



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS TÉCNICO–ECONÓMICO DEL EFECTO DE
REDUCIR EL LÍMITE DE LA TOLERANCIA DEL ÍNDICE DE DESBALANCE DE TENSIÓN EN
LA RED DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO LAS METODOLOGÍAS NTSD E IEC 61000-4-30**

Hugo Armando Cabrera Rucal

Asesorado por el M.A. Ing. Marcos Alberto González Miranda

Guatemala, febrero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS TÉCNICO–ECONÓMICO DEL EFECTO DE
REDUCIR EL LÍMITE DE LA TOLERANCIA DEL ÍNDICE DE DESBALANCE DE TENSIÓN EN
LA RED DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO LAS METODOLOGÍAS NTSD E IEC 61000-4-30**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

HUGO ARMANDO CABRERA RUCAL

ASESORADO POR EL M.A. ING. MARCOS ALBERTO GONZÁLEZ MIRANDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, FEBRERO 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 Martinez
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. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto Gonzáles Padilla
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DEL EFECTO DE REDUCIR EL LÍMITE DE LA TOLERANCIA DEL ÍNDICE DE DESBALANCE DE TENSIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO LAS METODOLOGÍAS NTSD E IEC 61000-4-30

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 6 de agosto de 2022.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Hugo', with a stylized, scribbled end.

Hugo Armando Cabrera Rucal



EPPFI-PP-1636-2022

Guatemala, 7 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 DEL ANÁLISIS TÉCNICO – ECONÓMICO DEL EFECTO DE REDUCIR EL LÍMITE DE LA TOLERANCIA DEL ÍNDICE DE DESBALANCE DE TENSION EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO LAS METODOLOGÍAS NTSD E IEC 61000-4-30**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Proyectos de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en un mercado eléctrico regulado. - Regulación a nivel nacional**, presentado por el estudiante **Hugo Armando Cabrera Rucal** con cui **2421598690304**, 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 Gestion De Mercados Electricos Regulados.

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

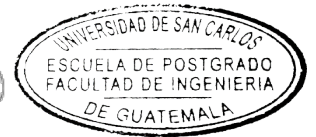
Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Marcos Alberto González Miranda
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 18817

Mtro. Marcos Alberto González Miranda
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-1402-2022

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 DEL ANÁLISIS TÉCNICO – ECONÓMICO DEL EFECTO DE REDUCIR EL LÍMITE DE LA TOLERANCIA DEL ÍNDICE DE DESBALANCE DE TENSION EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO LAS METODOLOGÍAS NTSD E IEC 61000-4-30**, presentado por el estudiante universitario **Hugo Armando Cabrera Rucal**, 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

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 DEL ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DEL EFECTO DE REDUCIR EL LÍMITE DE LA TOLERANCIA DEL ÍNDICE DE DESBALANCE DE TENSIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN, UTILIZANDO LAS METODOLOGÍAS NTSD E IEC 61000-4-30**, presentado por: **Hugo Armando Cabrera Rucal**, 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, febrero de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la bendición para alcanzar mis metas, por darme una extraordinaria familia y ser el centro de nuestras vidas.
- Mi padre** Adrián Cabrera (q. e. p. d.), que en un corto tiempo me hizo comprender la importancia de apreciar a nuestros seres queridos.
- Mi madre** Victoria Rucal, por ser ejemplo de superación, por ser persistente y por haberme brindado herramientas que hasta el día de hoy son de provecho para mi vida.
- Mi esposa** Sandra Xetey, por el ánimo brindado día a día para terminar este trabajo y para alcanzar nuevas metas
- Mis hijos** Josué, Litzuli y Gadiel Cabrera Xetey, por ser fuente de amor sincero y puro y el motor que me motivó a terminar este trabajo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la <i>alma mater</i> , por haberme abierto sus puertas y permitir nutrirme de conocimientos en sus salones.
Facultad de Ingeniería	Por haberme dado la oportunidad de formarme a través de las personas que influyeron directa e indirectamente en mi desarrollo y por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.
Comisión Nacional de Energía Eléctrica	Por ser fuente de conocimientos, por haberme brindado la información y las herramientas necesaria para realizar este diseño de investigación.
Mis amigos	Con quienes compartí durante la carrera, a mis compañeros de trabajo que me brindaron su apoyo y consejo durante el desarrollo de este trabajo.
Mi asesor	M.A. Ing. Marcos González, por su amistad y por haberme guiado durante el trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
3.1. Contexto general	9
3.2. Descripción del problema	9
3.3. Formulación del problema	12
3.4. Delimitación del problema.....	13
4. JUSTIFICACIÓN	15
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. Redes de distribución	21

7.2.	Sistemas trifásicos equilibrados	21
7.3.	Ángulo de fase	22
7.4.	Componentes simétricas	22
7.5.	Calidad de energía	23
7.6.	Control de la calidad de energía	24
7.7.	Índice de desbalance de tensión	25
7.7.1.	Causas del desequilibrio de tensión	25
7.7.2.	Metodología	25
7.7.3.	Rango de tolerancia para el índice de desbalance de tensión	26
7.8.	Penalización presencia del desbalance de tensión en sistemas trifásicos	26
7.8.1.	Tolerancias para el índice de desbalance de tensión	27
7.8.2.	Cálculo de la penalización por superar la tolerancia del índice de desbalance de tensión	27
7.9.	Normativa internacional para el cálculo del desbalance	29
7.9.1.	Índice de desbalance de tensión acorde a las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)	29
7.9.2.	Índice de desbalance de tensión en acorde a las normas del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE)	29
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	31
9.	METODOLOGÍA	33
9.1.	Características del estudio	33
9.2.	Unidades de análisis	34

9.3.	Variables	34
9.4.	Fases del estudio.....	36
9.4.1.	Fase uno: revisión bibliográfica.....	36
9.4.2.	Fase dos: gestión de la información.....	36
9.4.3.	Fase tres: análisis del índice de desbalance de tensión con base a las NTSD.....	36
9.4.4.	Fase cuatro: análisis del comportamiento de los montos de indemnización	37
9.4.5.	Fase cinco: análisis del comportamiento del índice de desbalance de tensión con base a la norma IEC.....	37
9.5.	Resultados esperados	37
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS	39
11.	CRONOGRAMA.....	41
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	43
12.1.	Recurso humano	43
12.2.	Acceso a la información.....	43
12.3.	Equipo de cómputo y recurso informático	43
12.4.	Fuentes de financiamiento.....	43
13.	REFERENCIAS.....	45

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Árbol de problemas	11
2. Cronograma de actividades.....	41

TABLAS

I. Definición teórica y operativa de variables	34
II. Clasificación de las variables	35
III. Recursos financieros.....	44

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
=	Igual que
kW	Kilovatio
>	Mayor que
<	Menor que
%	Porcentaje
P	Potencia
Q	Quetzales
W	Vatio

GLOSARIO

AETN	Autorización de Fiscalización de Electricidad y Tecnología Nuclear
ANDI	Asociación Nacional de Industriales de Honduras
Cpm	Factor de compensación
CE	Valorización de la Energía
CENS	Costo de la energía no suministrada
CNE	Comisión Nacional de Energía
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica
Dpm	Duración del periodo de medición
Dnm	Duración del periodo de tiempo
ENE	Energía en kW, registrada durante el periodo de medición
ESSA	Electrificadora de Santander, S. A.
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional

NTSD

Normas Técnicas del Servicio de Distribución

Watt

Unidad de medida de la potencia eléctrica

RESUMEN

En Guatemala, el control de la calidad de energía eléctrica consiste en evaluar cada uno de los parámetros eléctricos con base en las metodologías establecidas en las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD). Según nuestras normas, estos deben ser evaluados periódicamente a través de indicadores cuyos resultados son comparados con valores de tolerancia que sirven de referencia para determinar el estado del servicio de energía eléctrica.

