

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**ESTUDIO DEL DESBALANCE DE TENSIONES Y SUS
EFECTOS EN LA CALIDAD DEL PRODUCTO TÉCNICO
PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN A NIVEL
INDUSTRIAL**

PRESENTADO POR:

JOSÉ RENE LÓPEZ BELTRÁN

ELVIA NAIROBI VENTURA GÁMEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO 2019

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

MSC. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**ESTUDIO DEL DESBALANCE DE TENSIONES Y SUS
EFECTOS EN LA CALIDAD DEL PRODUCTO TÉCNICO
PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN A NIVEL
INDUSTRIAL**

Presentado por:

JOSÉ RENE LÓPEZ BELTRÁN

ELVIA NAIROBI VENTURA GÁMEZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

SAN SALVADOR, ENERO 2019

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, viernes 14 de diciembre de 2018, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 3:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director


Firma

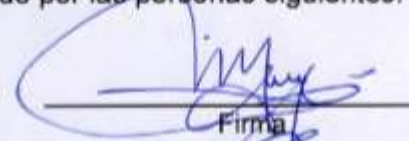
2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma

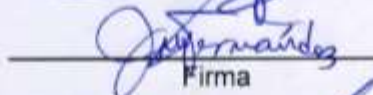


Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

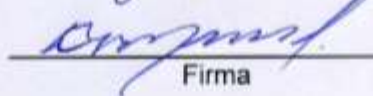
- ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN
(Docente Asesor)


Firma

- ING. JOSE MIGUEL HERNANDEZ


Firma

- ING. WERNER DAVID MELENDEZ VALLE


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

ESTUDIO DEL DESBALANCE DE TENSIONES Y SUS EFECTOS EN LA CALIDAD DEL PRODUCTO TÉCNICO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN A NIVEL INDUSTRIAL

A cargo de los Bachilleres:

- LÓPEZ BELTRÁN JOSÉ RENÉ

- VENTURA GAMEZ ELVIA NAIROBI

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 9.2

(nueve punto dos)

DEDICATORIA.

Esta tesis se ha desarrollado gracias al apoyo de muchas personas, pero sobre todo al esfuerzo y dedicación de cada integrante de esta investigación.

Doy gracias a Dios por finalizar este trabajo, a nuestro asesor por la paciencia y dedicación de transmitirnos su conocimiento.

Espero que este trabajo sea una base para futuros trabajos de investigación, que contribuya a desarrollar y a mejorar los sistemas eléctricos de nuestro país para ser partícipes de los avances tecnológicos que podemos ofrecer como ingenieros electricistas. Solo quiero finalizar con esta frase:

“No hay que vivir en el pasado, hay que vivir el presente y preocuparse por el futuro, por eso tres palabras básica rigen mi vida, Confiar, Ayudar y Amar, porque solo así podrás realizar tus metas confiando en ti, ayudando a los demás, y amando lo que haces, lo que das y lo que recibes”. (Nairobi Ventura).

Primeramente quiero dar gracias a Dios por permitirnos llegar a este punto, donde nos encontramos a pocos pasos para finalizar el proceso para obtener el título de Ingeniero Electricista, reconociendo que sin él no somos capaces de llevar a cabo nuestros objetivos, por supuesto también quiero dar gracias a todas las personas que han hecho posible culminar este objetivo, mis padres, y demás familiares, amigos y compañeros de universidad que de alguna forma han sido apoyo en este proceso y un muy especial agradecimiento a mi compañera de tesis, porque junto a ella hemos logrado llevar a cabo el desarrollo de esta etapa final, también quiero agradecer y decir que me llena de orgullo haber sido instruidos por nuestro asesor quien siempre nos mostró su apoyo hasta el final de este proceso, y reconocemos todo el mérito que se merece por todo el conocimiento que ha compartido con nosotros. (Rene Beltrán).

Para encontrar los secretos del universo piensa en términos de Energía, Frecuencia y Vibración. (Nikola Tesla)

PREFACIO

La calidad del servicio de suministro de energía eléctrica soporta y apunta la vitalidad comercial, industrial y social de los países, por eso es necesario medir parámetros que indiquen la calidad de la energía según el producto técnico suministrado el cual considera indicadores tales como: Niveles de tensión, Perturbaciones en la onda de Tensión (Flicker y tensiones armónicas), esto según normativa vigente en El Salvador.

La mayoría de las redes industriales son trifásicas, donde las perturbaciones dinámicas y las que están en régimen de estado estable producen variaciones en los niveles de tensión (de una fase respecto de las demás), que se denominan “desbalance de tensiones” o “desequilibrio de tensiones”.

El grado de desbalance de las tensiones no se encuentra acotado por ninguna reglamentación vigente nacional, desde un punto de vista técnico este modo de operación es inconveniente principalmente para motores eléctricos.

El objeto del presente trabajo es determinar cuál es el grado de desbalance en algunas redes de los sistemas de distribución eléctrica, para evaluar el afecto sobre la calidad del producto técnico (tensión) de dicho sistema. Se cuantificará el desbalance a través de mediciones en sitios de interés, siguiendo procedimientos dados en normas IEEE e IEC.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS	14
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
ALCANCES	16
ANTECEDENTES	17
JUSTIFICACIÓN	21
CAPITULO UNO: CALIDAD DE ENERGÍA EN EL PRODUCTO TÉCNICO	22
1.1 CALIDAD DE ENERGÍA	22
1.2 DEFINICIONES DE CALIDAD SEGÚN NORMATIVA	22
1.3 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.....	24
1.4 BENEFICIOS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.	24
1.5 PARÁMETROS QUE INCLUYE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.	25
2. CAPITULO DOS: NORMATIVA SALVADOREÑA E INTERNACIONALES RELACIONADAS A LA CALIDAD DE ENERGÍA Y PRODUCTO TÉCNICO.	26
2.1 GENERALIDADES	26
2.2 NORMAS DE CALIDAD DEL SERVICIO DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	27
2.3 ESTRUCTURAS DE LA NORMATIVA DE CALIDAD EN EL SALVADOR	27
2.4 ELEMENTOS DEL CONTROL DE CALIDAD DEL SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	28
2.5 CALIDAD DEL PRODUCTO TÉCNICO.	29
2.6 RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL PRODUCTO TÉCNICO.	39
3. CAPITULO TRES: DESBALANCE DE TENSIONES.	41
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE TENSIONES	41
3.2 FACTOR DE DESEQUILIBRIO EN EL MÉTODO DE LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS	43
3.3 DEFINICIONES DE DESEQUILIBRIO DE TENSÓN DADAS POR LAS NORMAS INTERNACIONALES	44
3.4 EFECTOS Y CONSECUENCIAS DEL DESBALANCE DE TENSIONES	46
4. CAPITULO CUATRO: ESTUDIO DE CASO SOBRE DESBALANCE DE TENSIONES	53
4.1 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	53

4.2	APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE SERIES DE TIEMPO A LOS DATOS DE DESBALANCE DE TENSIONES	62
4.3	ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE SERIES DE TIEMPO	72
4.4	MODELO Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO SELECCIONADO	73
4.5	EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL DESBALANCE DE TENSIONES.....	77
5.	CAPITULO CINCO: RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES	79
5.1	RECOMENDACIONES PARA MEDICIONES Y CONTROL DEL DESBALANCE DE TENSIONES.	79
5.2	CONCLUSIONES.....	81
	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	83

CONTENIDO DE FIGURAS

<i>Figura 1. Distribución estimada de la demanda global de energía eléctrica por sector económico</i>	17
<i>Figura 2. Distribución estimada de la demanda global de energía eléctrica por usuario.</i>	18
<i>Figura 3. Desequilibrio de Tensiones en el sistema de distribución de USA.</i>	19
<i>Figura 4. Distribuidoras a nivel nacional.</i>	26
<i>Figura 5. Nivel de Frecuencia Nominal.</i>	31
<i>Figura 6. Onda senoidal con un desequilibrio al 5% de la tensión.</i>	41
<i>Figura 7. Onda senoidal con un desequilibrio de tensiones al 10%.</i>	42
<i>Figura 8. Redimensionamiento para motores sobre el desbalance según el Estándar Nema MG1</i>	47
<i>Figura 9. Características de velocidad de par de una máquina de inducción.</i>	48
<i>Figura 10. Factor de reducción de acuerdo con el factor de tensión armónica</i>	50
<i>Figura 11. Gráfico comportamiento Tendencia</i>	54
<i>Figura 12. Gráfico comportamiento Estacional</i>	54
<i>Figura 13. Gráfico comportamiento Cíclico</i>	55
<i>Figura 14. Gráfico comportamiento Irregular</i>	55
<i>Figura 15. Gráfico Modelo Aditivo</i>	56
<i>Figura 16. Gráfico Modelo Multiplicativo</i>	56
<i>Figura 17. Diagrama de caja y sus elementos.</i>	61
<i>Figura 18. Gráfica de serie de tiempo del desbalance de voltaje según IEEE</i>	62
<i>Figura 19. Gráfica de serie de tiempo del desbalance de Tensiones según IEC</i>	63
<i>Figura 20. Histograma del desbalance de voltaje según norma IEEE</i>	63
<i>Figura 21. Histograma del desbalance de Tensiones según norma IEC</i>	64
<i>Figura 22. Gráfica de Cajas para el Desbalance de Tensión según normas IEEE e IEC.</i>	66
<i>Figura 23. Tendencia Lineal para IEEE.</i>	67
<i>Figura 24. Tendencia Lineal para IEC.</i>	67
<i>Figura 25. Tendencia Cuadrática para IEEE</i>	68
<i>Figura 26. Tendencia Cuadrática para IEC</i>	68
<i>Figura 27. Tendencia Exponencial para IEEE</i>	69
<i>Figura 28. Tendencia Exponencial para IEC</i>	69
<i>Figura 29. Media Móvil para IEEE</i>	70
<i>Figura 30. Media Móvil para IEC</i>	70
<i>Figura 31. Suavizamiento Exponencial simple para IEEE</i>	71
<i>Figura 32. Suavizamiento Exponencial.</i>	71
<i>Figura 33. Factor de reducción media de potencia del motor debido al desbalance de Tensiones.</i>	74
<i>Figura 34. Modelado de Motor de Inducción en Matlab.</i>	76

CONTENIDO DE TABLAS

<i>Tabla 1. Niveles de Tensión Norma ANSI C.84.1</i>	29
<i>Tabla 2. Niveles de Tensión Norma IEC</i>	29
<i>Tabla 3. Niveles de Tensión según SIGET</i>	30
<i>Tabla 4. Límites Permisibles de Regulación de Tensiones</i>	30
<i>Tabla 5. Niveles de Tensión en MT y BT en EL Salvador</i>	30
<i>Tabla 6. Límites para Flicker generado por el usuario</i>	33
<i>Tabla 7. Límites de distorsión armónica de Tensión en redes de media y baja tensión.</i>	35
<i>Tabla 8. Límites de distorsión armónica de la corriente de carga en media y baja tensión.</i>	35
<i>Tabla 9. Valores permisibles de factor de potencia</i>	36
<i>Tabla 10. Desbalance de Tensiones a Nivel Mundial</i>	37
<i>Tabla 11. Niveles de Desbalance a nivel Centroamericano</i>	38
<i>Tabla 12. Comparación entre Parámetros de calidad de las diferentes normas.</i>	40
<i>Tabla 13. Estadística descriptiva para el Desbalance de Tensiones (valores en %)</i>	64
<i>Tabla 14. Distribución datos del Desbalance de Tensiones</i>	65
<i>Tabla 15. Medidas de posición y orden para el Desbalance de Tensiones (valores en %).</i>	65
<i>Tabla 16. Resumen Indicadores de Modelos de Series de Tiempo para IEEE</i>	72
<i>Tabla 17. Resumen Indicadores de Modelos de Series de Tiempo para IEC.</i>	72
<i>Tabla 18. Estimación del Desbalance de Tensiones. (IEEE)</i>	73
<i>Tabla 19. Estimación del Desbalance de Tensiones (IEC)</i>	73
<i>Tabla 20. Evaluación de la reducción de Potencia Media del motor debido al Desbalance de tensiones...</i> 74	
<i>Tabla 21. Evaluación del Derating factor para las estimaciones de Desbalance de Tensiones.</i>	75
<i>Tabla 22. Perdida de potencia para el modelo seleccionado.</i>	76
<i>Tabla 23. Calculo de costos de operación neto por Desbalance de Tensiones.</i>	78
<i>Tabla 24. Incremento de Costo por Desbalance de Tensiones.</i>	78

INTRODUCCIÓN

Existen muchas definiciones de calidad de energía, dependiendo del punto de vista del autor. Una definición sencilla aceptada por el cliente es que la calidad de energía es buena si los dispositivos conectados al sistema eléctrico funcionan satisfactoriamente.

La calidad de la energía suministrada se establece mediante los siguientes criterios:

- Disponibilidad del suministro, tolerancias de tensión dentro de los límites permitidos y debe presentar un perfil de onda sinodal libre de perturbaciones.
- El buen o mal funcionamiento de la carga eléctrica dependerá de las aplicaciones y del tipo de equipo que se tenga instalado.
- Cualquier desviación de los estándares de calidad que ocasione mal funcionamiento y daño en los equipos eléctricos establece un suministro de mala calidad de energía.

Las carencias en calidad de energía generan un creciente número de problemas, que se traducen en pérdidas económicas significativas a los propietarios de bienes de producción.

En El Salvador existe un ente regulador llamado SIGET¹, que se encarga de exigir una buena calidad de energía a las distribuidoras, este ente regulador monitorea que las distribuidoras del país cumplan con lo establecido en la normativa de calidad de servicio de los sistemas de distribución.

De acuerdo a la normativa se analiza que un parámetro muy importante en el producto técnico servido se deja fuera de la regulación como lo es el desbalance de tensiones, no existe un reglamento que regule las variaciones de este parámetro de calidad de producto. A nivel industrial en sistemas trifásicos surge la necesidad de analizar las diferentes normas internacionales que regulen esta variable, de acuerdo a los cálculos, y límites permisibles.

Es por eso por lo que se realizará una comparación de normas y estándares nacionales e internacionales para obtener lineamientos que permiten ver con

¹ Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones.

certeza las deficiencias y aportes de la calidad del producto técnico suministrado por el distribuidor.

Se utiliza como caso estudio un alimentador de una empresa donde se tomaron registros de voltaje de línea, en la barra principal con tiempo de muestreo de 10 minutos, durante 7 días, y de acuerdo a estos datos, se calcula el desbalance de tensión (Unbalance Voltage) de acuerdo a las norma IEEE 1159-1995, NEMA MG1 y la IEC 61000-4-30, entre otras. Donde estos valores obtenidos se analizarán y se hará una comparación para ver las diferencias que existen entre los diferentes métodos planteados por cada una de las normativas antes mencionadas, además se verificará si los valores obtenidos se encuentran dentro de los valores admisibles por cada una de las normas. Posteriormente se realizará un proceso estadístico utilizando las series de tiempo para linealizar los datos de desbalance de tensiones, las normas IEEE 1159-1995 y la NEMA MG1 utilizan métodos bastante similares para el cálculo de porcentaje de desbalance considerando ambos solo las magnitudes pero con distintas referencias, la norma IEC 61000-4-30, utiliza un método más completo para el análisis de datos.

Por otra parte se muestran y comparan los resultados para los distintos modelos estadísticos y se discute la información de éstos para el estudio de calidad de energía. Finalmente, utilizando el modelo que mejor se ajusta al desbalance de voltaje se muestran algunas predicciones según las normas IEEE e IEC.

Además se describirán los efectos y causas del desbalance de tensiones (Unbalance Voltage) en sistemas trifásicos, también los efectos de otros parámetros de otros parámetros como el Flicker y armónicos que están relacionados con el desbalances de tensiones.

OBJETIVOS

❖ OBJETIVO GENERAL:

Evaluar los parámetros de calidad de los sistemas de distribución nacional con el propósito de establecer límites y deficiencias que la normativa presenta sobre el desbalance de tensiones, así mismo establecer límites de cumplimiento para las distribuidoras y consumidores finales según indicadores para definir un buen servicio de energía eléctrica.

❖ OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Definir los conceptos de Calidad de Producto Técnico como, Desbalance de tensión, interrupciones, Armónicos Flicker y Factor de potencia.
- ✓ Estudiar el efecto del desbalance de tensión en los motores e instalaciones de baja tensión.
- ✓ Analizar el impacto de los problemas en la red de potencia que inciden en los procesos y parámetros de calidad con respecto al desbalance.
- ✓ Proponer recomendaciones y procedimientos mediante el sistema de medición y control de la calidad.
- ✓ Identificar transgresiones a las tolerancias permitidas respecto a los parámetros establecidos por la calidad del producto técnico suministrado.
- ✓ Estudiar los aspectos del servicio técnico en función de la continuidad del suministro de energía eléctrica a los usuarios.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El creciente interés del estudio de la calidad de la energía o de la también llamada compatibilidad electromagnética en el suministro de la energía eléctrica se ve reflejado en las exigencias de los clientes y en la problemática operativa de las redes eléctricas, sin embargo, ante esta realidad es conveniente citar los siguientes cuestionamientos:

- ✚ ¿Quiénes son los más afectados en términos de desbalances de tensiones?

- ✚ ¿Cómo evaluar la calidad del producto entregable?,

- ✚ ¿Se está en condiciones a nivel de red eléctrica no tomar en cuenta este parámetro?

- ✚ ¿Es posible alguna reforma en el reglamento para tomar en cuenta el desbalance de tensiones?

- ✚ ¿Económicamente al no tener una regulación de límites permisibles de desbalance quienes son los más afectados?

Las respuestas planteadas no son absolutas y determinantes, más bien es el inicio de un proyecto de investigación continua, de reglamento y estándares para establecer parámetros de importancia, además de ello determinar el grado de sensibilidad de las empresas distribuidoras que presentan ante esta problemática y cuáles son sus puntos de vista y opciones ante una propuesta de modificación de algunos artículos en la norma actual, de tal manera que se implementen mejores estándares de calidad de la energía.

