fase. | | | |

Continuación apéndice 2.

| | | | | | | |
|-----------------------|--|--|---|--|--|---|
| | | actualmente especificado en la CNEE. | | | | Muestra: Resultado posterior comparativo de los métodos en estudio. |
| | | Determinar el cumplimiento del método a comparar de la norma IEEE, con base a los parámetros de tolerancia que se establecen en la norma actual. | <u>Variable independiente.</u> • Promedio de la corriente de las tres fases. <u>Variable Dependient e:</u> • Desviación de corriente de cualquiera de las fases, respecto al promedio. | | | |
| Preguntas Especificas | | | | | | |
| | | ¿Cuál es el rango de tolerancia alcanzado a partir de la aplicación del método establecido por la norma IEEE? | ¿Qué diferencia tuvo el nuevo método en comparación con el que se tenía ya establecido? | | | ¿Qué variaciones tuvo la excedencia de tolerancia permitida por el desbalance de corriente a partir del nuevo método? |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Plan de acción de investigación

| Objetivos | Etapas de la Investigación | Actividades a Desarrollar | Recursos Necesarios | Tiempo Necesarios para Desarrollarlo |
|-----------|--|--|------------------------|--------------------------------------|
| OE 1 | Diseño <hr/> Exploratoria | Revisión de informes de la CNEE. | Tecnológico/ Humano | Tres (3) meses |
| | | Análisis de Normativas a Comparar. | | |
| OE 2 | Metodología <hr/> Exploratorio aplicado | Análisis de fórmulas a comparar. | Tecnológico/ Humano | Cinco (5) semanas |
| | | Comparar resultados. Verificar la variación de la tolerancia. | | |
| OE 3 | Implementación <hr/> Con base a métodos conocidos, se busca la mejora con un nuevo método, ya que no existe un estudio previamente específico. | Identificar las variables aplicadas para el análisis de comparación. Análisis/efecto de las variables utilizadas. | Tecnológico/Humano | Dos (2) meses |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Índice marco teórico

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica

2.1.1. Transporte de Energía.

2.1.2. Clasificación de las Líneas Eléctricas

2.1.2.1. Líneas de Transmisión

2.1.2.2. Líneas de Subtransmisión

2.1.3. Sistema de Energía Eléctrica en Guatemala.

2.1.4. Eficiencia en el Transporte de Energía.

2.1.5. El marco Institucional y Regulatorio del Subsector Eléctrico de Guatemala

2.1.5.1. Estructura del Subsector Eléctrico de Guatemala.

2.1.6. Sistema Eléctrico Nacional

2.2. Desbalance de Voltaje

2.3. Desbalance de Corriente

2.3.1. Efectos Adversos Debido al Alto Porcentaje de Desbalance de Corriente

2.3.1.1. Efectos en Motores de Inducción

2.3.1.2. Efectos en Transformadores

2.3.1.3. Efectos en Líneas

2.3.2. Sistema trifásico

2.3.3. Sistema trifásico equilibrado

2.3.4. Fase

2.3.5. Angulo de Fase

2.3.6. Corriente de Fase

2.3.7. Desequilibrio en Líneas

2.3.8. Desequilibrio en cargas

Continuación apéndice 4.

2.4. Componentes Simétricas

2.4.1. Orden de fases

2.4.2. Sistema simétrico

1.3.1. Secuencia cero

1.3.2. Secuencia positiva

1.3.3. Secuencia Negativa

2.5. Normativas

2.5.1. Normativa de la comisión Nacional de Energía Eléctrica
(CNEE)

2.5.2. Normativa del Instituto de Ingenieros Eléctricos y
Electrónicos (IEEE por sus siglas en inglés)

Fuente: elaboración propia.