Los indicadores dan a conocer en qué porcentaje el distribuidor o usuario incide en la calidad de energía de la red de distribución; de estos se puede mencionar al desbalance de tensión, donde el valor obtenido por el índice muestra cuan desbalanceado se encuentra el voltaje en los servicios trifásicos.

El presente diseño de investigación estudia el desbalance de tensión en el circuito de distribución del departamento de Guatemala, analizando el comportamiento del desequilibrio de voltaje durante el primer semestre del 2022, sobre el cual se aplicará la metodología establecida en las NTSD, así como lo que establece la norma IEC 61000-4-30 en su apartado dedicado al desequilibrio de tensión. Dicho análisis consistirá en realizar el cálculo del indicador con base en cada una de las normativas, para luego comparar los resultados obtenidos.

Teniendo los resultados se resaltarán las ventajas de cada una de las normas al aplicarlas en el cálculo del índice de desbalance de tensión, así como el comportamiento en cuanto a aumento o reducción de cantidad de mediciones que superan la tolerancia al variar el límite del 3 % al 2 %.

1. INTRODUCCIÓN

Realizar el estudio del comportamiento de la cantidad de mediciones que superen el límite de tolerancia establecida en las Normas Técnicas del Servicio de Distribución, así como las normas internacionales adoptadas por los entes reguladores de otros países, para el índice de desbalance de tensión y conocer cuál es el resultado del monto de indemnización por superar la tolerancia. Brindará ideas para poder medir, concluir y realizar recomendaciones para el sector eléctrico.

El problema de interés en el presente estudio es conocer como impacta en mejorar la calidad de energía, el reducir el actual límite de tolerancia para el índice de desbalance de tensión e implementar la ecuación establecida en la norma IEC 61000-4-30 para el cálculo de este. La importancia de la reducción es limitar la presencia del desbalance y, por lo tanto, los efectos que este provoca en los equipos y maquinaria conectada a través del suministro eléctrico.

El aumento de la cantidad de usuarios monofásicos y con valores de voltaje en baja tensión, que cuentan con el servicio de energía eléctrica, puede ser una de las causas que permitan la presencia del desequilibrio de tensión, al conectar usuarios sin llevar un control del porcentaje de carga conectada en los centros de transformación o de sobrecargar una o dos de las fases, por permitir circuitos monofásicos de longitud considerable. Lo anterior puede ser motivo suficiente para hacer el estudio comparativo de los resultados que se obtienen al calcular el índice de desbalance de tensión, mediante lo establecido en las

NTSD con los resultados que se obtengan de evaluar dicho índice, a través de la ecuación para desbalance de voltaje utilizado en normas internacionales.

Se utilizará como caso de estudio las mediciones de calidad del producto realizadas durante el primer semestre de 2022, en el municipio de Guatemala. Se analizarán dos escenarios: el primero con límite de tolerancia establecida en las NTSD (3 %), y el segundo se propone una reducción de dicha tolerancia al 2 %. Para ambos casos se utilizará la ecuación de la norma para el cálculo del índice de desbalance de voltaje, así como el cálculo establecido en la norma IEC 61000-4-30 con su respectivo valor de tolerancia. Los resultados obtenidos serán analizados para conocer la diferencia en cantidad de mediciones que resulten en cada normativa.

Se compararán los resultados de los cálculos obtenidos en ambas normativas y se analizarán los efectos en los que pueda influir, para mejorar la calidad de energía. Con base en eso, proponer la implementación de la norma IEC 61000-4-30 o que se prosiga con la actual metodología de cálculo.

El estudio está formado por tres secciones, las que a continuación se describen:

- En la primera sección se encuentra la introducción, el planteamiento del problema, el resumen de la metodología y los objetivos del estudio.
- La segunda sección está contenida por tres apartados:
 - El primero: el marco referencial, conformado por los antecedentes
 - El segundo: el marco teórico y los conceptos del estudio

- El tercero: en donde se presentarán los resultados obtenidos del desarrollo de la investigación y la discusión de estos.
- La tercera parte principal se compone de las conclusiones y recomendaciones del estudio.

2. ANTECEDENTES

En la actualidad, existen trabajos de investigación que miden qué tan diferente en magnitud es el valor de cada voltaje de fase en las máquinas de inducción (motores y transformadores), los cuales ayudarán como soporte para la presente investigación. A continuación, se mencionan algunos que aportan información importante:

Casaravilla y Echinope (2005) en su artículo *Desbalances: Estudio de alternativas para su estimación* realizaron el estudio del comportamiento del desbalance en los voltajes de fase en Guatemala, Colombia, Chile y Bolivia; estos países fueron estudiados porque en su reglamento se contempla el cálculo de dicho índice. Los índices de Bolivia, Chile y Colombia utilizan las fórmulas alternativas establecidas en las normas IEC-61000-4-30 e IEEE 1159; en Guatemala, el cálculo se realiza por medio del artículo 27 de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD).

En los resultados del estudio quedó demostrado que en Guatemala el error relativo que se comete al utilizar la fórmula del artículo 27 de las NTSD, se encuentra en el rango del 50 % al 74 %. Lo anterior fue base para el planteamiento del presente estudio, ya que se utilizarán las fórmulas de las normativas propuestas, para tener escenarios de estudio del comportamiento de la variación de la magnitud de los voltajes de fase, en la distribución de energía en nuestra república.

La tesis de Quispe (2017), titulada *Efectos del desequilibrio de tensiones sobre la operación del motor de inducción trifásico: Énfasis en la caracterización*

del desequilibrio de tensiones y el efecto sobre la potencia nominal, analiza el rango de volares de la desviación del voltaje y del desbalance con base en normas, la importancia del voltaje eficaz en la determinación de las características del sistema conformado por voltaje de fases y análisis de los indicadores de desbalance de voltaje usados actualmente.

El trabajo está enfocado en estudiar las consecuencias del desbalance de voltaje y los efectos que provoca en las máquinas eléctricas. Para el estudio del desequilibrio de tensión, el autor comenta que puede realizarse mediante cualquiera de los indicadores establecidos por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, en inglés) o NEMA; concluyendo en la importancia de aplicar el valor promedio de las tensiones, “la cual se aproxima en unos casos al valor del voltaje de la componente de secuencia positiva y en otros escenarios el resultado es equivalente a esta” (Quispe, 2017, pp. 70 - 84).

Este estudio es relevante para la presente investigación porque analiza el desbalance de tensión con base en las componentes simétricas de voltaje, así como sobre la máxima desviación que pueda existir entre las fases de voltaje.

En su tesis *Análisis de desequilibrios en transformadores y máquinas de inducción trifásicos*, García (2019) evaluó la caracterización de la falta de equilibrio de voltaje, con base en los valores relacionados a subvoltajes, sobrevoltajes, análisis de componentes simétricas, y el “factor de desequilibrio de tensión complejo” (p. 7). La metodología aplicada consistió en dos partes, la primera a través de simulaciones mediante algoritmo y *software* computacional, y la segunda mediante resultados experimentales obtenidos en laboratorio; para ambos escenarios se utilizó motores distintos.