ALCANCES

Establecer parámetros que nos permitan desde el punto de vista de ingeniería conocer los efectos que el desbalance provoca en instalaciones eléctrica, motores y equipos de uso industrial, además otros parámetros que estudia la calidad del producto técnico.

Se pretende obtener descargas de datos que nos permitan establecer y mostrar que el desbalance de tensión es un factor importante que debe tenerse en cuenta en la normativa vigente de El Salvador con respecto a los índices de calidad de energía.

Con la perspectiva de competencia y mejora continua es necesario entender los requerimientos de los clientes y en conjunto tener las mismas perspectivas en torno a la calidad de suministro eléctrico, y así definir estándares y características del producto que son indispensable.

Usar la información para minimizar el impacto de los distintos fenómenos que se presenta en la red eléctrica.

ANTECEDENTES

En El Salvador año con año se está tomando conciencia sobre La Calidad de la Energía Eléctrica. En la actualidad el consumo de energía eléctrica crece de forma considerable debido al desarrollo de nuevas tecnologías que están transformando la sociedad en general, lo que aumenta continuamente la productividad. Históricamente este desarrollo tecnológico va ligado indispensablemente con el uso de la energía eléctrica, siendo cada vez más alto el porcentaje de uso.

En la actualidad, la competitividad de un mundo globalizado exige cada vez mejores productos, el sector eléctrico no es ajeno ante esta realidad. La industria ve a la energía eléctrica como uno de sus insumos vitales e importantes para su proceso productivo además muchos de los equipos industriales demandan que este insumo sea estable y de calidad en base a los lineamientos establecidos por las normas.

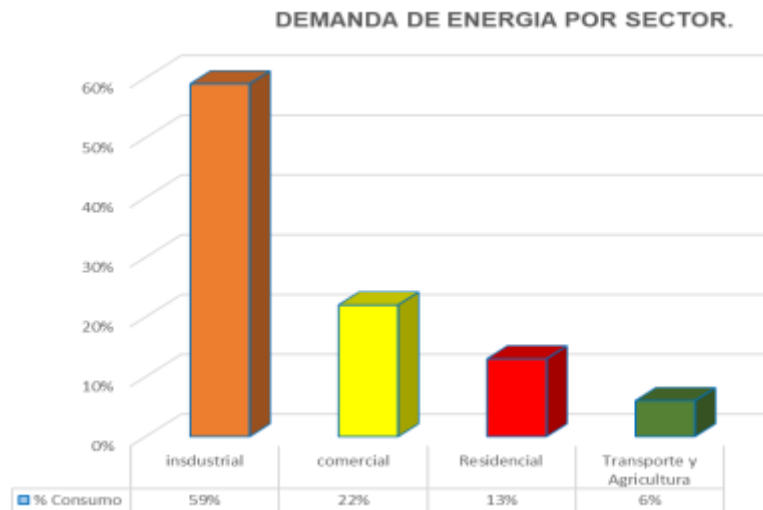


Figura 1. Distribución estimada de la demanda global de energía eléctrica por sector económico

Como tal, este insumo debe de estar sujeto a requerimientos de control de calidad, confiabilidad en el suministro, etc. A estos requerimientos les llamamos “CALIDAD DE LA ENERGÍA”.

El motor trifásico de inducción es el motor eléctrico de mayor aplicación mundial tanto en la industria, el comercio y prácticamente en cualquier sector donde se

necesite un motor eléctrico. En la figura 2 se puede observar que los motores a nivel mundial son los que más energía demandan para los procesos industriales.

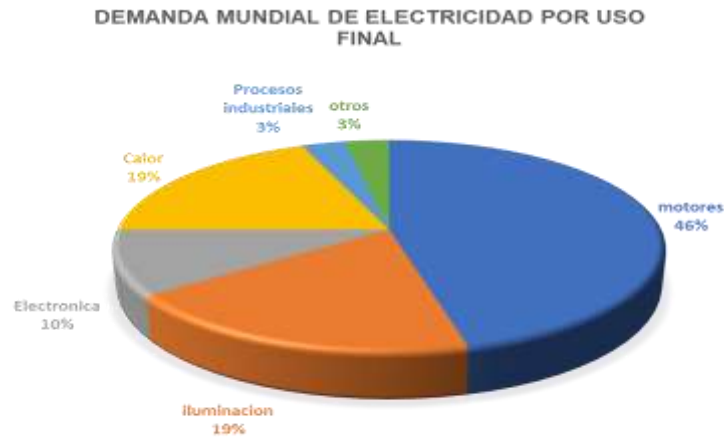


Figura 2. Distribución estimada de la demanda global de energía eléctrica por usuario.

Estas máquinas son diseñadas y fabricadas para operar en las condiciones especificadas en la placa de características, llamadas condiciones nominales, cuando son alimentados con un sistema trifásico simétrico de tensiones de forma de onda sinusoidal y de magnitud igual a la tensión nominal.

Los sistemas de generación de energía eléctrica producen tensiones trifásicas sinusoidales, de igual magnitud y desfasadas en el tiempo 120° , por lo que pueden representarse por tres fasores de tensión de igual magnitud y desfasados 120° entre sí, que matemáticamente constituyen un sistema trifásico simétrico.

Sin embargo luego del proceso de transporte y distribución de la energía las tensiones que llegan a los puntos de utilización en los sistemas eléctricos son desequilibradas.

Un sistema trifásico de tensiones esta desequilibrado cuando tiene magnitudes de fase o de línea diferentes a la frecuencia nominal del sistema, los ángulos de desfase entre las tensiones son de diferente magnitud, y presentan diferentes niveles de distorsión armónica entre las fases.

El problema del desequilibrio de tensiones puede ser muy difícil de compensar porque varía continuamente debido a la variación de las cargas.

Para cuantificar desequilibrio de tensiones las normas han definido índices para caracterizar grado de desequilibrio y éstos son actualmente usados en la industria. Un estudio realizado el año 2000 sobre el desequilibrio de tensión en el sistema de distribución de USA realizado por el Electric Power Research Institute² y luego publicado por la Norma ANSI³, reportó que aproximadamente el 66% del sistema de distribución eléctrico de USA tiene un porcentaje de desequilibrio de tensión (Porcent Voltage Unbalance PVU) menor a 1%, el 98% del sistema de distribución tiene un porcentaje de desequilibrio de tensión menor a 3 % y cerca del 2% del sistema de distribución de USA tiene un porcentaje de desequilibrio de tensión mayor al 3%, ver Figura 3.

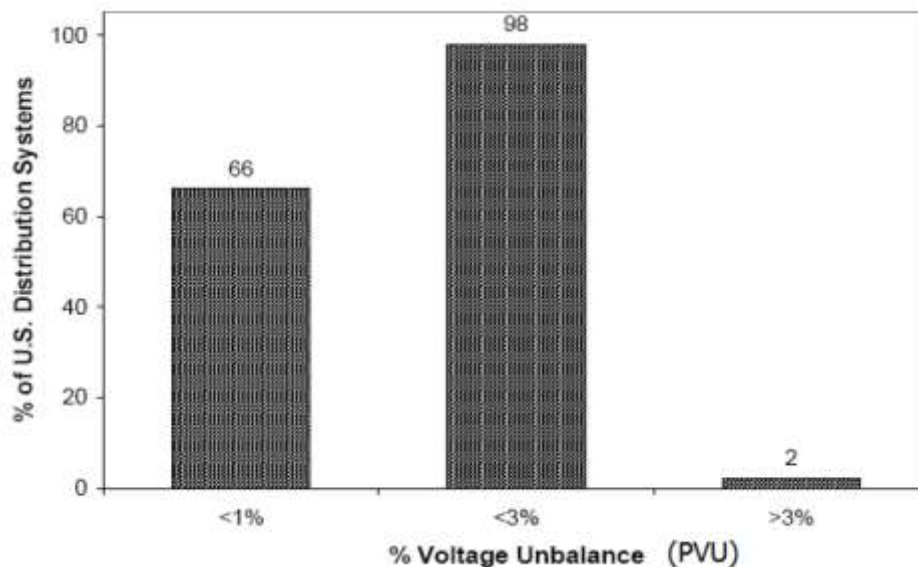


Figura 3. Desequilibrio de Tensiones en el sistema de distribución de USA.

Los efectos negativos creados por el desequilibrio de tensión sobre la operación del motor de inducción afectan los costos del proceso productivo y de allí la importancia de cuantificar esos efectos. Los sistemas accionados con motores eléctricos de inducción consumen entre el 60 y 68 % de la energía eléctrica usada en los procesos industriales y comerciales

² EPRI: instituto que realiza investigaciones sobre temas de interés de la industria de la energía eléctrica en Estados Unidos.

³ ANSI: Instituto Nacional Estadounidense de Estándares, es una organización que supervisa el desarrollo de estándares para productos, servicios, procesos y sistemas en los Estados Unidos.

Así, los estudios de campo comprueban que el desequilibrio de tensión es uno de los fenómenos de la calidad de la potencia eléctrica que se presentan con mayor frecuencia en las instalaciones eléctricas y por lo tanto el interés en su estudio se mantiene vigente.

El desgaste que sufren los equipos, la mala operación y funcionamiento de estos se ven afectados debido a la problemática que existe sobre desbalances de energía, provocados por diferencias de tensión, corriente o frecuencia.

Las normativas relacionadas a la calidad de la energía nos brindan un requerimiento mínimo en cuanto a los porcentajes máximo de desbalance que debe presentar la red.

El mensaje es claro: si tiene una red trifásica y no ha tomado las medidas para asegurar tensiones equilibradas, tiene grandes oportunidades de mejorar la eficiencia de sus máquinas corrigiendo este efecto.

JUSTIFICACIÓN

La finalidad de realizar el estudio de desbalance de tensiones concerniente a la calidad de la energía en nuestro país, es para realizar una comparativa de la norma de calidad establecida por la SIGET con normativas de otros países de la región centroamericana, América del Norte y Europa donde los requerimientos que presentan sus normativas son mucho más estrictos en cuanto al desbalance de tensiones, y así poder medir el impacto económico en la industria desde la distribución, el usuario y los equipos conectados al sistema eléctrico por medio de la realización un análisis crítico de los índices de desequilibrio de tensiones actualmente usados, y proponer un índice de caracterización más preciso que los actuales en su relación con los efectos sobre el motor trifásico de inducción.

De tal manera que el sector industrial, y usuarios conectados a la red de distribución se vean beneficiados con un producto técnico de calidad donde los equipos trabajen a niveles tensión, corriente y frecuencia adecuados y se reduzcan así costos por daños o paros en la producción debido de las perturbaciones y la baja calidad de la energía.

CAPITULO UNO: CALIDAD DE ENERGÍA EN EL PRODUCTO TÉCNICO

1.1 CALIDAD DE ENERGÍA

Actualmente, el estudio de calidad de energía eléctrica ha adquirido mucha importancia y tal vez la razón más importante es la búsqueda del aumento de productividad y competitividad de las empresas. Así mismo porque existe una interrelación entre la calidad de la energía eléctrica, la eficiencia y la productividad. Para aumentar la competitividad, las empresas requieren optimizar su proceso productivo mediante:

- ♣ Utilización de equipos de alta eficiencia como: motores eléctricos, bombas, etc.
- ♣ Automatización de sus procesos mediante dispositivos electrónicos y de computación.
- ♣ Reducción de costos vinculados con la continuidad del servicio y la calidad de la energía.
- ♣ Reducción de las pérdidas de energía.
- ♣ Evitar costos por sobredimensionamiento y tarifas.
- ♣ Evitar el envejecimiento prematuro de los equipos.

1.2 DEFINICIONES DE CALIDAD SEGÚN NORMATIVA

La Calidad de la Energía Eléctrica (CEL) en términos generales es un conjunto de propiedades inherentes tanto al servicio como a la señal de tensión o corriente eléctrica que permiten apreciarla como igual, mejor o peor que otras.

Por tanto, podemos afirmar que la CEL en su concepto más amplio debe considerar tanto la continuidad del servicio como la calidad de las señales de tensión y corriente eléctrica, en un tiempo dado y en un espacio determinado de un sistema de potencia eléctrico.

La definición del término Calidad de la Energía Eléctrica no es única y varía de país en país. Veamos algunas definiciones tomadas de instituciones que tratan sobre el tema en diferentes partes del mundo:

El Instituto EPRI (Electric Powers Research Institute) de los Estados Unidos, define la calidad de la Energía Eléctrica (Power Quality) como: **“Cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de la tensión, de la corriente o de la frecuencia, de sus valores ideales que ocasione falla o mala operación del equipo de un usuario.”**

La norma IEC (61000-2-2/4) y la norma CENELEC⁴ (50160) definen la Calidad de la Energía Eléctrica como: **“Una característica física del suministro de electricidad, la cual debe llegar al cliente en condiciones normales, sin producir perturbaciones ni interrupciones en los procesos del mismo”**.

Para la norma IEEE⁵ 1159 de 1995: **“El termino se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente eléctricas, en un tiempo dado y en una ubicación dada en el sistema de potencia”**.

La CREG⁶ en Colombia en su Resolución 070 de 1998 conceptuó que: **“El termino calidad de la potencia suministrada se refiere a las perturbaciones y variaciones de estado estacionario de la tensión y corriente suministrada por el Operador de Red. El termino calidad del servicio prestado se refiere a los criterios de confiabilidad del servicio.”**

En El Salvador el término de calidad de energía tienen por objeto regular los índices e indicadores de referencia para calificar la calidad con que las empresas distribuidoras de energía eléctrica suministran los servicios de energía eléctrica a los usuarios de la Red de Distribución, tolerancias permisibles, métodos de control y compensaciones.

En otros países han incluido en el concepto de Calidad de Energía Eléctrica – CEL tanto lo correspondiente al diseño, construcción y operación de la instalación eléctrica como la atención al usuario (facturación y reclamos).A continuación, se propone definir la CEL de la siguiente manera y, a partir de allí, desarrollar su

⁴CENELEC: Comité Europeo de Normalización Electrotécnica, es responsable de la estandarización europea en las áreas de ingeniería eléctrica.

⁵ El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica es una asociación mundial de ingenieros dedicada a la estandarización y el desarrollo en áreas técnicas.

⁶ Comisión de Regulación de Energía y Gas en Colombia.

concepto: La Calidad de la Energía Eléctrica – CEL, “**Es un conjunto de características físicas de las señales de tensión y corriente para un tiempo dado y un espacio determinado, con el objetivo de satisfacer necesidades de un cliente**”.

1.3 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.

El estudio de la calidad de la energía eléctrica, es el primer y más importante paso para identificar y solucionar problemas del sistema de potencia. Los problemas eléctricos pueden dañar el comportamiento del equipo y reducir su confiabilidad, disminuir la productividad y la rentabilidad e incluso puede poner en peligro la seguridad del personal si permanecen sin corregirse.

Este tipo de estudios para plantas industriales, empresas de energía y empresas privadas, incluyen auditorías energéticas y revisiones mecánicas, térmicas y eléctricas conducentes a reducir los desperdicios de energía y administrar eficientemente los recursos energéticos.

Además nos permiten descubrir las tres causas mayores de los problemas de la calidad de potencia (SAGS de tensión, interrupciones en el suministro y distorsión de la onda de tensión debido a la presencia de armónicos en la red) lo cual requiere de cinco pasos básicos:

- ✚ Planeación, Inspección y preparación del lugar.
- ✚ Monitoreo de la potencia (registro de las variables eléctricas con equipo especializado).
- ✚ Análisis del monitoreo e inspección de los datos recolectados
- ✚ Prácticas de la utilización de la energía.
- ✚ Aplicación de las soluciones correctivas.

1.4 BENEFICIOS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.

Las actividades a realizar para una buena calidad de la energía nos permiten definir los objetivos del proyecto, especificar los recursos de equipos necesarios para el desarrollo del trabajo y aclarar dónde debe monitorearse dependiendo del sitio en el cual se sospecha que el problema aparece. También permite hacer un análisis

sistemático de los datos, identificación de eventos que ocurran durante intervalos de mala operación del equipo y aquellos que excedan los parámetros de soporte de los equipos.

Históricamente, la mayoría de los equipos son capaces de operar satisfactoriamente con variaciones relativamente amplias. Sin embargo, en los últimos diez años se han agregado al sistema eléctrico un elevado número de equipos, no tan tolerantes a estas variaciones, incluyendo a los controlados electrónicamente, muchos circuitos de control que se fabrican mediante electrónica de conversión de potencia como son impulsores de ca, cd, y demás equipo electrónico que está en los controles periféricos de computadoras y controladores lógicos programables (PLC's), todos estos dispositivos disponibles y necesarios en la industria requieren de un control muy preciso y un sistema de protección muy sensible pues éstos son aún más susceptibles a los efectos de los disturbios en el sistema eléctrico.

1.5 PARÁMETROS QUE INCLUYE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.

Entre los parámetros que incluyen el estudio de calidad de energía tenemos:

- ❖ Confiabilidad del servicio.
- ❖ Desviaciones de la frecuencia.
- ❖ Desviaciones y fluctuaciones de tensión.
- ❖ fluctuaciones rápidas de la tensión (Flicker).
- ❖ Modulaciones en la onda de tensión.
- ❖ Sobretensiones.
- ❖ Distorsión de la onda de tensión y corriente.
- ❖ Asimetría de las tensiones trifásicas.

Los problemas en la Calidad de la Energía Eléctrica pueden ser detectados instalando equipos de medición de alta velocidad para monitorear el "poder eléctrico". Este tipo de equipos de prueba proveerá información que será usada en una evaluación para determinar si el suministro de energía eléctrica es de suficiente "calidad" para operar los equipos confiadamente.

CAPITULO DOS: NORMATIVA SALVADOREÑA E INTERNACIONALES RELACIONADAS A LA CALIDAD DE ENERGÍA Y PRODUCTO TÉCNICO.