El análisis matemático de las máquinas de inducción se efectuó en régimen permanente. En los resultados que se obtuvieron con base en la metodología aplicada al estudio del Factor de Desequilibrio de Tensión (CVUF, siglas en inglés), se comprobó que los resultados simulados son muy aproximados a los que se obtuvieron en los ensayos realizados en el laboratorio. Esto es muy relevante para el presente trabajo de investigación y serán de utilidad en el apartado del cálculo del índice de desbalance de tensión, aplicando la metodología establecida en la norma IEC.

El libro de Quispe y Gómez (2020), titulado *Desequilibrio de tensiones en motores de inducción*, en su capítulo “desequilibrio de tensiones en motores de inducción” (p. 27) desarrolla los temas relacionados a:

La evolución de los índices para determinar las cualidades del desequilibrio de los voltajes, el factor del desbalance en la metodología de las componentes simétricas, y la definición para la pérdida de equilibrio de las tensiones de fase en las normas IEC, NEMA e IEEE. (Quispe y Gómez 2020, pp. 33-42)

El enfoque del capítulo sobre el índice de desbalance de tensión es relevante para la presente investigación, ya que es un sustento más para la evaluación técnica a dicho índice. De esa manera, se comprenderá que tan diferente es el comportamiento de las magnitudes de voltaje en circuitos trifásicos, al aplicar los métodos establecidos en las normas IEC.

En la tesis de Suriel (2018), titulada *Impacto de la generación Distribuida en Redes de Media Tensión Desequilibradas*, se estudiaron “los efectos de implementar la generación distribuida en media tensión” (p. 136); y agrega que la red analizada “es la que fue propuesta por la Sociedad de Potencia de

Energía del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE PES, siglas en inglés) en su informe *Neutral to Earth Voltage (NEV) TEST case*” (p. 51).

Para el tema específico de desequilibrios de tensión se usó el índice definido en la normativa IEC, que es conocido como un factor de desequilibrio de tensión (VUF, siglas en inglés). Según lo dicta la norma ANSI C84.1-2006, el valor de tolerancia máximo es de 3 %. “Los resultados del análisis en el escenario sin generación distribuida arrojaron un valor máximo de desbalance de tensión de 1.337 % en la barra CKT3-25”. (Suriel, 2018, p. 65)

“Para el escenario en donde se incluye la generación distribuida el valor máximo del índice fue de 1.07 % en la barra CKT3-25” (Suriel, 2018, p. 75). Esto demuestra la reducción de la presencia del desbalance de tensión al penetrar la generación *in situ* en la red del distribuidor. Este estudio es relevante para la presente investigación porque con base en el índice de desbalance definido en la norma IEC, se analizó el comportamiento del desequilibrio de las tensiones en la red al introducir generación distribuida.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Contexto general

En la Ley General de Electricidad se encuentra el derecho que todo usuario tiene en demandar un servicio eléctrico de calidad, mientras que en el Reglamento de la Ley General de Electricidad, se encuentra la responsabilidad que tiene el distribuidor de prestar un servicio que cumpla con lo establecido en dicho reglamento y las normas técnicas que emita la Comisión Nacional de Energía eléctrica. Cuando se habla de calidad de energía en el servicio de distribución, se debe tener presente, que una buena calidad depende que cada uno de los índices cumpla con no superar la tolerancia establecida en las normas.

De lo anterior y a pesar de que cada uno de los indicadores cumplen con no superar su tolerancia correspondiente, no garantiza que el valor resultante sea cero. En este caso específico, se entiende que el desbalance de tensión muy probablemente estará presente, lo que hace importante realizar el estudio del comportamiento de dicho índice al reducir el valor de la tolerancia, tomando como referencia el segundo semestre de 2022, en el municipio de Guatemala.

3.2. Descripción del problema

Actualmente, el valor de la tolerancia a tomar en cuenta, para confrontar los resultados del índice de desbalance de tensión en Guatemala, se encuentra establecido en las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD), y es del 3 % para servicios en baja y media tensión y 1 % para servicios en alta

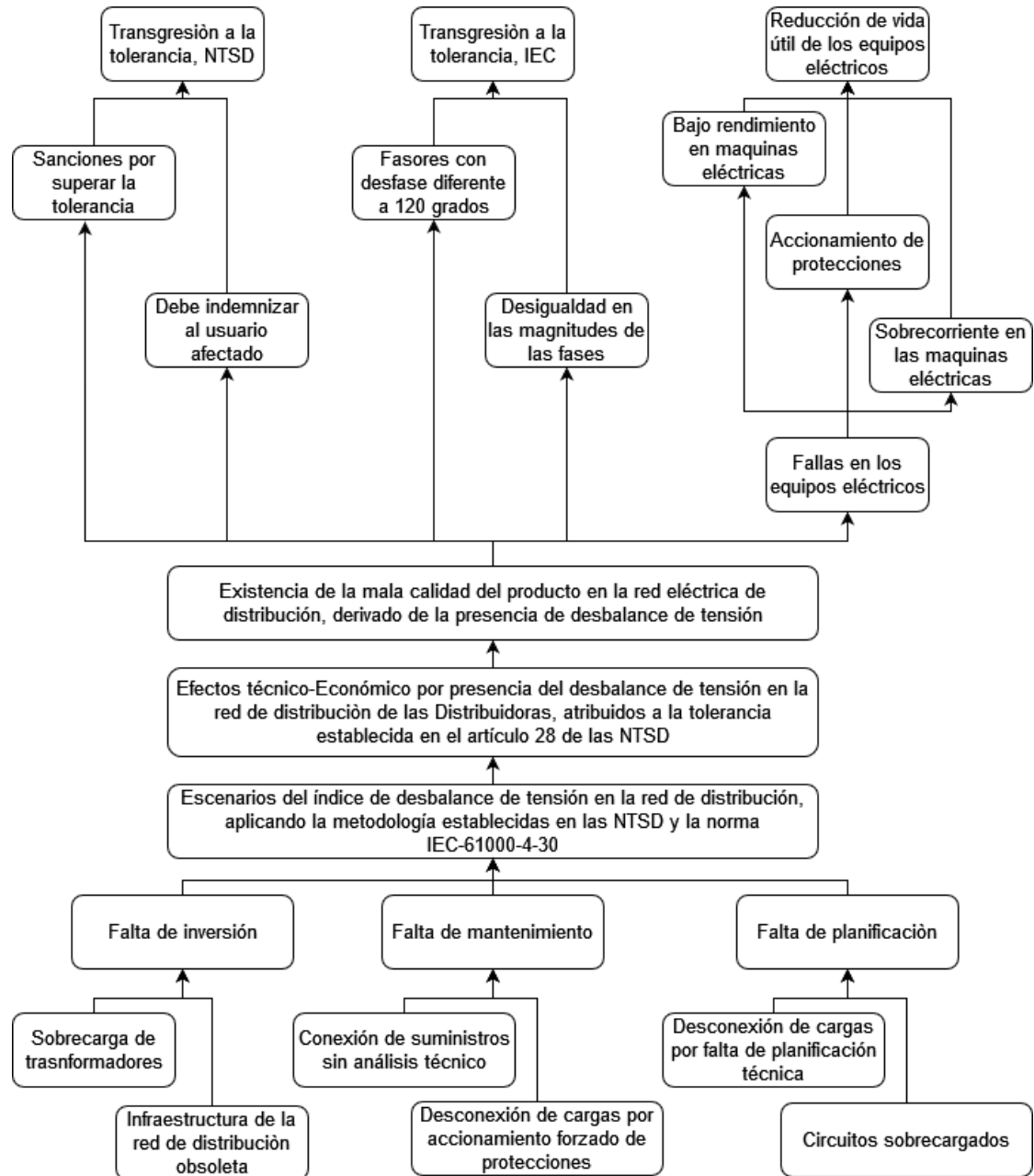
tensión, por lo que se podría entender que la presencia del desbalance es permitida hasta un 3 % para los servicios en baja y media tensión. Como bien se sabe, el hecho de que exista el desbalance en la fuente de alimentación de los equipos eléctricos provoca que estos no funcionen de forma adecuada, funcionen por debajo del rendimiento óptimo y que sufran una reducción en la vida útil de estos.