2.1 GENERALIDADES

El sector electricidad está compuesto por los operadores y usuarios finales. Un operador es cualquier unidad generadora, transmisora, distribuidora o comercializadora de energía eléctrica y usuario final es quien compra la energía eléctrica para uso propio.

La estructura típica de un sistema eléctrico de potencia es la siguiente:

La generación de energía eléctrica en nuestro país proviene de recursos hidráulicos, geotérmicos y térmicos; esta energía es inyectada al sistema pasando por la red de transmisión (en un nivel de voltaje igual o mayor a 115,000 voltios), que sirve para transportar electricidad desde una fuente generadora a un punto de distribución del sistema donde se tienen niveles de tensión de 46,000V, 23,000V, 13,200V entre otros, y luego es utilizada por los usuarios finales, los cuales pueden estar en niveles categorizados como bajo voltaje ($\leq 600V$) o medio voltaje ($>600V$) y pueden ser clientes residenciales, comerciales o industriales.

Básicamente en el salvador existen 4 compañías distribuidas las cuales son:

- AES corporación: Clesa, Caess, Deusem, EEO.
- Del sur
- Abruzzo y B&D
- Edesal

Distribuidas como se muestran en la figura siguiente:



Figura 4. Distribuidoras a nivel nacional.

El ente encargado de la regulación del servicio de energía eléctrica en el salvador es la SIGET que es una entidad autónoma que regula el sector eléctrico en cuanto a sus operaciones, así como también lo correspondiente a las telecomunicaciones.

2.2 NORMAS DE CALIDAD DEL SERVICIO DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Las distribuidoras tiene como base la normativa de calidad del servicio de los sistemas de distribución el objetivo de estas norma es regular los índices e indicadores de referencia para calificar la calidad con que las empresas distribuidoras de energía eléctrica suministran los servicios de energía eléctrica a los usuarios de la Red de Distribución, tolerancias permisibles, métodos de control y compensaciones respecto a los parámetros de la calidad de energía.

2.3 ESTRUCTURAS DE LA NORMATIVA DE CALIDAD EN EL SALVADOR

La norma de calidad se divide en tres áreas:

- **Calidad del producto técnico:** Se refiere al control de los niveles de tensión, perturbaciones y el factor de potencia, siendo el distribuidor el responsable de efectuar las mediciones correspondientes, el procesamiento de los datos, la determinación de las compensaciones que pudieran corresponder a los consumidores afectados y su pago al mismo.

- **Calidad del servicio técnico:** La calidad del servicio técnico se evalúa en función de la frecuencia y duración total de las interrupciones. Se subdivide en dos etapas:
 - ✓ La primera es el control de los índices globales para el distribuidor, el levantamiento de la información y el cálculo representaran la cantidad y el tiempo total de las interrupciones que afectan a los consumidores.

- ✓ La segunda consiste en calcular los indicadores a nivel del consumidor de forma tal de determinar la cantidad de interrupciones y la duración total de cada una de ellas que afecten a cada consumidor.

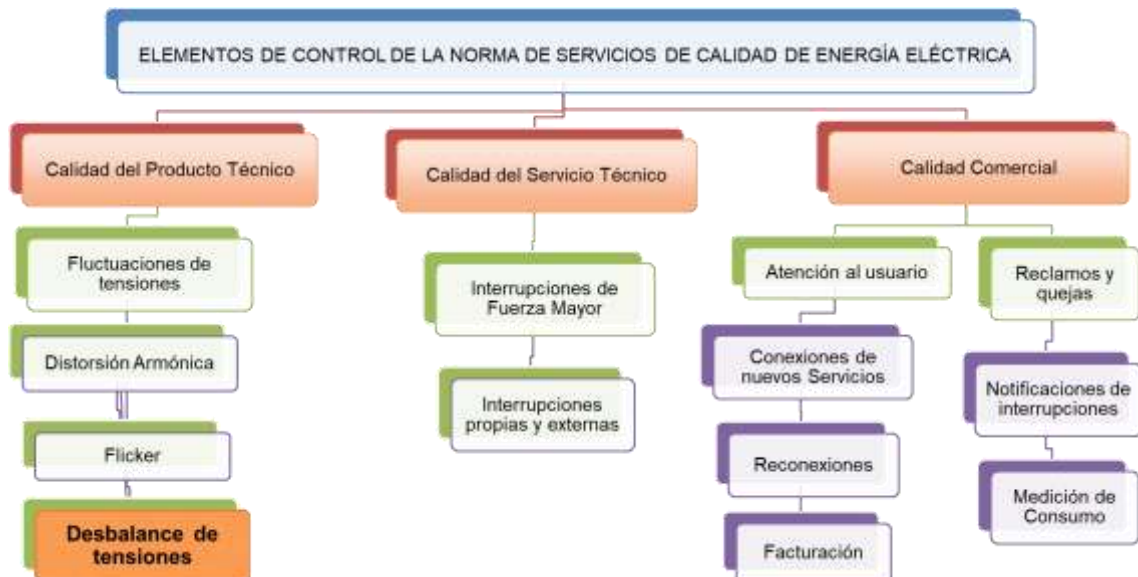
➤ **Calidad del servicio comercial:** Se refiere al conjunto de servicios comerciales que la empresa distribuidora de energía eléctrica necesarios para mantener un nivel adecuado de satisfacción a los consumidores y que responde a los siguientes parámetros:

- ✓ Niveles individuales de calidad comercial: son los vinculados a las prestaciones garantizadas a cada consumidor.
- ✓ Niveles globales de calidad comercial: se corresponden con metas de calidad para todo el distribuidor.

En este documento estudiaremos y analizaremos sobre la calidad del producto técnico comparando con otras normas internacionales para ver cómo se rigen en parámetros según la eficiencia del país en energía eléctrica.

2.4 ELEMENTOS DEL CONTROL DE CALIDAD DEL SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El esquema siguiente muestra los elementos que controla la norma de calidad del servicio en la distribución de energía eléctrica.



2.5 CALIDAD DEL PRODUCTO TÉCNICO.

Considerada como un producto, y que hace referencia a la parte técnica, es decir, que tiene que ver con las características de la señal eléctrica. En esta parte debemos asegurar que la señal eléctrica entregada cumpla con las condiciones establecidas en documentos y normas establecidos en cada país.

La calidad del producto engloba índices que nos permiten evaluar la calidad del producto que se brinda para poder entender estos fenómenos electromagnéticos vamos a caracterizar los que tienen mayor influencia sobre la calidad de la electricidad entre estos están:

- Frecuencia
- Variaciones de tensiones.
- Interrupciones
- Armónicos
- Factor de potencia
- **Desbalance**

Antes debemos caracterizar los niveles de tensión.

Nivel de la Tensión Según la Norma ANSI C84.1

Clase	Rango
Baja Tensión	<1000V
Media Tensión	1000V < V < 100kV
Alta Tensión	100kV ≤ V ≤ 230kV

Tabla 1. Niveles de Tensión Norma ANSI C.84.1

Nivel de la Tensión Según la Norma IEC en Europa.

Clase	Rango
Baja Tensión	<1000V
Media Tensión	1000V < V < 35kV
Alta Tensión	35kV ≤ V ≤ 230kV
Extra Alta Tensión	>230KV

Tabla 2. Niveles de Tensión Norma IEC

Nivel de la Tensión Según la Norma SIGET

Clase	Rango
Baja Tensión	<600V
Media Tensión	600V < V < 150kV

Tabla 3. Niveles de Tensión según SIGET.

Límites permisibles de la tensión según Norma de Calidad de la Energía - SIGET.

Baja Tensión (Hasta 600V)		
Urbano	Rural	Aislado
±7	±8	±8.5
Media Tensión (600 a 115k)		
±6	±7	±8.5

Tabla 4. Límites Permisibles de Regulación de Tensiones

Niveles de tensión manejados en BT y MT en El Salvador.

Nivel de Tensiones	Tensiones Manejadas
Baja Tensión	240/120, 208/120, 480/270, 440, y 600 V
Media Tensión	4.16/2.3, 13.2/7.6, 23/13.2, 35 y 46 KV

Tabla 5. Niveles de Tensión en MT y BT en EL Salvador

2.5.1 FRECUENCIA

Las variaciones de la frecuencia de potencia se definen (IEEE, 1999) como la desviación de la frecuencia fundamental del sistema de potencia de su valor nominal especificado (50 Hz o 60 Hz dependiendo del país).

La frecuencia⁷ del sistema de potencia es directamente relacionada con la velocidad de rotación del generador en el sistema. En cualquier instante la

⁷ Referencia de IEEE STD 1159-R2001

frecuencia depende del balance entre la carga y la capacidad disponible de generación.

Cuando este balance dinámico cambia, ocurren pequeños cambios en la frecuencia. El tamaño del cambio en la frecuencia y su duración dependen de la respuesta característica de la carga y de la respuesta del sistema de generación a los cambios en la carga.

La frecuencia nominal de la tensión en la Unión Europea es de 50Hz. En condiciones normales de operación, el valor promedio de la frecuencia fundamental en los sistemas de distribución, durante 10 segundos, es, según la EN 50160 para sistemas interconectados:

- 50 Hz +/- 1% (49,5 ... 50,5 Hz) durante el 95% de una semana
- 50 Hz - 6%, +4% (47 ... 52 Hz) durante el 100% de una semana

Figura 5. Nivel de Frecuencia Nominal.

En el salvador la norma de calidad de energía no define parámetros permisibles para la frecuencia, la frecuencia para la mayoría de los países de américa se toma como 60Hz nominal.

Las variaciones de la frecuencia que van fuera de los límites aceptados para el funcionamiento normal en estado estacionario del sistema de potencia son normalmente causas de fallas en el sistema de transmisión de energía. Variaciones de frecuencia que afectan el funcionamiento de las máquinas giratorias, o procesos que derivan su sincronización desde la frecuencia de potencia (reloj) son raros en modernos sistemas de energía interconectados.

2.5.2 VARIACIONES DE VOLTAJE E INTERRUPCIONES

La variación de tensiones se refiere a un conjunto de disturbios o condiciones que producen resultados indeseables para el equipo eléctrico instalado en la industria, y en el sistema eléctrico de potencia que suministra la energía.

Las fluctuaciones de tensión varían sistemáticamente la forma de onda o también se presentan como una serie de cambios aleatorios, son de pequeñas dimensiones,

concretamente entre un 95% y 105% del valor nominal a una frecuencia baja, en general por debajo de 25Hz.

Para medir el grado de afectación se emplea el índice de severidad de Flicker:

- ❖ **Pst** (corto plazo, cada 10min): Se calcula el promedio cúbico de cada 10 minutos de los valores momentáneos.
- ❖ **Plt** (largo plazo, 2 horas): Se calcula, tomando el promedio cúbico de 12 valores Pst continuos (12 intervalos de 10 minutos = 1 intervalo Plt de 2 h).

La intensidad de la fluctuación no debe exceder un valor de $Pst=1.0$ durante el 95% de una semana. Este índice sin embargo ha sido establecido por la IEC como un método subjetivo: Cuando el 50% de las personas en una sala apenas notan variaciones en una lámpara incandescente representa un Índice de severidad Flicker con $Pst=1.0$.

Límites normalizados para la severidad de parpadeo (Flicker):

Según la norma IEC 61000-3-3:1995

- El índice de severidad del parpadeo de la luz de corta duración debe ser $PST \leq 1,0$.
- El índice de severidad del parpadeo de la luz de larga duración debe ser $PLT \leq 0,65$.

Según la norma EN 50160:1999

- El índice de severidad del parpadeo de la luz de larga duración debe ser $PLT \leq 1,0$ en el 95 % del periodo de medición (una semana).
- El índice de severidad del parpadeo de la luz de corta duración, PST, no se tiene en cuenta.

Según la resolución nro. 184/2000 del ENRE (Ente Nacional Regulador de la Electricidad):

- El índice de severidad del parpadeo de la luz de corta duración debe ser $PST \leq 1.0$ en el 95 % del periodo de medición (una semana).

Norma de calidad en SIGET según se muestra en la tabla siguiente:

Carga (SI) kW	Pst
Tensión: (≤ 600 V)	
$SI \leq 20$	1.00
$20 < SI \leq 30$	1.26
$30 < SI \leq 50$	1.58
$SI > 50$	1.86
Tensión: ($600 < V \leq 115$ kV)	
$SI / Scc \leq 0.005$	0.37
$0.005 < SI / Scc \leq 0.02$	0.58
$0.02 < SI / Scc \leq 0.04$	0.74
$SI / Scc > 0.04$	0.80

Scc: Capacidad de corto circuito del sistema en el punto de medición del Flicker [kVA]

Tabla 6. Límites para Flicker generado por el usuario.

Una interrupción es un evento durante en el cual la tensión en el punto de conexión del cliente, cae a cero y no retorna a sus valores normales automáticamente.

De acuerdo con la IEC, el tiempo mínimo de una larga interrupción es de 3 minutos. Si el tiempo es menor a 3 min, se denomina corta interrupción.

Los estándares de la IEEE definen como interrupciones sostenidas a aquellas que duran más de 3 segundos [Std.1159] o más de 2 min. [Std.1250].

La norma de Calidad de Servicio de los sistemas de distribución de SIGET define una Interrupción, como la falta de suministro de energía eléctrica en el punto de entrega al usuario y la clasifica como:

- **Momentánea:** Interrupciones que tienen una duración limitada hasta de tres minutos, el cual es el tiempo requerido para restablecer los dispositivos de control y protección.
- **Sostenida:** Cualquier interrupción no clasificada como momentánea. (Definición utilizada a lo largo de este estudio, para el análisis de calidad de energía: “Mayores a 3min”).

De acuerdo con su origen, las interrupciones se pueden clasificar en dos grandes grupos: **Interrupciones Programadas e Interrupciones Imprevistas.**

Interrupciones programadas: Son aquellas que se avisan con la suficiente anticipación a los clientes. Están claramente definidas en los marcos regulatorios de la mayoría de los mercados abiertos

Interrupciones imprevistas Son todas las que no se contemplan en la clasificación anterior.

La mayoría de las fallas ocurren en MT y BT. Éstas corresponden a valores entre el 80 y el 90 %, del total de las fallas del sistema eléctrico.

2.5.3 ARMÓNICOS

La distorsión armónica se produce en los sistemas de potencia debido a la conexión de cargas no lineales.

Las cargas no lineales incluyen: convertidores de potencia estáticos, dispositivos de descarga de arco, dispositivos saturados y en menor medida maquinas rotativas.

La norma IEEE 519-1992, establece parámetros de distorsión de voltajes límites y de distorsión de corriente en el punto de entrega.

Los límites de distorsión armónica individual de tensiones establecidos en el acuerdo 192-E-2004 son similares a los de la norma europea EN50160 pero fueron adoptados de la norma IEC 61000-3-6 únicamente para tensiones de MT y BT. Los límites de distorsión armónica de tensión manejados en El Salvador son exactamente los mismos del estándar IEC 61000-3-6 y su aplicación es válida puesto que la tensión manejada en el país se encuentra dentro del rango de tensión especificado en el estándar IEC 61000-3-6.

La distorsión de tensión⁸ se define en la norma IEEE-519 como responsabilidad del distribuidor, lo mismo la norma de calidad de SIGET atribuye este problema a la empresa distribuidora la cual en media y baja tensión no debe superar más del 5% del periodo de medición estableciendo los siguientes parámetros:

⁸ Tomado del artículo estudio preliminar de calidad de la electricidad en sistemas de distribución de El Salvador. Autores: Ing. José Ramos, Ing. Armando Calderón e Ing. Marvin Hernández.

Órdenes impares no múltiplos de 3 (n)	Tasa de distorsión individual (%)	Órdenes impares múltiplos de 3 (n)	Tasa de distorsión individual (%)	Órdenes pares (n)	Tasa de distorsión individual (%)
5	6.0	3	5.0	2	2.0
7	5.0	9	1.5	4	1.0
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3.0	21	0.2	8	0.5
17	2.0	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+1.3*25/n$				
LÍMITE DE LA TASA DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL = 8 %					

Tabla 7. Límites de distorsión armónica de Tensión en redes de media y baja tensión.

La distorsión de corriente por su parte es atribuida como responsabilidad del consumidor, estableciendo los parámetros siguientes para baja y media tensión:

Orden de la armónica (n)	Potencia < 3.5 kW	Potencia ≥ 3.5 kW
	Intensidad de la Componente Armónica (amperios)	Distorsión Armónica Individual de Corriente (%)
Órdenes impares no múltiplos de 3	5	2.28
	7	1.54
	11	0.66
	13	0.42
	17	0.26
	19	0.24
	23	0.20
	25	0.18
>25	$4.5/n$	$0.2+0.8*25/n$
Órdenes impares múltiplos de 3	3	4.60
	9	0.80
	15	0.30
	21	0.21
	>21	$4.5/n$
Órdenes pares	2	2.16
	4	0.86
	6	0.60
	8	0.46
	10	0.37
	12	0.31
>12	$3.68/n$	0.3
Distorsión Armónica Total de Corriente (%)		20

Tabla 8. Límites de distorsión armónica de la corriente de carga en media y baja tensión.

El objetivo de los límites de corriente es limitar las armónicas individuales de tensión al 3% de la fundamental y el THD⁹ al 20%.

⁹ THD: Total Harmónico Distorsión o Distorsión Total Armónica la cual no supera el 8%

2.5.4 FACTOR DE POTENCIA

En términos técnicos, es la relación entre de potencia activa o útil medida en kilovatios (kW) respecto a la potencia aparente total (potencia activa y reactiva) medida en kilovoltio-amperios. El factor de potencia es un índice a tribuido al usuario El valor mínimo admitido para el factor de potencia se discrimina de acuerdo con la potencia que demanda el usuario final, de la siguiente forma: usuarios con potencias superiores a 10 kW su factor de potencia no debe bajar de 0.90¹⁰.

Además en el artículo 53 del documento términos y condiciones emitido por SIGET, presenta rangos de penalización por contar con un bajo factor de potencia.