Cabe señalar que existen zonas en la red de distribución donde es probable que haya desequilibrio de tensión, ya que independientemente de su valor representa un riesgo para el correcto funcionamiento de los equipos eléctricos, lo que hace necesario limitar al máximo esta permisividad.

En resumen, la situación ideal de buena calidad de energía, relacionada con el índice de desequilibrio de tensión, es la presencia de un 0 % de desequilibrio de tensión en la red de distribución, por lo que es necesario analizarla. Donde el valor de tolerancia de evaluación de este índice es menor al actualmente establecido, también para entender el comportamiento en la red de distribución de la ciudad de Guatemala, aplicando el método establecido en la norma IEC.

Por medio del siguiente esquema se lograron identificar las posibles causas y consecuencias del problema que se estudió:

Figura 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Visio.

3.3. Formulación del problema

- Pregunta central

Lo anteriormente descrito dio como resultado una interrogante principal:

- ¿Cuál es el efecto técnico-económico que produce la reducción de la tolerancia establecida en el artículo 28 de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD), para el índice de desbalance de tensión?

- Preguntas auxiliares

Para responder a la anterior interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuáles son los efectos técnicos que produce la reducción de la tolerancia en el índice de desbalance de tensión, en los distribuidores de energía?
- ¿Cuál es el impacto económico en los distribuidores por reducir la tolerancia del índice de desbalance de tensión?
- ¿Cuál es el impacto del desfase de ángulo existente en las componentes de secuencia positiva y negativa de voltaje, en el cálculo del índice de voltaje, aplicando la metodología establecida en la norma IEC-61000-4-30?

3.4. Delimitación del problema

A continuación, se presenta la delimitación contextual, geográfica e histórica del problema de investigación que se estudió:

- **Delimitación contextual**

El estudio del índice de desbalance de tensión se contextualizó en los escenarios de calidad de energía en la red eléctrica de distribución, del segundo semestre de 2022, en el municipio de Guatemala. Lo anterior se hace con base en los resultados que se obtuvieron de los escenarios de calcular el valor del índice, con un valor de tolerancia menor al 3 %.

- **Delimitación geográfica**

Para el estudio de los escenarios se utilizó la información de las mediciones de la calidad del producto técnico, que se realizaron en el municipio de Guatemala durante el segundo semestre de 2022, lo cual no limita que el efecto tenga alcance a nivel nacional.

- **Delimitación histórica**

La delimitación histórica se desarrolló para el periodo correspondiente al segundo semestre de 2022, con el fin de conocer cómo fue el comportamiento del índice de desbalance de tensión y su comportamiento una vez se redujo el margen de tolerancia.

4. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justifica en la línea de investigación de regulación a nivel nacional del área de regulación del sector eléctrico, de la Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados. Con esta investigación se aportará en la calidad de energía en la red de distribución de Guatemala, por medio del análisis en la reducción de la tolerancia establecida en las NTSD, para el índice de desbalance de tensión.

El análisis del índice de desbalance de tensión realizado en el municipio de Guatemala podrá ser aplicado en cada uno de los departamentos de la república, ya que las metodologías que fueron seleccionadas para realizar el presente estudio no tienen limitaciones de aplicación. Si en un caso futuro se llegara a realizar un estudio en todo el país, se podrá conocer el comportamiento del desequilibrio de tensión a nivel nacional.

La reducción de la tolerancia para el índice de desbalance de tensión es de beneficio para la población guatemalteca, ya que dicha reducción limita la permisividad de la presencia del desequilibrio de tensión y, por lo tanto, produce un impacto positivo en la calidad de la energía en la red eléctrica de distribución.

Con este trabajo se obtendrán resultados del comportamiento del índice de desbalance de tensión en la red de distribución, así como su impacto técnico en la calidad de energía suministrada al usuario final, una vez se reduzca la tolerancia para dicho índice.

También se analizarán escenarios económicos que resulten de las mediciones que superen la tolerancia. Para este caso se debe tener presente que los montos de indemnización son aplicados a los usuarios afectados, por la presencia del desbalance en la red de distribución.

En Guatemala no se ha realizado una actualización o modificación normativa desde que las normas técnicas vigentes fueron aprobadas. Por tanto, esta investigación es relevante porque podría ser una propuesta de modificación normativa, para el índice de desbalance de tensión en servicios trifásicos.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Determinar el efecto técnico-económico que produce la presencia de desbalance de tensión, al reducir la tolerancia establecida en el artículo 28 de las NTSD, en el municipio de Guatemala.

5.2. Específicos

- Cuantificar las mediciones que resulten dentro y fuera de tolerancia ante los escenarios de valor actual, así como reducción de la tolerancia para el índice de desbalance de tensión.
- Estimar los montos de indemnización para las mediciones que resulten fuera de tolerancia, ante los escenarios de valor actual y reducción de la tolerancia para el índice de desbalance de tensión.
- Comparar los escenarios resultantes de aplicar la metodología de la NTSD y la metodología establecida en la IEC, con sus respectivos valores de tolerancia.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

A partir del presente estudio se evaluará el comportamiento del índice de desbalance de tensión establecido en las NTSD. Debido a la reducción del rango de la tolerancia, se determinará el impacto en la calidad de energía por implementar la metodología establecida en la norma IEC en Guatemala, así como las repercusiones en la penalización por superar la tolerancia en cada escenario. Los resultados que se obtengan serán de utilidad y pueden servir de base para una propuesta de actualización normativa en Guatemala.

Como solución del problema planteado, se analizarán las mediciones de calidad de energía que se realizaron en la red eléctrica de distribución durante el segundo semestre de 2022, en el municipio de Guatemala, en tres escenarios. Se aplicará la metodología vigente en las NTSD con la actual tolerancia, aplicando la metodología vigente en las NTSD, reduciendo el valor de la tolerancia y aplicando la metodología establecida en la norma IEC con su respectivo valor de tolerancia. Los resultados que se obtengan en cada uno de los escenarios se compararán, para determinar el impacto debido a la reducción de la tolerancia y por implementar la norma IEC para el índice de desbalance de voltaje.

La necesidad del análisis del comportamiento del índice de desbalance, utilizando la metodología establecida en la norma IEC 61000-4-30, se debe a que desde la aprobación de las NTSD no se ha realizado modificación o actualización para este. Con base en los resultados que se obtengan en esta investigación, se propondrán recomendaciones para modificación en las NTSD

con enfoque en la mejora de la calidad de energía, en cuanto a la reducción de la presencia de este.

El presente estudio aportará información sobre el error que se comete al aplicar la fórmula de la NTSD, comparado con las fórmulas de las normas IEEE e IEC, lo cual hace viable la implementación de la metodología establecida en la norma IEEE e IEC, en el control del índice de desbalance de tensión.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Redes de distribución

Según la Ley General de Electricidad, el suministro de energía eléctrica que se presta a la población en general es mediante redes de distribución. Por consiguiente, la energía es transportada en niveles de voltaje de media tensión; luego, al llegar a un centro de transformación y mediante transformadores de tipo reductores, se reduce el voltaje a valores de baja tensión, el cual es aprovechado por el usuario final. En el artículo 1 de la Ley General de Electricidad se halla la definición para voltajes en media y baja tensión, cuyos rangos son: menor o equivalente a sesenta mil voltios y mayor a mil voltios, menor o equivalente a mil voltios, respectivamente.

7.2. Sistemas trifásicos equilibrados

Por su topología, la configuración de circuitos puede ser monofásicas, bifásicas o trifásicas. Idealmente se espera que en todos los tramos de red esta sea trifásica y a su vez con cargas equilibradas, pero lo anterior no se cumple en muchas ocasiones, porque las cargas en los circuitos mayormente son de usuarios con contrato de voltaje menor a mil voltios y monofásicos. El hecho de que sean suministros monofásicos hace inevitable que en la red eléctrica se provoque desbalance de cargas, provocado por circuitos monofásicos lineales de longitud considerable o que se sobrecargue más de una fase.

Para evitar que lo anterior resulte en desbalance de corriente y, a su vez, en penalización por la existencia de desbalance de carga en el centro de

transformación, surge la importancia de que cada tramo de red o circuito sea un sistema trifásico y que simultáneamente haya un correcto balance de cargas en cada fase. Una vez se cumpla lo anterior, se tendrá un sistema trifásico equilibrado.

7.3. Ángulo de fase

El ángulo de fase es la fracción de ciclo que transcurre desde que una onda de voltaje pasa por un punto de referencia (Sapiensman, s.f.). El uso común de dicho ángulo es para comparar dos o más tensiones con la misma frecuencia, que pasan por el punto de referencia, pero en diferentes momentos. Este toma importancia al analizar sistemas trifásicos, ya que una de las características para que sea un sistema trifásico equilibrado, es que el valor de ángulo entre los voltajes de fase debe ser aproximadamente 120 grados eléctricos.

7.4. Componentes simétricas

Un sistema trifásico de tensiones sinusoidales de igual frecuencia, es equilibrado si las tensiones de las tres fases tienen el mismo valor eficaz y el desfase temporal entre ellos es de 120 grados (Rodríguez, 2018). El estudio de sistemas trifásicos se realiza mediante el procedimiento de las componentes simétricas, en la cual, la secuencia positiva tiene la misma secuencia de fases que el sistema de partida, la secuencia negativa es opuesta a la del sistema de partida y, la secuencia cero, cuando sus tres tensiones están en fase o son iguales.

7.5. Calidad de energía

La calidad de energía es cuando esta es suministrada con las características y condiciones adecuadas, que permiten mantener continuo el funcionamiento de los equipos y dispositivos, sin afectar el desempeño de estos. (ANDI, 2017)

Derivado de la importancia que ha tomado la energía en la sociedad y el nivel de impacto que provoca en el desarrollo, es importante que en el suministro haya la menor cantidad de interrupciones, que las estructuras estén en condiciones adecuadas y que el nivel de voltaje permanezca por debajo de los límites tolerables. Aquí es donde surge la importancia de normar el servicio eléctrico, cuyo control puede evitar problemas en la calidad de la energía, las cuales podrían provocar el mal funcionamiento de equipos y dispositivos que al final inciden en el desarrollo, bienestar y la economía del usuario final.

Cuando se habla de calidad de energía, el marco regulatorio se refiere a que “el distribuidor tiene la obligación de prestar un servicio de energía eléctrica que cumpla con los índices o indicadores de calidad exigidos en estas normas” (CNEE, 2010, p. 28). Que el usuario perciba energía con las condiciones apropiadas es de suma importancia, puesto que de esta depende el desarrollo en varios aspectos: contar con información confiable, educación de calidad, acceso a la tecnología, acceso a la salud y al desarrollo personal.

Por lo anterior, la calidad de energía en Guatemala se mide a través del “sistema de medición y control de la calidad del servicio eléctrico de distribución mediante indicadores de referencia, que son: regulación de tensión, desbalance de tensión en servicios trifásicos, distorsión armónica y Flicker” (CNEE, 2010, p.

30). El criterio para determinar si la energía es de buena calidad se encuentra establecido en el artículo 28 de las NTSD.

7.6. Control de la calidad de energía

Es primordial tener un control periódico sobre los índices utilizados para saber si la energía se encuentra en condiciones apropiadas, ya que una mala calidad puede causar problemas en cuanto a la correcta marcha de los equipos y dispositivos, que al mismo tiempo afectan el desarrollo y economía del usuario. En ocasiones también puede causar malestar en la población si la mala calidad está presente continuamente.

En Guatemala, el monitoreo de la calidad se lleva a cabo según las NTSD, mediante la metodología para el control de la Calidad del Producto Técnico (CNEE, 2019). La periodicidad de control es de siete días continuos, tiempo en el que se recaba información con un intervalo de 15 minutos entre cada registro, con la cual se calculan los indicadores para determinar el estado de las condiciones de la energía. Para conocer si la energía es de calidad, las NTSD establecen lo siguiente:

Se considera que la energía es de mala calidad cuando en un lapso de tiempo mayor al cinco por ciento, del correspondiente al total del Periodo de Medición, dichas mediciones muestran que el Desbalance de la Tensión ha excedido el rango de tolerancias establecidas. (CNEE, 2019, pp. 19-20)

7.7. Índice de desbalance de tensión

En un sistema de energía trifásico se dice que hay equilibrio si los valores de fase tienen la misma magnitud, y el ángulo entre fases es igual a 120 grados. (Driesen y Craenenbrock, 2014)

Si al menos una de las condiciones anteriores se incumple, el servicio se verá afectado por perturbaciones dinámicas, que producirán variaciones en el sistema trifásico de cualesquiera de las fases con respecto a las otras. (López y Ventura, 2019)

7.7.1. Causas del desequilibrio de tensión

Las causas del desequilibrio de tensión, específicamente en la red de distribución, pueden ser redes monofásicas de longitud considerable o desequilibrio de cargas en centros de transformación, entre otros. “Una de las más importantes es la consecuencia del desequilibrio de cargas monofásicas entre las fases” (Rodríguez, 2015, p. 18).

7.7.2. Metodología

Algunos de los métodos utilizados para el análisis del índice de desbalance de tensión son “mediante la construcción de módulos automatizados con capacidad de control, supervisión y requisición de datos” (Arreaga y Vargas, 2018, p. 36).

A través del método de las componentes simétricas de voltaje, “relacionando la componente de secuencia positiva y la componente de

secuencia negativa dando resultados en tanto por ciento” (Piumetto, Gómez y Vaschetti, 2014, p. 43).

Con base en la metodología vigente en cada país, en este caso específico las NTSD (CNEE, 2010), que son las que controlan la calidad en la red de distribución de Guatemala.