0.75 < Fp < 0.90	El cargo por energía será aumentado en 1% por cada centésima que el FP sea inferior a 0.90
0.6 < Fp < 0.75	El cargo por energía será aumentado en 15% más el 2% por cada centésima que el FP sea inferior a 0.75
FP < 0.6	El distribuidor podrá suspender el suministro hasta tanto el usuario final adecúe sus instalaciones a fin de superar dicho valor límite

Tabla 9. Valores permisibles de factor de potencia.

2.5.5 DESBALANCES

El desbalance trifásico es el fenómeno que ocurre en sistemas trifásicos donde las tensiones y/o ángulos entre fases consecutivas no son iguales.

El balance perfecto de tensiones es técnicamente inalcanzable. El continuo cambio de cargas presentes en la red, causan una magnitud de desbalance en permanente variación. La mera conexión de cargas residenciales, de naturaleza monofásica, provocan un estado de carga en el sistema trifásico que no es equilibrado entre fases, de allí las caídas de tensión del sistema tampoco serán equilibradas dando por resultado niveles de tensión desiguales.

En el capítulo siguiente se profundizara sobre este tema más detalladamente.

¹⁰ Según la Normativa de calidad de SIGET.

LIMITES ADMISIBLES PARA EL DESBALANCE EN LA RED:

La mayoría de normativa toma en cuenta el desbalance ya que es un factor muy importante pues los problemas generados a motores e instalaciones son graves y pueden hacer que un mal funcionamiento provocar errores fatales que hacen aumentar los costos.

Desde el lado de las normativas estas estiman el desbalance con variación del 1% al 3% poniendo a este último en muchos casos como aceptable, pero idealmente debería ser 0%, pues la más mínima cantidad daña los sistemas eléctricos.

Cualquier desequilibrio causa operación ineficiente de los sistemas de transmisión que frecuentemente están muy cargados. En el diseño de los sistemas de distribución (Tensiones bajas), el suministro a cargas monofásicas es uno de los propósitos importantes, así el sistema y las cargas conectadas deben diseñarse e implementarse para ser más tolerante al desequilibrio. Los países más importantes y algunos muy desarrollados toman muy en cuenta en sus normativas de calidad de energía el desbalance como un factor muy importante y muy significativo para los sistemas eléctricos, entre estos están:

DESBALANCE A NIVEL MUNDIAL	
PAÍSES	Limites admisibles
EEUU	Se basa en norma ANSI y NEMA utilizando factor de Derating para desbalances mayores al 1%.
BRASIL	El nivel de desbalance no debe exceder al 2 % pues aplica multas a usuarios y distribuidor.
ALEMANIA	De acuerdo con la VDEW 1992, el nivel de desbalance es del 2%.
BÉLGICA	El nivel no debe exceder en media tensión al 2% de desequilibrio.
ARGENTINA	La reglamentación permite que los valores de desbalance puedan superar los límites recomendados, se está considerando modificar la reglamentación vigente.

Tabla 10. Desbalance de Tensiones a Nivel Mundial.

Algunos países centro americanos toman en cuenta el desequilibrio. Las normas de calidad de energía de Guatemala (Resolución CNEE No-09-99) y Panamá establece un 3% de desequilibrio de voltaje en baja y media tensión para los sistemas de distribución definido y el 1% para alta tensión, en la tabla siguiente se resume a nivel centroamericano como son los límites de Desbalance de Tensiones

CA	Limites admisibles
GUATEMALA	El porcentaje de desequilibrio en media como en baja tensión no debe superar el 3% desbalance.
EL SALVADOR	El Desbalance no es tomado como un parámetro reglamentario en la norma de calidad, no hay límites que permitan regular el desbalance en distribución y a nivel de usuario se rigen bajo normas y estándares de otros países.
HONDURAS	La Comisión Reguladora de Energía Eléctrica en honduras dice que en media tensión puede operar con un 3% de desbalance, en baja tensión un valor extremo de 6% y en alta tensión máx. 1%. Estos como límites máximos de operación.
NICARAGUA	No se establece parámetros admisibles del Desbalance de tensiones.
COSTA RICA	En la norma de Calidad de Costa rica indica que el desbalance de fases debe permanecer por debajo del 1 % para transmisión y generación, para el lado de suministro indica que no debe exceder el 3% en condiciones de ausencia de carga.
PANAMÁ	El desbalance no debe exceder del 1% en alta tensión y en media tensión no debe exceder el 3%.

Tabla 11. Niveles de Desbalance a nivel Centroamericano.

Cabe mencionar que en la normativa salvadoreña solo se ha encontrado un comentario de este índice el cual lo establece como un parámetro de medición y su forma de medirlo según lo establece el artículo 19 de la norma de calidad de energía de la SIGET, pero lo demás no se refiere a él y no hay un limite establecido.

Ya definido los aspectos más relevantes del producto técnico se establecen un resumen de las normas más usuales y la norma de calidad de el salvador.

2.6 RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL PRODUCTO TÉCNICO¹¹.

No	Parámetro	Características de la Fuente de energía de acuerdo con EN-50160	Características en Baja tensión de acuerdo con EMC standard EN 61000		Características según la norma de SIGET.
			EN 61000-2-2	Otros	
1	Frecuencia	BT, MT: el valor medio de la fundamental la medición sobre 10s ±1% (49.5 – 50.5Hz) para el 99.5% de la semana. -6%/+4% (47 – 52Hz) para 100% de la semana.	2%		No se define en la norma de calidad
2	Niveles de tensión	BT, MT: ±10% para 95% de la semana, con promedio de 10 min del valor rms		±10% aplicado por 15 min	+ 7% para el 95% de la semana, valores eficaces promediados cada 10 minutos
3	Fluctuaciones de tensión	BT: 5% normal 10% con poca frecuencia $P_{lt} \leq 1$ para 95% de la semana. MT: 4% normal 6% con poca frecuencia $P_{lt} \leq 1$ para 95% de la semana.	3% normal 8% poco frecuente $P_{st} < 1.0$ $P_{lt} < 0.8$	4% máximo $P_{st} < 1.0$ $P_{lt} < 0.65$ (EN 61000-2-12) 3% (IEC 61000-2-12)	$P_{st} \leq 1.0$ para el 95% de 14 días.
4	Armónicos	BT, MT: ver tabla THD ≤ 8%	6% - 5 ^a , 5% - 7 ^a 3.5% - 11 ^a , 3% - 13 ^a . THD < 8%	5% - 3 ^a , 6% - 5 ^a , 5% - 7 ^a , 1.5% - 9 ^a , 3.5% - 11 ^a , 3% - 13 ^a , 0.3% - 15 ^a , 2% - 17 ^a .	BT, MT: ver tabla THD ≤ 8%

¹¹ Los datos han sido tomados de las normas correspondientes y del documento “Estudio preliminar de calidad de la electricidad en sistemas de distribución en el salvador”.

				(EN 61000-3-2)	
5	Factor de potencia				usuarios con potencias superiores a 10 kW \geq 0.90
6	Desbalance	BT, MT: hasta 2% del 95% de la semana, promedio de 10min rms. Hasta 3% en otros sitios.	2%	2% (EN 61000-6-12), 1% Nema MG1,	Se menciona sin establecer límites permisibles.

Tabla 12. Comparación entre Parámetros de calidad de las diferentes normas.

CAPITULO TRES: DESBALANCE DE TENSIONES.

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE TENSIONES

Se dice que un sistema trifásico de tensiones está desbalanceado si se cumple una o ambas de las siguientes condiciones:

- Las magnitudes de las tensiones de fase o de línea son diferentes y/o
- Los ángulos de los fasores de estas tensiones son diferentes de las condiciones balanceadas.

Un sistema de generación simétrico, es aquel donde las tres tensiones tienen igual magnitud de voltaje y sus fasores están a 120° entre sí. Una carga trifásica simétrica, es aquella que genera tres corrientes de magnitudes y fases iguales respecto a la tensión.

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 equilibradas 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.

El desbalance de tensiones (unbalance voltage o imbalance voltage según IEEE) es un fenómeno que ocurre en sistemas trifásicos donde los voltajes y/o ángulos entre fases consecutivas no son iguales

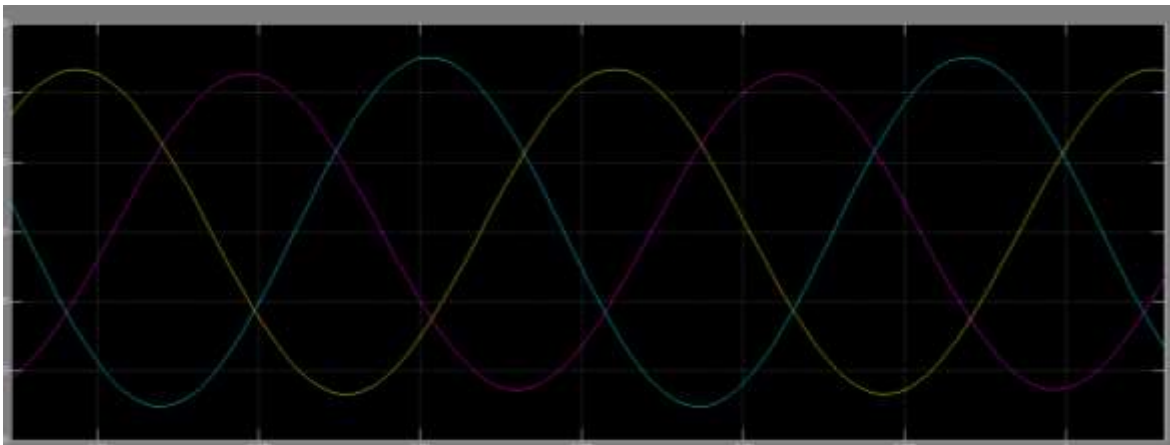


Figura 6. Onda senoidal con un desequilibrio al 5% de la tensión.

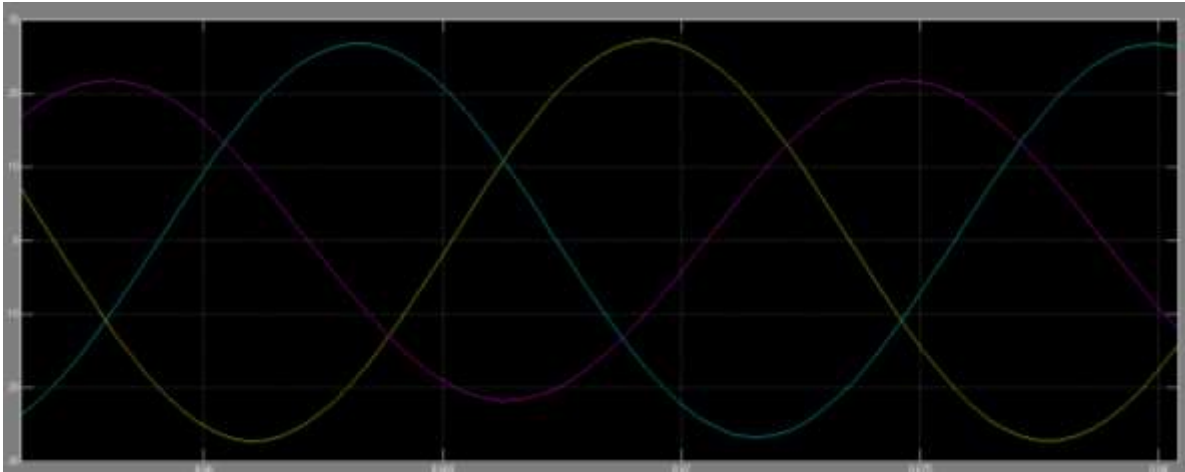


Figura 7. Onda senoidal con un desequilibrio de tensiones al 10%.

El continuo cambio de las cargas presentes en la red causa una magnitud de desbalance en permanente variación. El balance perfecto de tensiones es técnicamente inalcanzable.

El primer estudio sistemático y generalizado para el estudio de sistemas de tensión desequilibrados lo propuso, en 1918, Fortescue en su clásico artículo “Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks”, el cual fue desarrollado precisamente cuando estudiaba la operación del motor de inducción, en estado estacionario, alimentado con tensiones desequilibradas. En este artículo Fortescue propone descomponer el sistema trifásico desequilibrado en tres sistemas de tensiones trifásicos, cada uno de ellos con componentes de igual magnitud: el sistema de secuencia cero, el sistema de secuencia 1 (secuencia positiva), y el sistema de secuencia 2 (secuencia negativa); el efecto total sobre el motor se encuentra sumando el efecto de cada sistema. Asimismo Fortescue muestra que el sistema de secuencia cero no produce campo resultante en el entrehierro, por lo que no debe considerarse en la conversión de potencia.

Es interesante precisar que en el “método de coordenadas simétricas”, los sistemas de secuencia positiva y negativa son, desde el punto de vista geométrico, sistemas simétricos pues presentan una simetría rotacional de 120 grados. Por lo tanto solo es necesario calcular una componente de cada sistema pues las otras componentes se obtienen desplazando la primera componente en 120 y 240 grados. Este hecho dio lugar a que posteriormente se usara el nombre de “método de componentes simétricas” y se popularice el término de “componentes simétricas” o “componentes

de secuencia”. Igualmente es importante mencionar que el método fue propuesto por Fortescue para el análisis de sistemas eléctricos en estado estacionario.

3.2 FACTOR DE DESEQUILIBRIO EN EL MÉTODO DE LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS

En el método de componentes simétricas propuesto por Fortescue, se distinguen dos definiciones de factores de desequilibrio. Éstas son:

El “factor de desequilibrio de tensiones de secuencia negativa” (negative-sequence voltage unbalance factor) definida como la relación entre la magnitud de la componente de secuencia negativa de tensión de fase o de línea a la magnitud de la componente de secuencia positiva de tensión de fase o de línea.

$$NSVUF = \text{Negative Sequence Voltage Unbalance Factor} = \frac{|V_2|}{|V_1|}$$

El “factor de desequilibrio de tensiones de secuencia cero” (zero-sequence voltage unbalance factor) definida como la relación entre la magnitud de la componente de secuencia cero de tensión de fase y la magnitud de la componente de secuencia positiva de tensión de fase.

$$ZSVUF = \text{Zero Sequence Voltage Unbalance Factor} = \frac{|V_0|}{|V_1|}$$

Sin embargo, como la corriente de secuencia cero no fluye en sistemas trifásicos con neutro aislado, como es el caso de los motores trifásicos de inducción, el “factor de desequilibrio de tensiones de secuencia cero” tiene poco valor práctico en éstos casos. En cambio, el “factor de desequilibrio de tensiones de secuencia negativa” tiene un significado práctico que indica el nivel de tensión que intenta hacer girar el motor en sentido contrario a lo establecido por la tensión de secuencia positiva. En un artículo posterior a su publicación más famosa, Fortescue define el “factor de desequilibrio” como la relación de una unidad de la componente de secuencia negativa de fase a la unidad correspondiente de su componente de secuencia positiva, indicando además que generalmente solo se necesita la relación entre las magnitudes.

3.3 DEFINICIONES DE DESEQUILIBRIO DE TENSIÓN DADAS POR LAS NORMAS INTERNACIONALES

3.3.1 Definición NEMA.

La Norma NEMA (National Equipment Manufacturer's Association) define el desbalance de tensión mediante un índice conocido como "Line Voltage Unbalance Rate (LVUR)", que es la máxima desviación del voltaje de línea con respecto al valor de línea promedio, dividido entre el voltaje de línea promedio y está dado por:

$$\%LVRU = \frac{|Desviacion \max(V_{ab}, V_{bc}, V_{ca})|}{Pomedio \ de \ (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca})} * 100$$

Donde: $Pomedio \ de \ (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}) = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3}$

V_{ab} , V_{bc} , V_{ac} son las tensiones de línea del sistema eléctrico que alimenta a el motor. La definición NEMA asume que la tensión promedio es igual a la tensión nominal y además solo trabaja con magnitudes pues los ángulos de la tensión no son incluidos en la ecuación.

3.3.2 Definición IEEE.

La definición de la IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), es también conocida como "Phase Voltage Unbalance Rate (PVUR)", La norma IEEE 1159-1995 dice que el desbalance de voltaje es la razón entre la componente de secuencia negativa o cero con la componente de secuencia positiva.

El desbalance puede ser estimado como la máxima desviación entre las tres fases del promedio de voltaje o corrientes trifásicas, dividido por el promedio del voltaje o corriente trifásico, expresado en porcentaje.

Este cálculo será definido por la ecuación:

$$\%LVRU = \frac{Desviacion \ max(V_a, V_b, V_c)}{Pomedio \ de \ (V_a, V_b, V_c)} * 100$$

Donde: $P_{\text{medio de } (V_a, V_b, V_c)} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}$

V_a, V_b, V_c son las tensiones fase-neutro del sistema que alimenta el motor.

La Definición de la IEEE usa el mismo concepto de desbalance de tensión que la definición NEMA, la única diferencia es que la IEEE usa la tensión fase-neutro en lugar de la tensión línea-línea. En esta definición también se pierde la información del ángulo de la tensión pues solo se consideran las magnitudes de la tensión.

3.3.3 Definición IEC

La Definición de desbalance de tensión dada por la IEC o definición de componentes simétricas, es también conocida como “Voltage Unbalance Factor (VUF)” está dada por:

$$\%VUF = \frac{V_2(\text{Componente de tensión de secuencia negativa})}{V_1(\text{Componente de tensión de secuencia positiva})} * 100$$

Para un conjunto desbalanceado de tensiones de línea V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} , la componente de tensión de secuencia positiva V_1 y la componente de tensión de secuencia negativa V_2 están dados por los siguientes fasores:

$$V_1 = \frac{V_{ab} + (a * V_{bc}) + (a^2 * V_{ca})}{3}$$

$$V_2 = \frac{V_{ab} + (a^2 * V_{bc}) + (a * V_{ca})}{3}$$

Donde $a = -0.5 + j0.866$ y $a^2 = -0.5 - j0.866$

Es de tener en cuenta que en este método se utiliza fasores pues se toma en cuenta el ángulo de desfase de las tensiones.

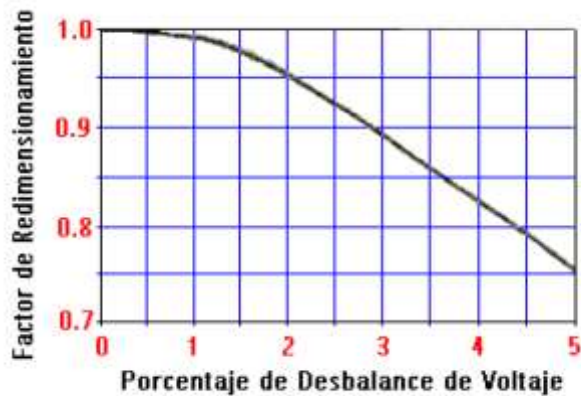
3.4 EFECTOS Y CONSECUENCIAS DEL DESBALANCE DE TENSIONES

Cuando un motor de inducción es alimentado por un sistema de tensiones trifásico desequilibrado por un largo periodo de tiempo (al menos la constante térmica de la máquina), se producen en su funcionamiento efectos anormales sobre la corriente, el calentamiento, la potencia y la velocidad, respecto a su operación bajo un sistema de tensiones equilibrado.

De acuerdo a la norma ANSI C84.1-1995, **Electrical Power Systems and Equipment Voltaje Ratings (60 Hz)**, solamente el 66% de las tensiones de distribución entregadas por las distribuidoras eléctricas a plantas industriales cumplen con un 1% de desequilibrio de fases. Por otra parte, el 98% de las tensiones generadas en sistemas públicos de energía tienen menos de 3% de desequilibrio de tensiones. Solamente un 2% de las tensiones disponibles en las redes de distribución públicas tiene un desequilibrio mayor del 3%.

Las normas NEMA MG1 de motores eléctricos y generadores, recomiendan limitar el desequilibrio a un máximo de 1%. Cuando las tensiones entre fases (AB – BC y CA) están desequilibradas, la corriente aumenta rápidamente en devanados del motor, y si se permite que estén presentes de forma permanente, se dañará el motor irremediablemente. Es posible operar un motor bajo condiciones de desequilibrio de tensiones, siempre que se realice un "Derating" o disminución de la potencia que se saque por el eje de la máquina.

De la figura 8, se puede ver que un desbalance de tensión del 2% requiere alrededor de un motor de 5% más grande. Un desbalance de tensión del 3% requiere de un motor 12% más grande, o motores con un factor de servicio de 1.15.



Desbalance de voltaje	Redimensionamiento aproximado
1%	ninguno
2%	95%
3%	88%
4%	82%
5%	75%
Para evaluar motores mayores que 500 hp, Consulte al vendedor sobre el redimensionamiento.	

Figura 8. Redimensionamiento para motores sobre el desbalance según el Estándar Nema MG1¹²

3.4.1 EFECTOS EN MOTORES DE INDUCCIÓN

El motor de inducción, debido a la simetría de su estructura electromagnética interna, se comporta como un conjunto equilibrado de impedancias, por lo tanto solo aparecerán desequilibrios en las corrientes debido al desequilibrio de las tensiones. El sistema de tensiones desequilibrado al ser aplicado al motor trifásico de inducción, que tiene una estructura magnética simétrica, produce corrientes desiguales en sus fases, las que producen en cada fase campos magnéticos de diferente magnitud, dando como resultante, en el entrehierro del motor, dos campos giratorios, un flujo magnético giratorio en el sentido de giro del motor y un flujo magnético que gira en dirección contraria a la rotación del rotor, tendiendo así a producir corrientes de línea desequilibradas en el motor. Consecuentemente para un determinado porcentaje de desequilibrio de tensión y una carga dada, las corrientes en las fases y la elevación de temperatura serán mucho mayores que cuando opera bajo las mismas condiciones de carga pero con tensiones equilibradas, afectando por lo tanto la potencia nominal del motor. Si las tensiones de alimentación de un motor no son idénticas entre sí, se tendrá la condición de desequilibrio de tensiones.

¹² Información extraída de la tesis “Elaboración de un metodología para la normalización de los estudios de calidad de la potencia eléctrica”.

Así, los efectos de aplicar un sistema de tensiones desequilibrado sobre el motor de inducción trifásico son:

- ✚ Corrientes desequilibradas en los bobinados que excedan considerablemente la corriente que se presenta con condiciones de tensión equilibradas.
- ✚ La elevación de temperatura en el devanado del estator, para la misma potencia, es siempre mayor que en operación con tensiones equilibradas debido al incremento de las pérdidas producidas por las componentes de secuencia negativa de las corrientes y voltajes.
- ✚ La potencia permisible del motor será menor que la potencia nominal para reducir la posibilidad de daño del motor.
- ✚ Disminución del torque efectivo porque la componente de secuencia negativa crea un torque tipo freno en el motor.
- ✚ Reducción de la velocidad de plena carga pues un deslizamiento mayor está asociado con el incremento de pérdidas en el rotor.
- ✚ Vibraciones fundamentalmente a una frecuencia igual al doble de la frecuencia nominal.

Cuando hablamos de la disminución del torque efectivo esto se debe a que la máquina no puede generar todo su par ya que el campo magnético que gira en sentido inverso del sistema de secuencia negativa provoca un par de frenado negativo, que debe sustraerse del par básico ligado al campo magnético de rotación normal la figura 9 muestra las diferentes características de velocidad de par de una máquina de inducción con una fuente de alimentación desbalanceada.

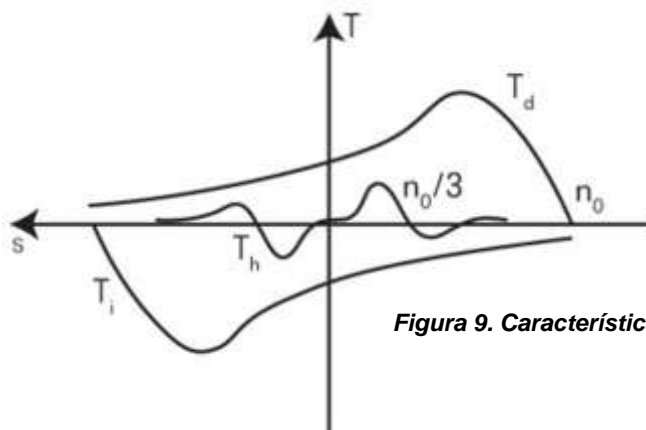


Figura 9. Características de velocidad de par de una máquina de inducción.

La curva real del estado estacionario es la suma ponderada de estas curvas con relaciones de desbalance al cuadrado como pesos conforme el par aumenta con el cuadrado de la carga. Se puede observar que la zona de funcionamiento normal donde es casi recta la parte de línea Td (La parte que comienza en la parte superior de la curva que cruza eventualmente el eje horizontal a velocidad síncrona), T_i y T_h son negativas.

Por otra parte mecánicamente los cojinetes pueden sufrir daños mecánicos a causa de las componentes del par inducido a frecuencia doble de la del sistema.

El estator y en particular el rotor se calientan excesivamente lo que conduce a un envejecimiento térmico acelerado, ese calor se presenta por la inducción de corrientes generadas por el campo magnético inverso en la rápida rotación (en sentido relativo) según se mira desde el rotor, en base a esto la curva de desclasificación NEMA e IEC se ha construido en base al supuesto: “el incremento porcentual de la elevación de temperatura en el motor, respecto a la elevación de temperatura nominal, es aproximadamente dos veces el factor de desequilibrio PVU al cuadrado”, así:

$$\text{Incremento Porcentual de la Elevacion de Temp. del bobinado} = 2 * PVU^2$$

Este supuesto se basa en que solo la tensión de secuencia negativa aporta pérdidas extras al motor y por lo tanto la tensión de secuencia positiva debería tener una magnitud igual a la nominal. Muchas veces para controlar este calor adicional hay que operar la máquina a menos de su capacidad nominal, lo que puede llegar a requerir colocar una máquina de mayor potencia nominal para suplir la carga.

3.4.2 Efecto en transformadores

Los transformadores sometidos a tensiones de secuencia negativa las transforman de la misma manera que las tensiones de secuencia positiva. El comportamiento en relación con las tensiones de secuencia cero depende de la conexión del primario y secundario y más específicamente de la presencia de conductor neutro, si en un lado se tiene un conexión delta la corriente de secuencia cero se transforma en una corriente circulante que genera calor en la delta, el flujo magnético asociado a esta componente pasa a través de las piezas estructurales del transformador

3.4.3 ARMÓNICOS COMO EFECTO POR DESEQUILIBRIOS

El mayor efecto que tienen los armónicos de tensión en la máquinas rotativas sincrónicas y en los motores de inducción es el incremento de calor debido a las pérdidas en el hierro y en el cobre a altas frecuencias, por lo tanto, los armónicos afectarán tanto la eficiencia de la máquina como el torque desarrollado.

Los armónicos de corriente en motores pueden aumentar la emisión de ruidos audibles comparado con la excitación sinusoidal. También pueden producir distribuciones de flujo resultante en el gap de aire las cuales pueden causar o aumentar el fenómeno llamado “cogging” (la negativa al arranque suave) o el llamado “crawling” (alto deslizamiento) en los motores de inducción.

Los armónicos de corriente en pareja tales como el quinto y el séptimo tienen el potencial de producir oscilaciones mecánicas en la combinación turbina – generador o en sistemas motor carga.

Estas resultan cuando el torque oscila y es causado por una interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético de frecuencia fundamental. Por ejemplo, el quinto y el séptimo armónico pueden combinarse para producir una torsión en el rotor del generador a la frecuencia del sexto armónico. Si existe una resonancia mecánica de frecuencia cercana a la eléctrica, altas fuerzas mecánicas pueden ser desarrolladas en algunas partes del motor.

Debido a que las corrientes armónicas se combinan y afectan el flujo giratorio de la máquina es necesaria más corriente para producir el mismo trabajo, por lo tanto, la eficiencia disminuye.

Cuando se trabaja con motores alimentados con tensiones no sinusoidales, debe tenerse en cuenta que no pueden operar a su capacidad nominal.

La Figura 10 muestra el factor de reducción de la capacidad del motor de acuerdo con el factor de tensión armónica.

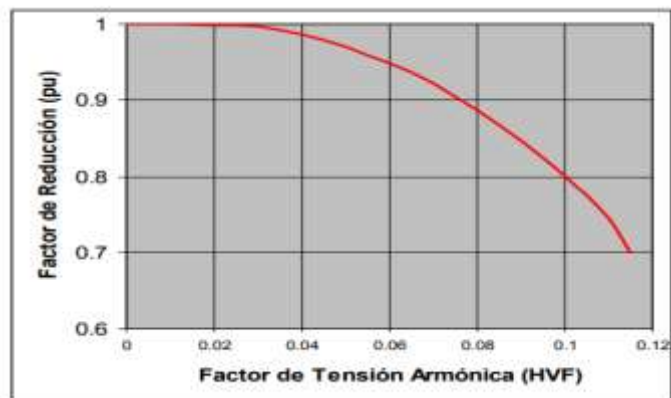


Figura 10. Factor de reducción de acuerdo con el factor de tensión armónica

Cuando la forma de onda de tensión esta distorsionada entonces la onda de tensión tendrá armónicos de tensión.

Los armónicos de tensión en los terminales del motor originan armónicos de flujo dentro del motor. Los armónicos de flujo no contribuyen significativamente al torque del motor, pero rotan a una velocidad diferente a la velocidad sincrónica, por lo cual inducen una corriente de alta frecuencia en el rotor.

Así los armónicos de tensión influyen sobre las pérdidas, la elevación de temperatura, la potencia nominal, la eficiencia y el tiempo de vida de los rodamientos.

Por otro lado, los armónicos de tensión crean armónicos de corriente en los bobinados del motor y entonces se presentan el siguiente fenómeno:

Los armónicos de corriente del estator producen armónicos y éstas inducen otros armónicos en el rotor en función de la velocidad.

El efecto de los armónicos en las perdidas del motor afectan las pérdidas de fricción y ventilación, pérdidas en el cobre del estator y rotor, perdidas en el hierro. El incremento de las pérdidas contribuye a un incremento de la temperatura del motor, por lo tanto, para evitar el sobrecalentamiento, la potencia nominal del motor debe ser reducida de tal forma que la temperatura del aislamiento no sobrepase su clase térmica.

3.4.4 EFECTOS SOBRE CONDUCTORES DE NEUTRO

En sistemas trifásicos balanceados sin contenido armónico, las líneas de corriente están desfasadas 120° , cancelándose unas con el otro resultando todo esto en una corriente muy pequeña. Sin embargo, cuando hay distorsión en cualquiera de las fases, los armónicos de las corrientes aumentan y el efecto de cancelación es reducido.

El resultado es típicamente una corriente de neutro que es significativamente mayor que lo planeado. Los armónicos “triples” (múltiplos de tres) son un aditivo en el neutro y pueden rápidamente causar un sobrecalentamiento peligroso.

En teoría la corriente máxima que el neutro debería cargar es 1,73 veces la corriente de fase.

Si no es dimensionado correctamente, esto resultará en un sobrecalentamiento. Además, un valor de corriente de neutro mayor al normal causará caídas de voltaje entre neutro y tierra.

El diseño de circuitos ramales en el pasado había permitido un conductor neutro común para tres circuitos monofásicos. La lógica dentro de este diseño fue que el conductor neutro llegaría solamente la corriente de desbalance de las tres cargas monofásicas. Un conductor neutro común parecía adecuado para las cargas y era económicamente eficiente puesto que un ingeniero de diseño balancearía las cargas durante el diseño, y un electricista balancearía las cargas durante su construcción.

En muchos ejemplos el conductor neutro se disminuía en tamaño con respecto a los conductores de fase por las mismas razones.

Bajo condiciones balanceadas de operación en cargas monofásicas no lineales, el neutro común de los tres circuitos monofásicos es portador de armónicos triples de secuencia cero, los cuales son aditivos en el conductor neutro.

Bajo condiciones de desbalance, el neutro común lleva corrientes comprendidas por las corrientes de secuencia positiva procedentes del desbalance en el sistema, las corrientes de secuencia negativa procedentes del desbalance del sistema, y las corrientes aditivas de secuencia cero procedentes de los armónicos triples.

Un conductor neutro común para tres circuitos ramales monofásicos, puede fácilmente sobrecargarse cuando alimenta, cargas no lineales balanceadas o desbalanceadas.

Las corrientes excesivas en el conductor neutro provocan caídas de tensiones mayores que los valores normales entre el conductor neutro y tierra en las tomas de 120 volts. Esto puede desestabilizar la operación del equipamiento electrónico sensible, tales como computadoras, que pueden requerir de un receptáculo de tierra aislado.

CAPITULO CUATRO: ESTUDIO DE CASO SOBRE DESBALANCE DE TENSIONES

4.1 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

4.1.1 SERIES DE TIEMPO

Se define una serie de tiempo como una secuencia de observaciones o datos medidos en determinados momentos del tiempo, ordenados cronológicamente y, espaciados entre sí de manera uniforme.

Los modelos de series de tiempo están compuestos con una historia estadística recurrente particular y su principal objetivo es su análisis para realizar pronósticos.

Las series de tiempo se pueden clasificar en:

- ✚ Series puramente aleatorias: sin patrones no aleatorios sobre el tiempo.
- ✚ Series de larga memoria: existe una dependencia casi determinística.
- ✚ Series de corta memoria: existe una dependencia del pasado próximo
- ✚ Series estacionarias: los datos evolucionan alrededor de un valor medio y siempre con la misma variabilidad.
- ✚ Series no estacionarias: los datos presentan tendencias y/o variabilidad no constante.

4.1.2 COMPONENTES DE UNA SERIE DE TIEMPO

Se debe realizar un análisis preliminar de una serie de tiempo, la cual permite detectar las características más importantes de una serie. La representación gráfica es el modo más simple de iniciar este análisis. Tradicionalmente en la mayoría de las series de tiempo se representan cuatro componentes al menos en parte, los cuales contribuyen a los cambios observados en un periodo de tiempo y dan a la serie su aspecto errático. Estas cuatro componentes son:

- ❖ **Tendencia:** Se puede definir como un cambio a largo plazo que se produce en la relación al nivel medio, o el cambio a largo plazo de la media., esto reflejara un crecimiento, estancamiento o declinación.

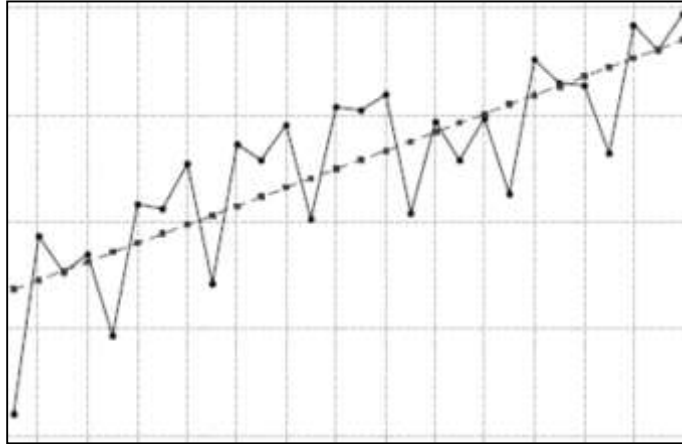


Figura 11. Gráfico comportamiento Tendencia

- ❖ **Estacional:** Patrón sistemático que se repite periódicamente (cada año, cada mes, cada día, etc. dependiendo de las unidades de tiempo en que se recogen los datos).