7.7.3. Rango de tolerancia para el índice de desbalance de tensión

Los rangos de tolerancia usados para el control del índice de desbalance de tensión dependen de la norma que se aplica. En servicios de distribución, estos pueden ser de un 2 % (Markiewicz y Klajn, 2004), o de un 3 %. (CNEE, 2010)

7.8. Penalización por presencia de desbalance de tensión en sistemas trifásicos

El desequilibrio de voltaje en la red trifásica es motivo para que el distribuidor responsable de suministrar la energía sea sancionado, según lo que se encuentra establecido en el marco regulatorio. Esto resulta ser un incentivo para que el distribuidor responsable realice acciones para reducir la presencia del desbalance hasta por debajo del límite de tolerancia establecido o, en el mejor de los casos, que no haya presencia del desbalance de voltaje, para evitar las penalizaciones.

Se le conoce como penalización al monto de indemnización que se calcula, toda vez que el distribuidor supere el límite de tolerancia establecido en

las NTSD (CNEE, 2010). Dicho monto de indemnización es en beneficio del usuario afectado.

7.8.1. Tolerancias para el índice de desbalance de tensión

El límite máximo de tolerancia dependerá del país y su normativa vigente. En las normas de Guatemala se encuentra establecido como 3 % el rango de tolerancia para suministros en media y baja tensión. (CNEE, 2010)

En Colombia, el porcentaje de tolerancia establecido para el índice es del 2 %, para suministros con voltajes menores a 69 kV. (ESSA, 2021)

En Chile, el rango establecido en las normas para el desbalance es del 3 %; en Bolivia, la carga repartida entre las tres fases de voltaje no debe permitir un desequilibrio mayor al 10 %. (RCDE, 2002)

7.8.2. Cálculo de la penalización por superar la tolerancia del índice de desbalance de tensión

El cálculo del monto de indemnización debe hacerse para aquellos servicios en donde se compruebe, mediante una medición, que se ha excedido el rango de la tolerancia (CNEE, 2010). En Guatemala, la fórmula para calcular dicho monto se encuentra establecido en el artículo 30 de las NTSD:

$$\text{Indemnización individual} = (D_{pm} + D_{nm}) \times \frac{C_{pm}}{D_{pm}}$$

En donde:

- Dpm: es duración del periodo de medición, en días.
- Dnm: es duración del periodo de tiempo, en días, contado a partir de la finalización del periodo de medición, hasta la finalización de la nueva medición en donde se demuestre que el problema ha sido resuelto.

$$Cpm = \sum_{B=BP} CE_{(B)} * ENE_{(B)} * CENS / 100$$

En donde:

- Cpm: es factor de compensación, en quetzales, determinado para el período de medición.
- $CE_{(B)}$: valorización de la energía en función de la desviación detectada, como porcentaje (%) del CENS, de conformidad con la tabla anterior.
- $\sum_{B=BP} 0$: sumatoria considerando todos los registros a indemnizar
- $ENE_{(B)}$: energía en kWh, registrada durante el periodo de medición. Los distribuidores podrán distribuir la energía registrada en el medidor de facturación con base en una curva típica de consumo correspondiente a su categoría tarifaria.

7.9. Normativa internacional para el cálculo del desbalance

En el proceso de elaboración de una reglamentación sobre calidad de servicio en un sistema de distribución de energía eléctrica, existen distintos parámetros que califican el desempeño de la red, para los cuales deben establecerse valores de referencia que se mencionan a continuación.

7.9.1. Índice de desbalance de tensión acorde a las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)

Mediante la normativa IEC, se calcula el porcentaje de desbalance de tensión mediante la relación de la componente de secuencia negativa y positiva del voltaje de línea. (Casaravilla y Echinope, 2005)

$$u_2 = \frac{U_2}{U_1} * 100$$

7.9.2. Índice de desbalance de tensión acorde a las normas del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE)

La norma IEEE, a diferencia de la norma IEC para la evaluación del índice de desbalance, toma en cuenta los valores de voltaje registrado para cada una de las fases y también la desviación máxima entre estas:

$$U_2 = \max \left[\frac{U_{ij} - U_{media}}{U_{media}} \right] * 100$$

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. Antecedentes

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Redes de distribución

2.2. Sistemas trifásicos equilibrados

2.3. Ángulo de fase

2.4. Componentes simétricas

2.5. Calidad de energía

2.6. Control de la calidad de energía

2.7. Índice de desbalance de tensión

2.7.1. Causas del desequilibrio de tensión

2.7.2. Consecuencias del desequilibrio

2.8. Metodología

2.9. Rango de tolerancia para el índice de desbalance de tensión

- 2.10. Penalización por desbalance de tensión en sistemas trifásicos
 - 2.10.1. Tolerancias para el índice de desbalance de tensión
 - 2.10.2. Cálculo de la penalización por superar la tolerancia del índice de desbalance de tensión
- 2.11. Normativa internacional para el cálculo del desbalance de tensión
 - 2.11.1. Índice de desbalance de tensión acorde a las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)
 - 2.11.2. Índice de desbalance de tensión en acorde a las normas IEEE
 - 2.11.3. De la comparación

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

9. METODOLOGÍA

9.1. Características del estudio

- **Diseño del estudio**

La presente investigación se desarrollará en un diseño preexperimental, debido a la variación que se hará al límite de la tolerancia del índice de desbalance de tensión; se realizará el cálculo del índice con la información obtenida durante el primer semestre de 2022, reduciendo el límite de tolerancia al 2 %. Lo anterior, con el objeto de comparar ambos escenarios y conocer como varía en porcentaje la cantidad de mediciones que superan dicha tolerancia.

- **Enfoque del estudio**

El enfoque de la investigación es mixta. La parte cualitativa del presente estudio se encuentra al agrupar las mediciones de la siguiente manera: mediciones que resulten dentro de tolerancia y mediciones que superan la tolerancia; mediciones con buena calidad de energía y mediciones con mala calidad de energía; mediciones que no serán indemnizadas y mediciones con derecho a indemnización. En la parte cuantitativa se va a realizar el conteo de las mediciones que resulten dentro y sobre la tolerancia.

- Alcance del estudio

El presente estudio tendrá un alcance descriptivo. Tiene el objetivo de determinar el comportamiento técnico y económico que provoca la reducción del límite de tolerancia del índice de desbalance de tensión, en las mediciones de calidad del producto que fueron realizadas durante el primer semestre de 2022.

9.2. Unidades de análisis

La población en estudio será la red eléctrica de distribución en la ciudad de Guatemala, en la cual se analizarán las mediciones de la calidad del producto, realizadas durante el primer semestre de 2022.

9.3. Variables

A continuación, se describen las variables que fueron utilizadas, clasificadas por tipo y su nivel de medición.

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

Variable	Definición teórica	Fuente
Desbalance de tensión	Es la medida del desequilibrio de voltaje existente entre las tensiones de fase en un suministro trifásico.	Se obtendrá de los resultados de las mediciones de calidad del producto realizadas durante el primer semestre de 2022, en el municipio de Guatemala.

Continuación tabla I.