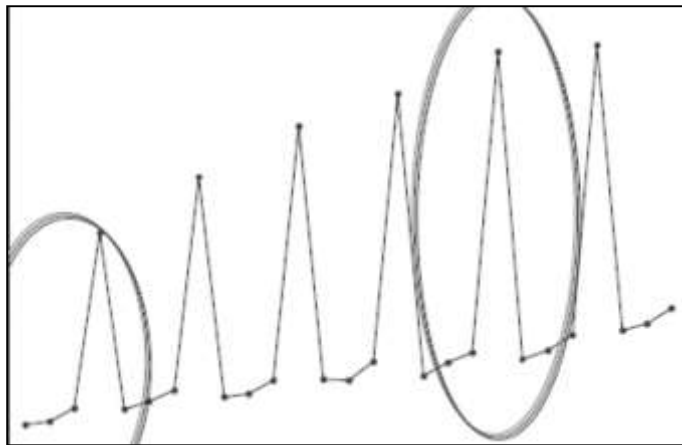


Figura 12. Gráfico comportamiento Estacional

- ❖ **Cíclico:** Se trata de oscilaciones alrededor de la tendencia producidos por periodos alternativos de prosperidad y depresión., esto dependerá de las unidades de tiempo que se tomen los datos.

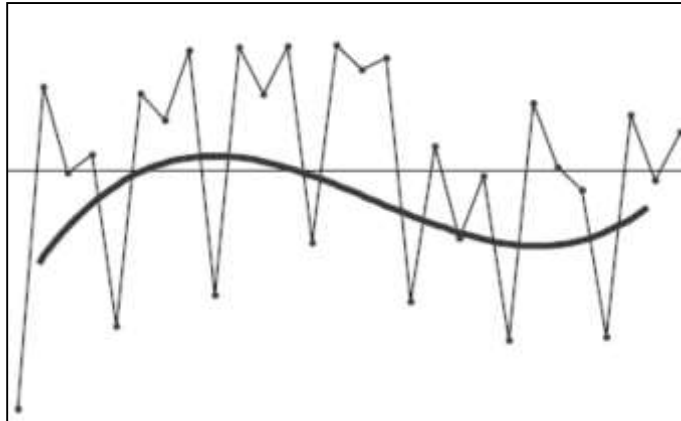


Figura 13. Gráfico comportamiento Cíclico

- ❖ Irregular: Son movimientos erráticos generados por causas ajenas al fenómeno que se esté trabajando y en consecuencia no es posible su predicción. Son de corta a muy corta duración.



Figura 14. Gráfico comportamiento Irregular

Además se debe distinguir si la serie de tiempo corresponde a un modelo aditivo o multiplicativo, y el modo más fácil de analizar es gráficamente.

- Modelo aditivo: cuando la variabilidad de la serie no depende del nivel, se tiene que las componentes de la serie se combinan de forma aditiva. En la

ecuación se puede ver este modelo con tendencia, estacionalidad y efectos cíclicos.

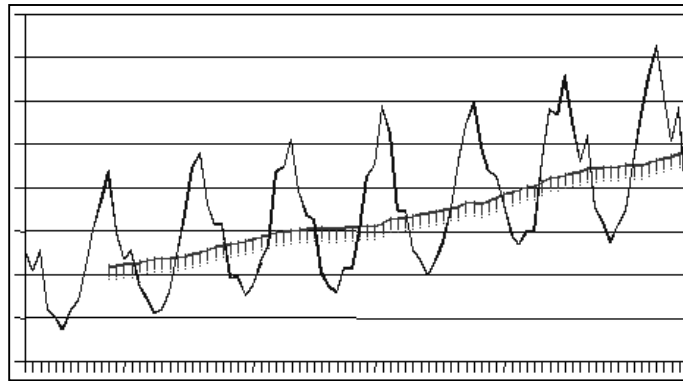


Figura 15. Gráfico Modelo Aditivo

$$Y_t = m_t + s_t + c_t + e_t$$

- **Modelo multiplicativo:** la variabilidad de la serie y el nivel dependen entre sí, los elementos de la serie se combinan de modo multiplicativo. En la ecuación se puede ver este modelo con tendencia, estacionalidad y efectos cíclicos.

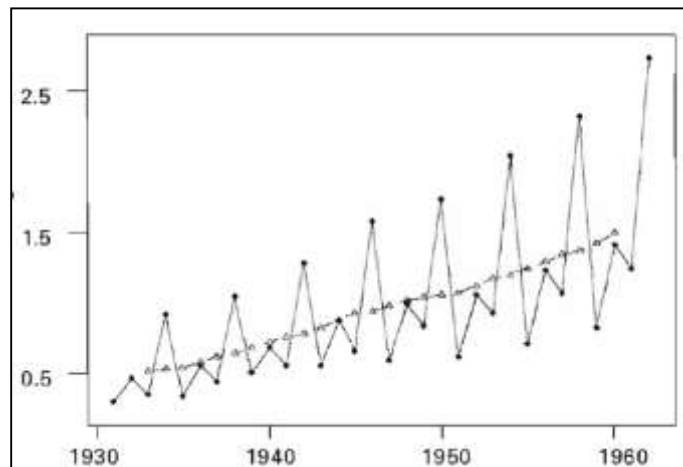


Figura 16. Gráfico Modelo Multiplicativo

$$Y_t = m_t \cdot s_t \cdot c_t \cdot e_t$$

4.1.3 INDICADOR DE EXACTITUD

Estos indicadores sirven para comparar la efectividad de diferentes modelos utilizados. Siempre se busca el valor menor en los indicadores MAPE, MAD y MSD ya que representa un mejor ajuste del modelo.

- *MAPE*: Porcentaje promedio absoluto de error, mide la exactitud de los valores estimados de la serie de tiempo. La exactitud se expresa como un porcentaje con y_t igual al valor observado, \hat{y}_t es el valor estimado y n el número de observaciones.

$$\text{MAPE} = \frac{\sum \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right|}{n} \times 100 \quad (y_t \neq 0)$$

- *MAD*: Desviación media absoluta, mide la exactitud de los valores estimados de la serie de tiempo. Expresa la exactitud en las mismas unidades de los datos.

$$\text{MAD} = \frac{\sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t|}{n}$$

- *MSD*: Desviación cuadrática media, es más sensible a errores anormales de pronóstico que el MAD.

$$\text{MSD} = \frac{\sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t|^2}{n}$$

4.1.4 MODELOS DE SERIE DE TIEMPO

Los modelos de series de tiempo están compuestos con una historia estadística recurrente particular y su principal objetivo es su análisis para realizar pronósticos. Se pueden trabajar en varios tipos de modelos de serie de tiempo, entre los más comunes se pueden encontrar:

- Modelos de tendencia
- Modelo de media móvil
- Modelo de suavización exponencial

Tendencia Lineal

Una tendencia lineal es una relación funcional entre dos o más variables correlacionadas. Se utiliza para pronosticar una variable con base en la otra. Es una línea recta que se ajusta perfectamente y que se utiliza con conjuntos de datos lineales simples. Los datos son lineales si la trama de los puntos de datos se parece a una línea. Una línea de tendencia lineal normalmente muestra que algo aumenta o disminuye a un ritmo constante. La ecuación presenta un enfoque matemático de la tendencia lineal.

$$Y_t = a + b \cdot t + e_t$$

Tendencia cuadrática

La tendencia cuadrática o polinomio de segundo grado es la forma más sencilla de modelo curvilíneo. Es útil, por ejemplo, para analizar las pérdidas y ganancias de un conjunto de datos grande. La ecuación presenta el modelo matemático que representa a la tendencia cuadrática.

$$Y_t = a + b \cdot t + c \cdot t^2 + e_t$$

Tendencia exponencial

Una tendencia exponencial es una línea curva que es muy útil cuando los valores de los datos aumentan o disminuyen a una tasa de crecimiento tal que el porcentaje de la diferencia de una observación a otra es constante. No es posible crear una línea de tendencia exponencial si los datos contienen valores cero o negativos. La ecuación 2.12 presenta el modelo matemático de la tendencia exponencial.

$$Y_t = a \cdot b^t \cdot e_t$$

Media móvil

Suaviza los datos al promediar observaciones consecutivas en la serie de tiempo. Este método es adecuado cuando no hay componente de tendencia ni estacionalidad, sin embargo hay alternativas si se presentan estos patrones.

Esta técnica se utiliza cuando se quiere dar más importancia a conjuntos de datos más recientes para obtener el pronóstico. El pronóstico se obtiene al calcular la media aritmética del conjunto de datos más recientes seleccionado. Cada vez que se tiene una nueva observación se agrega esta al conjunto de datos, y se elimina de éste la observación o dato más antiguo. El número de datos más recientes a considerar en el conjunto de observaciones del cual se calcula la media aritmética es una decisión del analista que realiza el pronóstico; la sensibilidad a los cambios en el comportamiento de la serie se reduce al utilizar un número mayor de observaciones en el conjunto de datos. Este modelo no maneja muy bien los datos con estacionalidad o con tendencia pero si lo hace mejor que la técnica del promedio simple. La ecuación 2.13 describe el modelo matemático de la media móvil.

$$PM_t = \frac{X_t + X_{t-1} + X_{t-2} + \dots + X_{t-n+1}}{n}$$

Suavizamiento exponencial simple

Los métodos de suavizamiento son técnicas de pronósticos que son apropiadas para series de tiempo más o menos estables y que presentan un patrón horizontal, es decir, las que no muestran efectos importantes de tendencia, cíclicos o estacionales. Los métodos de suavizamiento exponencial han sido utilizados con éxito a través de los años en muchos problemas de pronóstico.

Se aplica cuando sólo si se tiene un comportamiento de la serie de tiempo sin tendencia o estacionalidad.

Los valores suavizados (estimados) se obtienen ya sea con un peso óptimo generado o con un peso específico manual.

Esta técnica se basa en la atenuación de los valores de la serie de tiempo, obteniendo el promedio de estos de manera exponencial; es decir, los datos se

ponderan dando un mayor peso a las observaciones más recientes y uno menor a las más antiguas. Al peso para ponderar la observación más reciente se le da el valor u , la observación inmediata anterior se pondera con un peso de $a(1 - u)$, a la siguiente observación inmediata anterior se le da un peso de ponderación de $a(1 - u)^2$ y así sucesivamente hasta completar el número de valores observados en la serie de tiempo a tomar en cuenta para realizar la atenuación, es decir, para calcular el promedio ponderado. La estimación o pronóstico será el valor obtenido del cálculo del promedio. La expresión para realizar el cálculo de la atenuación exponencial es la ecuación.

$$P_{t+1} = \alpha X_t + \alpha(1-\alpha)X_{t-1} + \alpha(1-\alpha)^2 X_{t-2} + \dots + \alpha(1-\alpha)^{n-1} X_{t-(n-1)}$$

4.1.5 DIAGRAMA DE CAJA

Un diagrama de caja o Boxplot es un resumen gráfico de los datos para describir varias de las características más destacadas de un conjunto de datos. Entre estas características están la simetría de los datos, la concentración de los datos, la dispersión y la presencia de los datos atípicos u Outliers. Se consideran Outliers a aquella observación que siendo atípica y/o errónea, tiene un comportamiento muy diferente respecto de los datos, frente al análisis que se desea realizar sobre las observaciones experimentales.

Un Diagrama de caja se basado en cuartiles, mediante el cual se visualiza un conjunto de datos. Está compuesto por un rectángulo llamado caja y dos brazos o bigotes. La clave para la elaboración de un diagrama de caja es el cálculo de la mediana o Q_2 y de los cuartiles Q_1 y Q_3 , también se necesita el rango intercuartílico RIC que corresponde a $RIC = Q_3 - Q_1$, el cual corresponde al 50% de los datos. Los Outliers u observaciones atípicas son datos que se encuentran fuera a la izquierda o a la derecha de 1,5 veces el rango intercuartílico (RIC). La figura muestra un diagrama de caja con sus componentes.

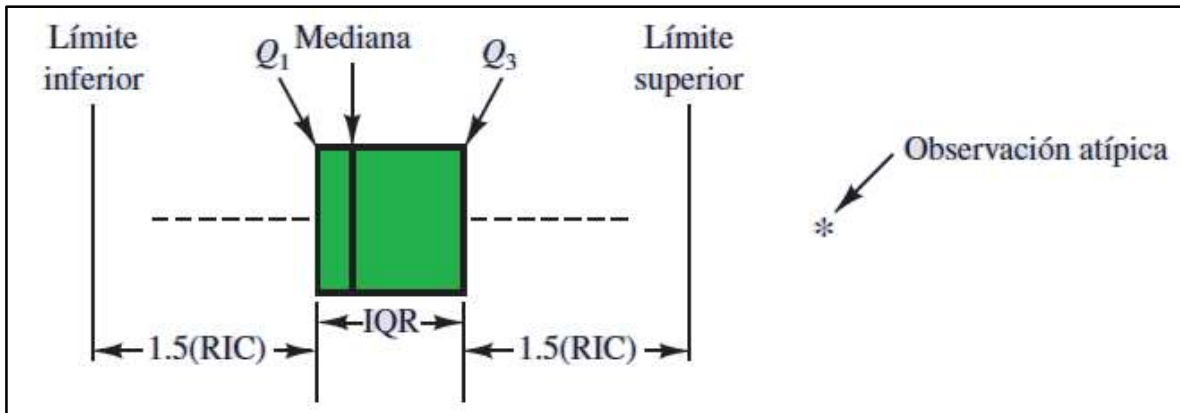


Figura 17. Diagrama de caja y sus elementos.

4.1.6 TEOREMA DE CHEBYSHEV

El teorema de Chebyshev permite decir qué proporción de los valores que se tienen en los datos debe estar dentro de un determinado número de desviaciones estándar de la media.

Por lo menos $(1 - 1/Z^2)$ de los valores que se tienen en los datos deben encontrarse dentro de Z desviaciones estándar de la media, donde Z es cualquier valor mayor que 1.

De acuerdo con este teorema para $Z=2, 3$ y 4 desviaciones estándar se tiene:

- Por lo menos 75%, de los valores de los datos deben estar dentro de $Z = 2$ desviaciones estándar de la media.
- Al menos o 89%, de los valores deben estar dentro de $Z = 3$ desviaciones estándar de la media.
- Por lo menos 94%, de los valores deben estar dentro de $Z = 4$ desviaciones estándar de la media.

4.2 APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE SERIES DE TIEMPO A LOS DATOS DE DESBALANCE DE TENSIONES.

Para el estudio de caso de desbalance se tomaron una descarga de datos de x empresa y se sacaron parámetros estadísticos que permiten visualizar el desbalance como problema fundamental en funcionamiento de motores, realizando una comparativa de desbalance de tensiones entre la norma IEEE e IEC, luego se utilizó un modelo de motor para hacer una comparación de los efectos de un motor trabajando en condiciones ideales ver el motor en condiciones de desbalance.

A continuación, se presentan los resultados del cálculo de desbalance de tensión según las normas IEEE e IEC para registros de desbalance de tensión, que corresponden a mediciones de tensiones trifásicas registradas durante 7 días consecutivos con tiempo de muestreo de 10 minutos. Luego, se aplican los modelos de tendencia (lineal, cuadrática y exponencial), de media móvil y de suavizamiento exponencial simple.

4.2.1 CÁLCULO DEL DESBALANCE DE TENSIONES

Para el cálculo de desbalance de tensiones en el alimentador con carga industrial, se utilizan tensiones de línea a línea de los 1008 registros.

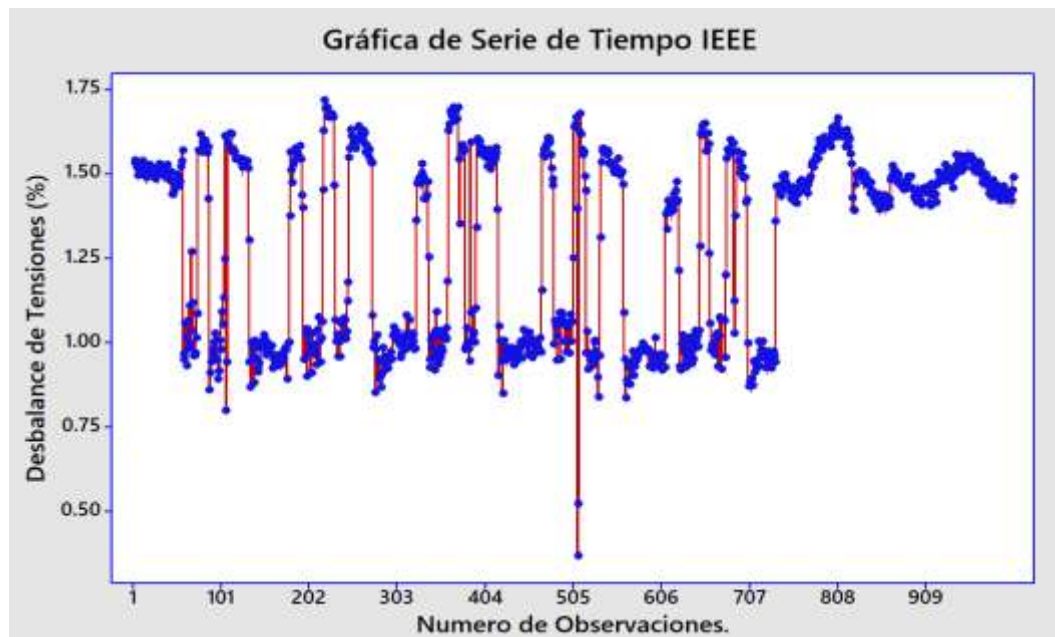


Figura 18. Gráfica de serie de tiempo del desbalance de voltaje según IEEE

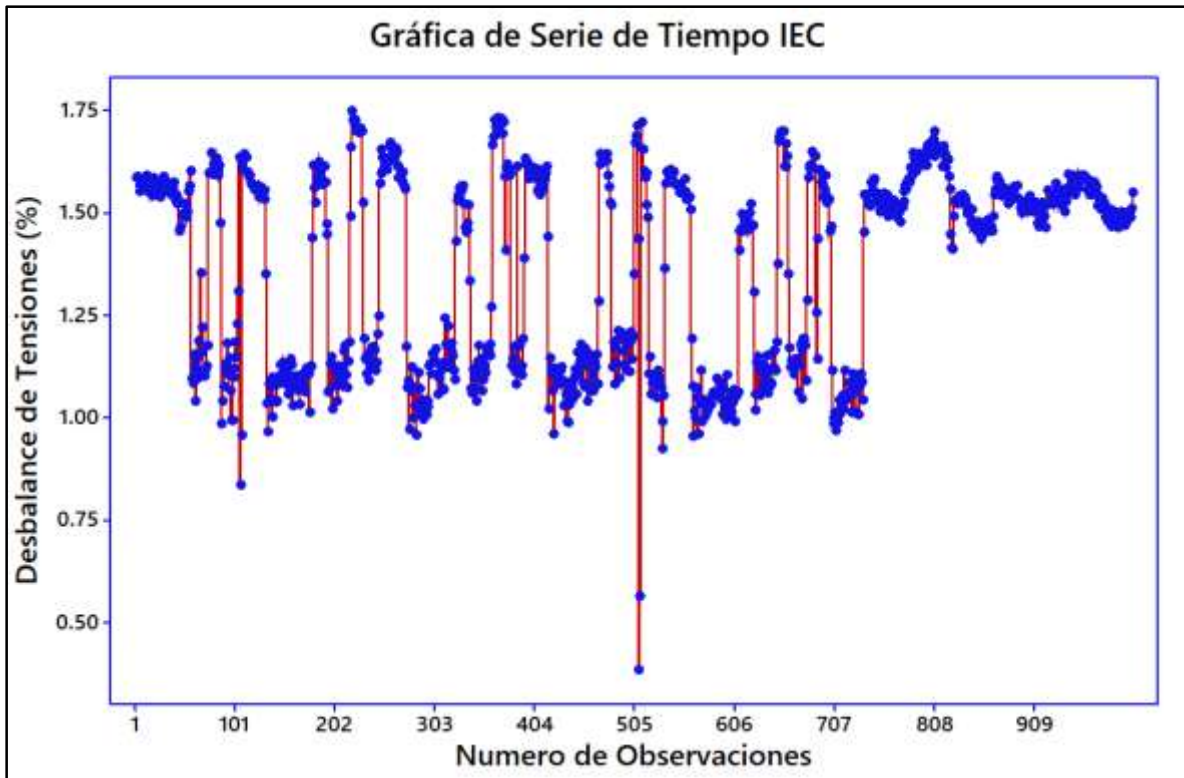


Figura 19. Gráfica de serie de tiempo del desbalance de Tensiones según IEC

En las figuras 18 y 19 no se aprecian componentes significativas en tendencia y estacionalidad, por lo cual, lo más apropiado sería considerar sólo la componente de nivel.