Variable	Definición teórica	Fuente
Monto de indemnización	Cantidad económica, que corresponde al usuario del suministro afectado por desbalance que supera el límite de la tolerancia.	Se calculará mediante la ecuación establecida en el artículo 30 de las NTSD.
Desviación porcentaje de mediciones	Comparación de los resultados del desbalance de tensión, de haber aplicado la fórmula establecida en las NTSD y la norma IEC 61000-4-30.	Se obtendrá de los resultados del índice de desbalance de tensión, calculados mediante las ecuaciones establecidas en la NTSD y la norma IEC 61000-4-30.

Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Word.

Tabla II. **Clasificación de las variables**

Variable	Propiedad	Nivel de medición
Desbalance de tensión [%]	Numérica continua	Razón
Monto de indemnización [Q]	Numérica continua	Razón
Desviación de porcentaje de mediciones [%]	Numérica continua	Razón

Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Word.

9.4. Fases del estudio

A continuación, se describen las cinco fases de estudio para la investigación.

9.4.1. Fase uno: revisión bibliográfica

Con base en el tema de investigación, se procederá a la consulta de normas nacionales, internacionales, artículos científicos y fuentes bibliográficas que traten sobre el cálculo del desbalance de tensión, las fórmulas utilizadas y límites de tolerancia establecidos en su aplicación como índice. Esta exploración bibliográfica servirá de sustento para las secciones de antecedentes y marco teórico.

9.4.2. Fase dos: gestión de la información

En esta fase se solicitará a la CNEE la información de las mediciones de la calidad del producto técnico de enero a junio de 2022, que fueron realizados en el municipio de Guatemala.

9.4.3. Fase tres: análisis del índice de desbalance de tensión con base en las NTSD

Se hará el análisis de los resultados que se obtengan al aplicar la variable desbalance de tensión, y calcular el índice de desbalance de tensión con base en la ecuación establecida en el artículo 27 de las NTSD, aplicando los límites de tolerancia 3 % y 2 %.

9.4.4. Fase cuatro: análisis del comportamiento de los montos de indemnización

En esta fase se procederá al análisis e interpretación de los resultados de los montos de indemnización. Serán calculados en las mediciones que superen los límites de tolerancia del 3 % y 2 %, para determinar el comportamiento del monto de indemnización resultante en cada uno de los escenarios.

9.4.5. Fase cinco: análisis del comportamiento del índice de desbalance de tensión con base en la norma IEC

Se procederá a calcular el índice de desbalance de tensión, aplicando la ecuación establecida en la norma IEC 61000-4-30, y se comparará el resultado obtenido mediante esta; con el resultado obtenido en la fase tres del presente estudio, se realizará el análisis y con base en ese resultado se determinará la viabilidad de la propuesta de cambio normativo.

9.5. Resultados esperados

A continuación, se describen los resultados esperados de la investigación con base en las fases de estudios y objetivos planteados.

- Resultado general

Con base en el estudio técnico y económico del índice de desbalance de tensión, se pretende demostrar las ventajas de mejora en la calidad de energía, de reducir el límite de tolerancia al 2 %, y las ventajas de calcular dicho índice al

utilizar las componentes de secuencia positiva y negativa de voltaje, según la ecuación establecida en la norma IEC 61000-4-30.

- Resultados específicos
 - Determinar el impacto técnico en la calidad de energía, que se produce al reducir el límite de la tolerancia al 2 % para el índice de desbalance de tensión, con base en la cantidad de mediciones que superan dicha tolerancia.
 - Obtener el monto total de indemnización económica, derivado de la cantidad de mediciones que superen la tolerancia del índice de desbalance de tensión en cada uno de los escenarios.
 - Determinar si la implementación de la ecuación establecida en la norma IEC 61000-4-30, tiene impacto de mejora en la calidad de energía, comparado con los resultados que se obtienen a través de la metodología establecida en las NTSD.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Se procederá a solicitar la información correspondiente a las mediciones de la calidad del producto, que fueron realizadas durante el primer semestre de 2022 en el municipio de Guatemala. Se realizará la evaluación del índice de desbalance de tensión y con base en los resultados y mediante estadística descriptiva; se elaborarán histogramas de mediciones validas y cortas, de cantidad de mediciones que superan la tolerancia y de montos de indemnización. Así mismo, se emplearán diferentes técnicas para lograr un mejor manejo de la información.

Considerando la fase tres, se procederá a preparar la información obtenida, que consistirá en verificar el formato de la información; el estado de cada uno de los registros, si la medición es válida o corta, y posterior a esto se realizará el procesado de la información. A continuación, se detalla cada una de las etapas:

- Se hará depuración de la información obtenida, mediante la cual se determinará que información podrá ser procesada. La depuración consistirá en descartar todas aquellas que no cuentan con el formato requerido para cada uno de los parámetros que serán objeto de análisis.
- Con base en una tabla, se desarrollará una herramienta de análisis automatizada por medio de Excel, mediante el cual serán analizados cada uno de los registros de la medición con base en los criterios establecidos en la metodología CNEE 38-2003, para determinar si cada uno de estos son válidos o no.

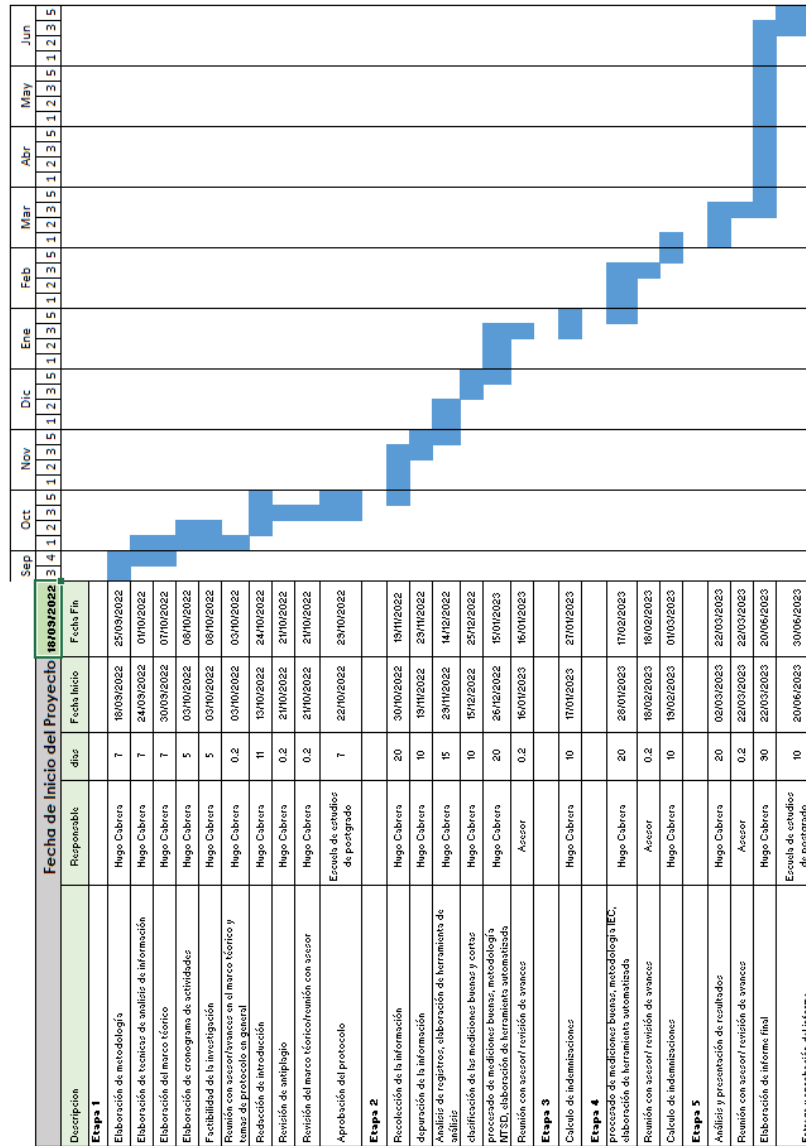
- Mediante una lista de cotejo, diseñada con base en lo establecido en la metodología CNEE 38-2003, se clasificará cualitativamente el estado de las mediciones; si estas son buenas o cortas (una medición se catalogará como buena si al momento de procesarla no muestra problemas, esto según artículo 10 de la metodología, para este caso específico serán las mediciones con 576 o más registros validos).
- Se desarrollará un procesador de datos en Excel, para calcular el índice de desbalance de tensión, utilizando funciones automatizadas y de Visual Basic en Excel, para los escenarios: con límite de tolerancia 3 % y límite de tolerancia 2 %.