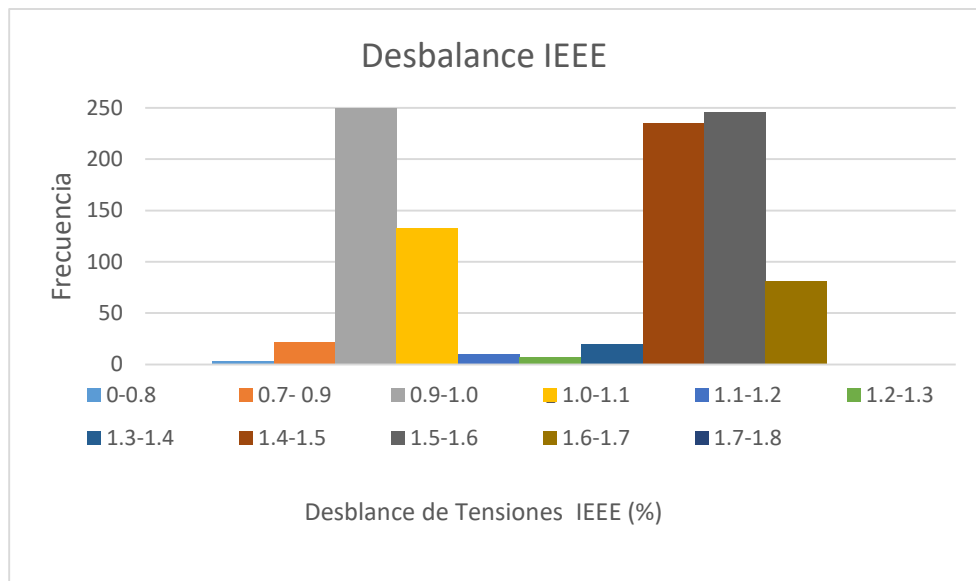


Figura 20. Histograma del desbalance de voltaje según norma IEEE

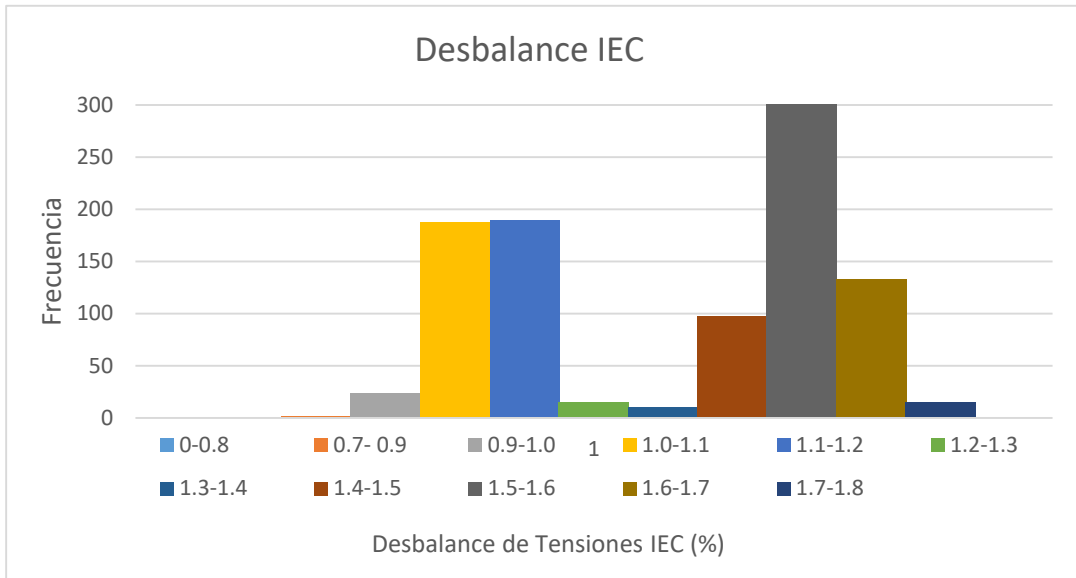


Figura 21. Histograma del desbalance de Tensiones según norma IEC

Las figuras 20 y 21 muestran los histogramas de los registros observados de desbalance de voltaje, calculado en base a 1008 datos.

A continuación, en la tabla 11 se muestra un resumen estadístico del desbalance de tensiones.

Norma	Media	Desviación Estándar	Mediana
IEEE	1.2923	0.2733	1.4378
IEC	1.3655	0.2399	1.4895

Tabla 13. Estadística descriptiva para el Desbalance de Tensiones (valores en %)

Al hacer una comparación de los límites establecidos por la normativa según los datos obtenidos podemos observar un resumen de como varía el desbalance en diferentes horas.

Desbalance de Tensiones (Un)	Norma IEEE		Norma IEC	
	nº datos	fracción del total	nº datos	fracción del total
Un < 1,0%	274	27.18%	25	2.48%
1,0 % ≤ Un < 1,5%	405	40.18%	499	49.50%
1,5 % ≤ Un ≤ 2,0%	329	32.64%	484	48.02%
Un > 2%	0	0%	0	0%

Tabla 14. Distribución datos del Desbalance de Tensiones

Como se puede observar 329 observaciones superan el 1,5% de desbalance de tensiones en una semana (según la norma IEEE), esto implica que durante 54,83 horas el desbalance de voltaje supera el 1,5%.

Por otro lado, 484 observaciones superan el 1,5% de desbalance de tensiones en una semana (según la norma IEC), esto implica que durante 80,67 horas el desbalance de tensiones supera el 1,5%.

Desde el punto de vista normativo el desbalance de tensiones máximo aceptado es del 2% para las normas IEEE e IEC, valor que se cumple en ambos casos. Sin embargo desde el punto de vista de la eficiencia energética valores cercanos al 2% producen mayores pérdidas de potencia en el sistema que posteriormente provocan un rendimiento menor.

Antes de aplicar los modelos de series de tiempo se analizan los registros para determinar la presencia de datos atípicos (outliers). Se muestran los diagramas de caja para el desbalance de tensiones según normas IEEE e IEC y la tabla 13 muestran el rango intercuartílico con sus respectivos límites.

Norma	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	Ri	Li	Ls
IEEE	0.3686	1.7171	0.9909	1.5262	0.5353	0.1880	2.3291
IEC	0.3841	1.7498	1.1128	1.5674	0.4546	0.4309	2.2493

Tabla 15. Medidas de posición y orden para el Desbalance de Tensiones (valores en %).

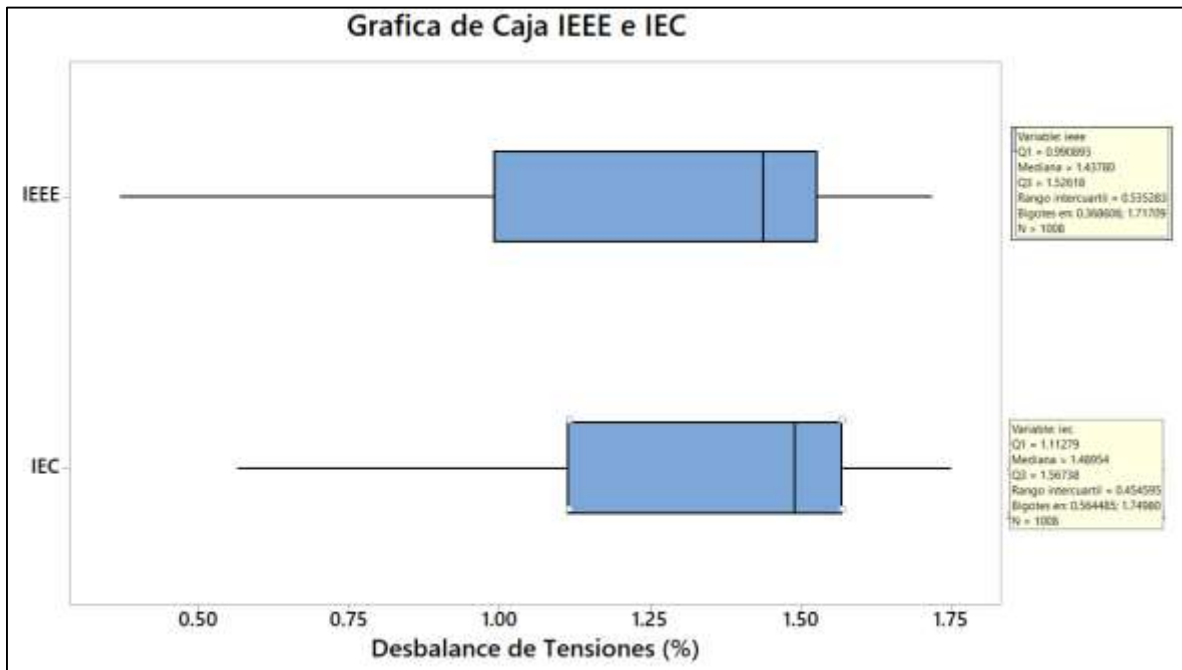


Figura 22. Gráfica de Cajas para el Desbalance de Tensión según normas IEEE e IEC.

De acuerdo a los diagramas de caja de la figura 22 no se observan outliers, ya que si existieran datos atípicos se mostrarían en la gráfica como asteriscos. Por otro lado, los límites inferior (Li) y superior (Ls) de la tabla 13 establecen el rango en el cual deben encontrarse todas las observaciones sin contener outliers, esto se cumple ya que los valores mínimos y máximos se encuentran dentro de este intervalo para ambas normas.

4.2.2 AJUSTE DE MODELOS DE SERIES DE TIEMPO

De acuerdo a los datos obtenidos se realiza los modelos de series de tiempo, presentando los modelos de tendencia lineal, tendencia cuadrática, tendencia exponencial, media móvil y suavización exponencial con sus respectivos indicadores de exactitud y ecuaciones matemáticas según corresponda.

➤ **Tendencia Lineal**

En las figuras se muestra el modelo de Tendencia Lineal del Desbalance de tensión para la norma IEEE e IEC respectivamente. Además se obtuvo los indicadores de exactitud.

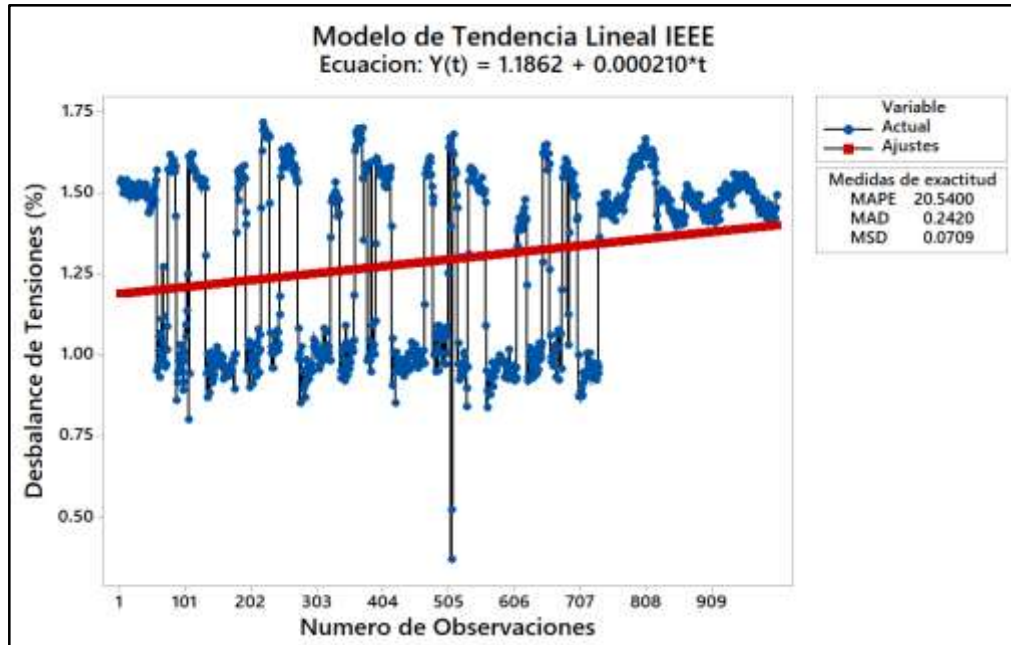


Figura 23. Tendencia Lineal para IEEE.

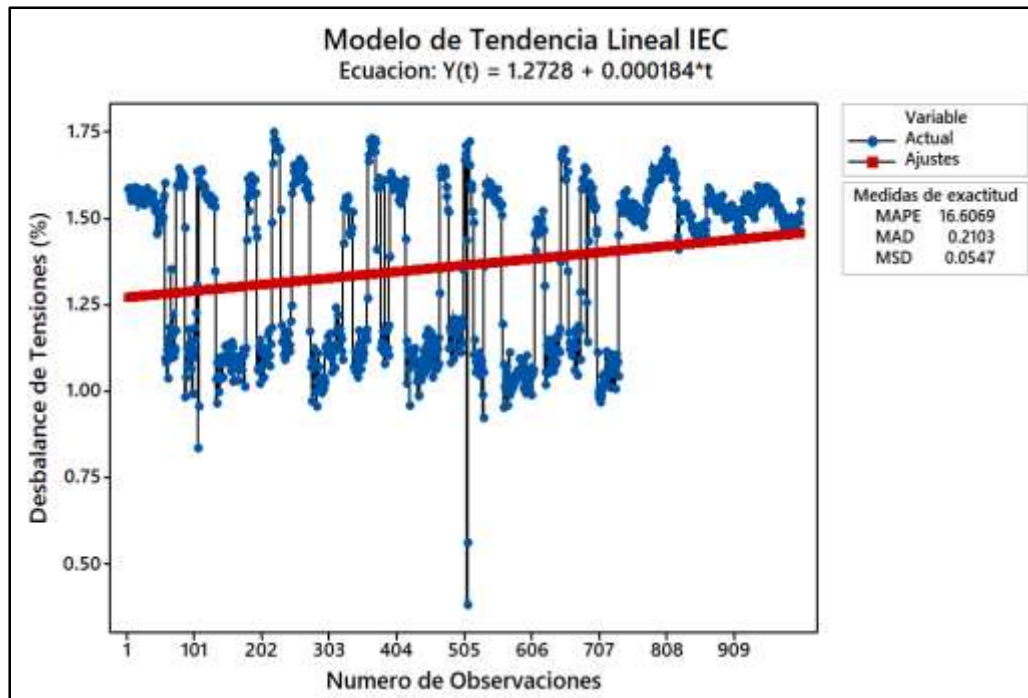


Figura 24. Tendencia Lineal para IEC.

➤ **Tendencia Cuadrática**

En la figuras 25 y 26 se muestra el modelo de Tendencia Cuadrática del desbalance de tensión para la norma IEEE e IEC respectivamente.