Para la fase cuatro se utilizará la herramienta lista de cotejo, para llevar un control de las mediciones que resulten dentro de tolerancia y sobre la tolerancia en cada uno de los escenarios. Servirá para proceder al cálculo de los montos de indemnización en las mediciones que superen la tolerancia.

Fase cinco: con base en los resultados que se obtengan, se procederá a desarrollar una matriz de comparación; mediante una escala de calificación, se procederá al análisis del impacto de la norma IEC 61000-4-30 en las condiciones actuales red de distribución en el municipio de Guatemala. Con el resultado del análisis se conocerá si las mediciones que superan la tolerancia disminuyen, aumentan o permanecen en igual cantidad.

11. CRONOGRAMA

Figura 2. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Project.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para la ejecución del presente estudio de investigación, a continuación se describen los recursos necesarios.

12.1. Recurso humano

Se requiere del trabajo del estudiante de la maestría, con el apoyo del asesor de la tesis.

12.2. Acceso a la información

La información técnica necesaria para el estudio es remitida por los distribuidores a la CNEE. Para tener el acceso a la misma, será solicitada al regulador por medio de la vía correspondiente.

12.3. Equipo de cómputo y recurso informático

Se cuenta con el equipo de cómputo adecuado, así como con el *software* necesario para realizar el procesado de la información y redactar el informe final correspondiente.

12.4. Fuentes de financiamiento

Financiamiento propio.

Tabla III. **Recursos financieros**

Recurso	Costo estimado	Fuente de financiamiento
Honorarios del estudiante	Q 3,000.00	
Honorarios del asesor	Q 3,000.00	
Papel	Q 36.00	
Impresión de documento	Q 300.00	Por parte del estudiante
Internet	Q 120.00	
Energía eléctrica	Q 250.00	
Subtotal	Q 6,706.00	
Aporte del asesor	-Q 3,000.00	Por parte del asesor
Aportes honorarios del estudiante	-Q 3,000.00	Por parte del estudiante
Total	Q 706.00	Por parte del estudiante

Fuente: elaboración propia, hecho con Microsoft Word.

Para el desarrollo de esta investigación se necesita un total de Q 706.00, cantidad que será aportada por el investigador. El trabajo es factible de hacer.

13. REFERENCIAS

1. Arreaga, J. y Vargas, C. (2018). *Análisis de cargas balanceadas y/o desbalanceadas usando el banco de pruebas para circuitos electricos de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil* (tesis de licenciatura). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Recuperado de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17012>
2. Asociación Nacional de Industriales de Honduras (ANDI) (2017). *Calidad de la Energía Eléctrica*. Honduras: Autor. Recuperado de http://www.andi.hn/wp-content/uploads/2014/11/3-Calidad-de-la-Energ+%c2%a1a_sn.pdf
3. Autoridad de Fiscalización de Electricidad y Tecnología Nuclear (AETN) (2002). *Reglamento de Calidad de Distribución de Electricidad (RCDE)*. Bolivia: Autor. Recuperado de <https://www.aetn.gob.bo/web/main?mid=1&cid=55>
4. Casaravilla, G. y Echinope, V. (2005). *Desbalances: Estudio de alternativas para su estimación*. Montevideo, Uruguay: Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, EPIM 05. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12008/21167>

5. Comisión Nacional de Energía (CNE) (2019). *Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2019/12/Norma-T%C3%A9cnica-de-Calidad-de-Servicio-para-Sistemas-de-Distribuci%C3%B3n.pdf>
6. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) (2010). *Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD)*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/Recopilacion%20normas%20tecnicas%20CNEE.pdf>
7. Sapiensman (s.f.). Corriente alternada. Fase, ángulo de fase y diferencia de fase [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://www.sapiensman.com/electrotecnia/problemas22.htm>
8. Decreto No. 93-96. Ley General de Electricidad. Guatemala. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. 15 de noviembre de 1996.
9. Driesen, J. y Craenenbrock, T. (23 de julio, 2014). Desequilibrios de tensión [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://e-management.mx/2014/07/23/desequilibrio-de-tension/>
10. Electrificadora de Santander, S. A. (ESSA) (octubre, 2021). Normas técnicas especiales 03 (NTE-03). *Grupo EPM*, 1, 1-25. Recuperado de <https://www.essa.com.co/site/Portals/proveedores/n-te-03%20calidad%20de%20potencia.pdf?ver=2022-07-19-142106-690>

11. García, S. (2019). *Análisis de desequilibrios en transformadores y máquinas de inducción trifásicos* (tesis de doctorado). Universitat Rovira I Virgili, Ciudades Catalanas de Tarragona y Reus, España. Recuperado de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/668353/TESt.pdf?sequence=1>
12. López, J. y Ventura, E. (2019). *Estudio del desbalance de tensiones y sus efectos en la calidad el 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>
13. Markiewicz, H. y Klajn, A. (Junio, 2004). Guia de Calidad de energía. *Leonardo Power Quality Initiative*, 1, 1-12. Recuperado de <https://docplayer.es/21742609-Guia-de-calidad-de-la-energia-electrica.html>
14. Piumetto, M., Gómez, J., y Vaschetti, J. (Febrero, 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://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000400012>

15. Quispe, E. (2017). *Efectos del desequilibrio de tensiones sobre la operación del motor de inducción trifásico: énfasis en la caracterización del desequilibrio de tensiones y el efecto sobre la potencia nominal* (tesis de doctorado). Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia. Recuperado de <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/10287>
16. Quispe, E. y Gómez, J. (Octubre, 2020). Desequilibrio de tensiones en motores de inducción. *Programa editorial Universidad Autónoma de Occidente*, 29-51. Recuperado de <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/13368/Desequilibrio%20de%20Tensiones%20en%20motores%20de%20inducci%C3%B3n.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
17. Rodríguez, E. (2015). *Análisis del desequilibrio de distribución en baja tensión* (tesis de licenciatura). Universidad de Sevilla, España. Recuperado de https://fama.us.es/discovery/fulldisplay?docid=alma991012270509704987&context=L&vid=34CUBA_US:VU1&lang=es&search_scope=all_data_not_idus&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=all_data_not_idus&query=any,contains,desequilibrios%20de%20distribuci%C3%B3n
18. Suriel, S. (2018). *Impacto de la generación distribuida en redes de media tensión desequilibradas* (tesis de maestría). Universidad de Sevilla, España. Recuperado de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/71209/fichero/TFM-1209-SURIEL.pdf>