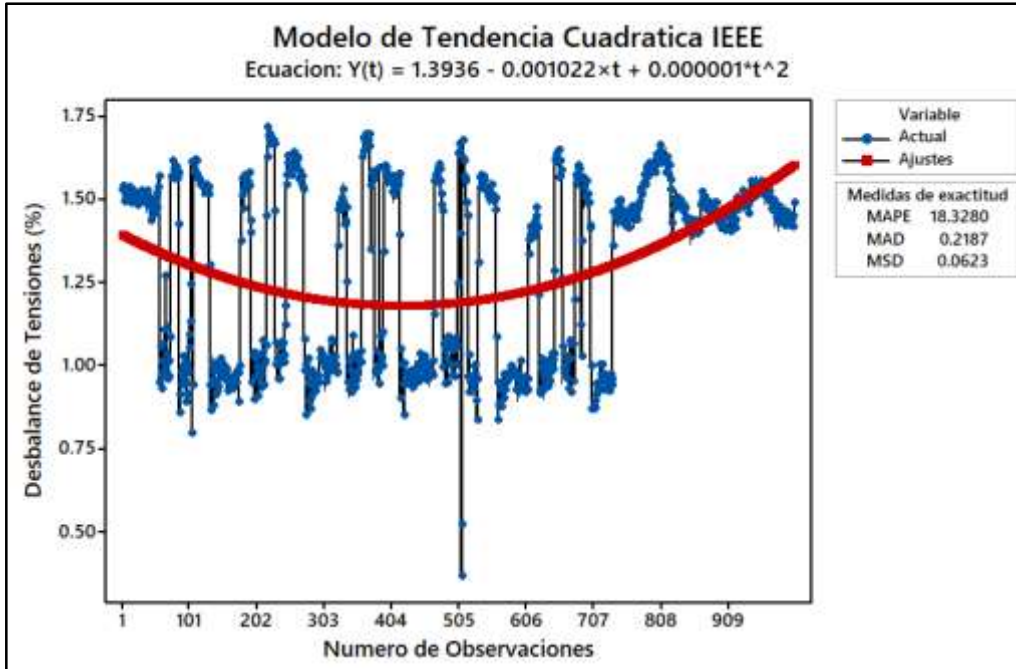


Figura 25. Tendencia Cuadrática para IEEE

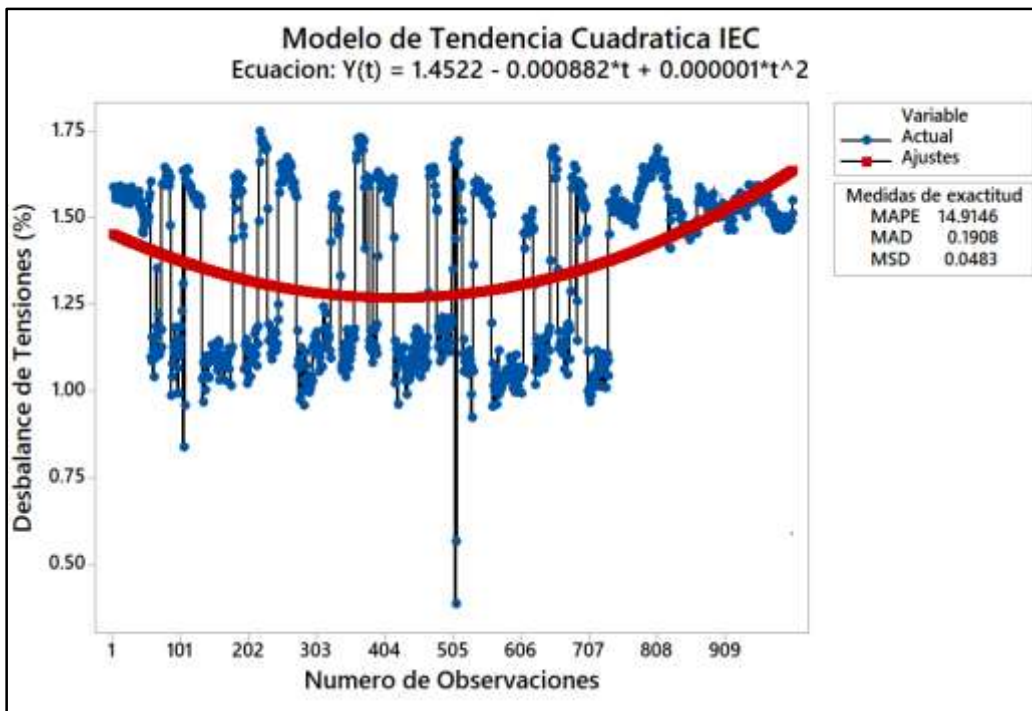


Figura 26. Tendencia Cuadrática para IEC

➤ **Tendencia Exponencial**

En la figuras 27 y 28 se muestra el modelo de Tendencia Exponencial del desbalance de tensión para la norma IEEE e IEC respectivamente.

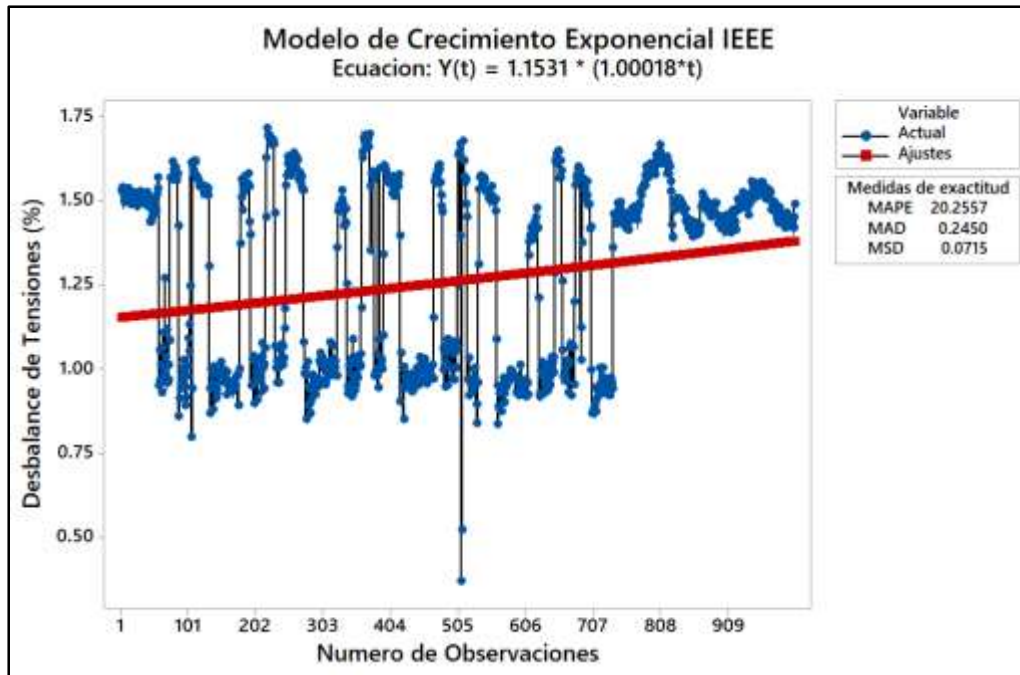


Figura 27. Tendencia Exponencial para IEEE

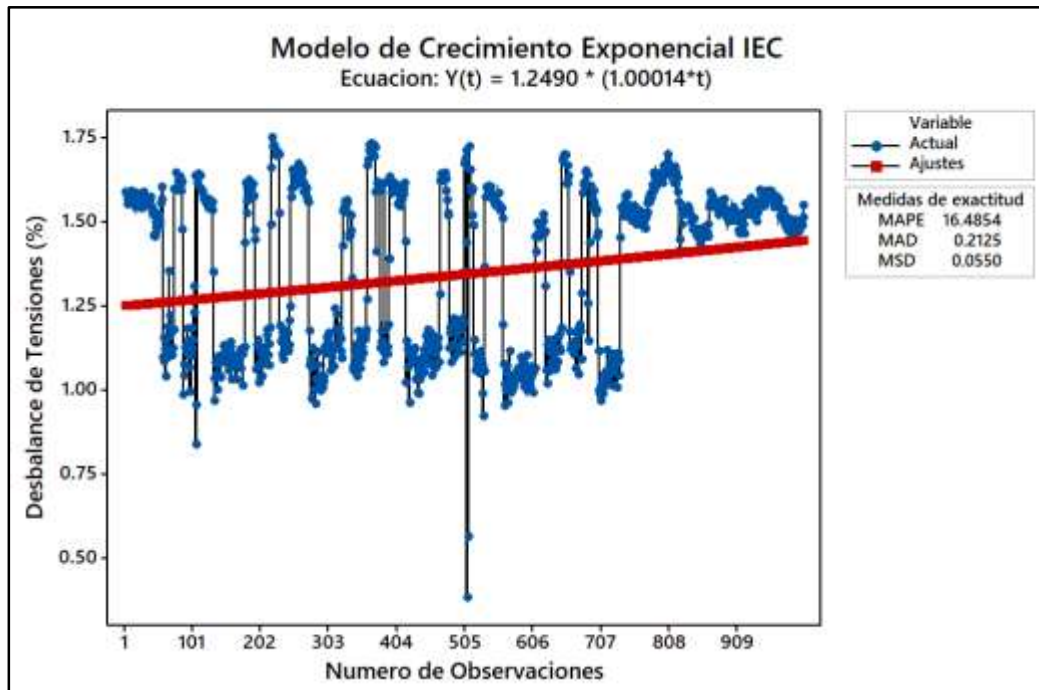


Figura 28. Tendencia Exponencial para IEC

➤ **Modelos de Media Móvil**

En las figuras 29 y 30 se muestra el modelo de Media Móvil del desbalance de tensión para la norma IEEE e IEC respectivamente. En este modelo se utiliza una longitud estacional 6, debido a que nuestros datos son cada 10 minutos, por lo tanto tenemos 6 registros en una hora.

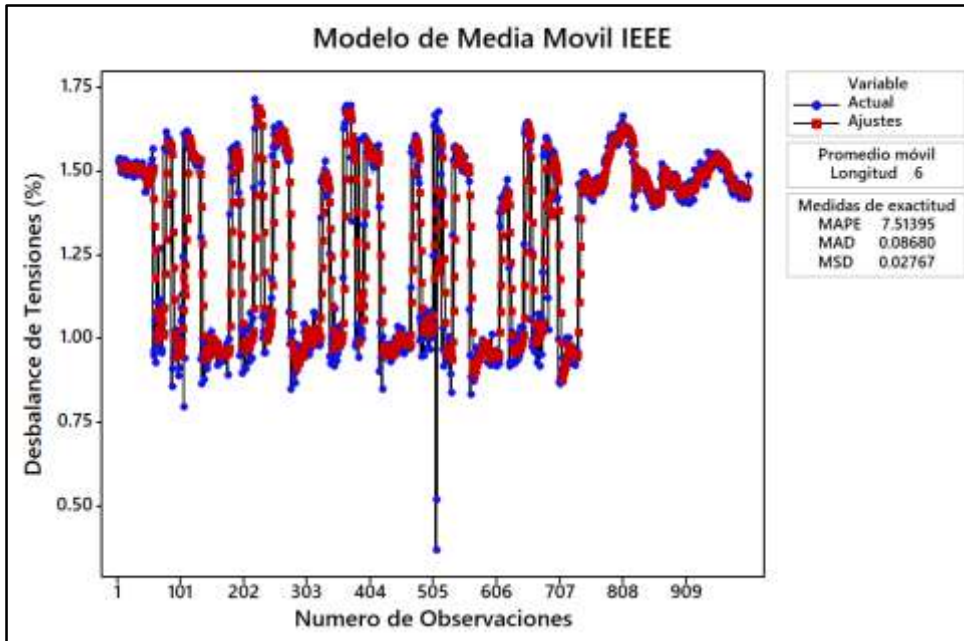


Figura 29. Media Móvil para IEEE

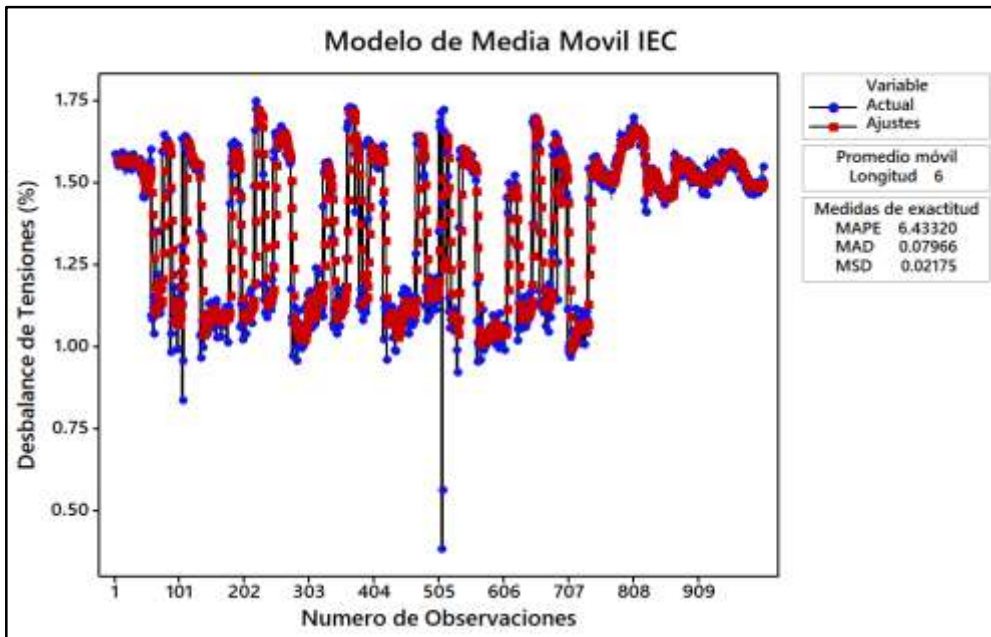


Figura 30. Media Móvil para IEC

➤ **Modelo de Suavizamiento Exponencial Simple.**

En las figuras se muestra el modelo de Suavizamiento Exponencial simple del desbalance de tensiones para cada norma respectivamente. Debemos tener en cuenta que la constante de suavización debe ser menor a 1 ($0 < \alpha < 1$), por lo que se utiliza 0,85 porque es un valor conservador, aceptable, significativo y representativo del comportamiento de los datos, pero teniendo en cuenta que la estacionalidad como la tendencia son poco influyentes.

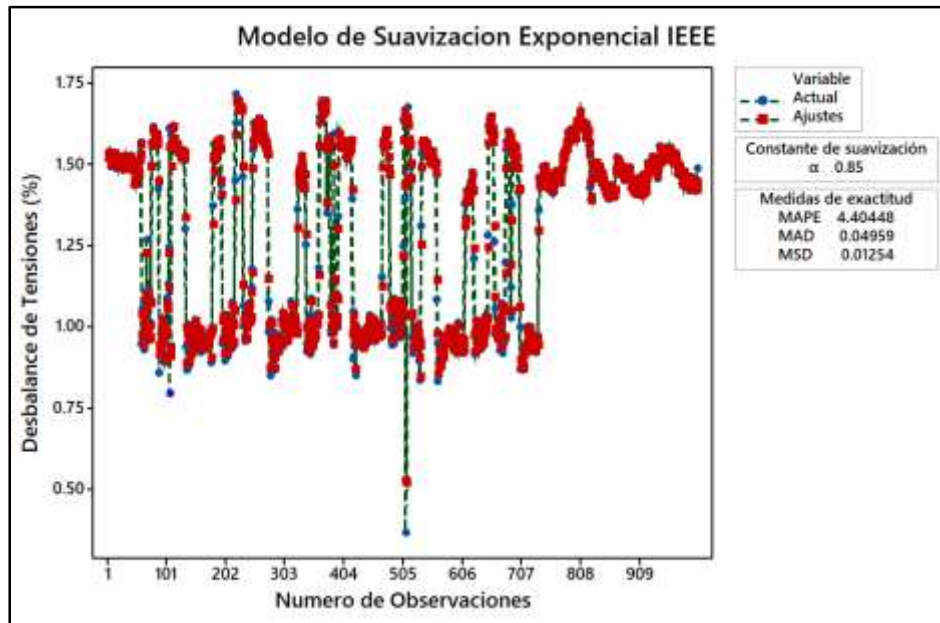


Figura 31. Suavizamiento Exponencial simple para IEEE

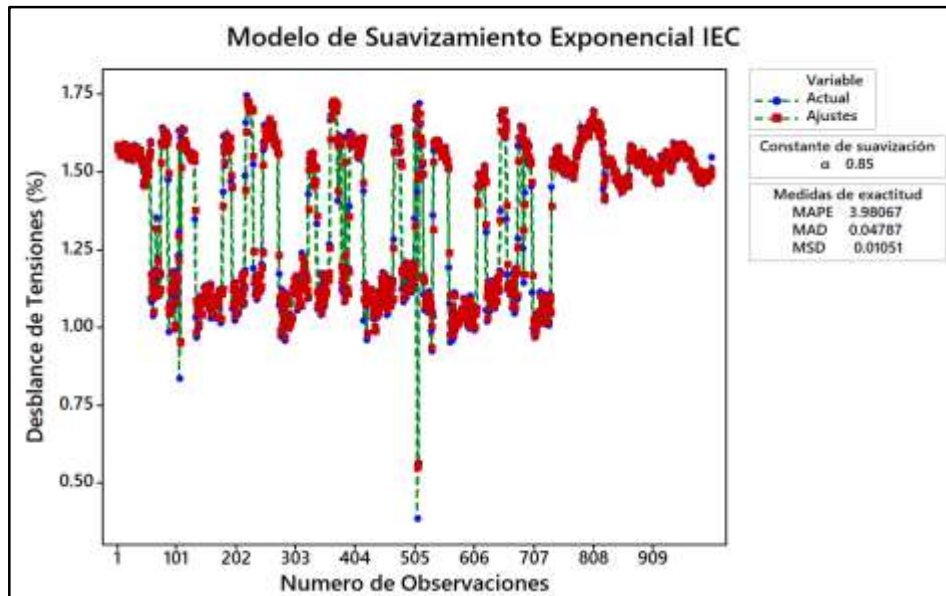


Figura 32. Suavizamiento Exponencial

4.3 ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE SERIES DE TIEMPO

4.3.1 COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS MODELOS

En las tablas se presenta el resumen de indicadores de exactitud de los modelos obtenidos anteriormente para los casos de las normas IEEE e IEC, respectivamente, con el objetivo de seleccionar el mejor modelo, utilizando los indicadores del MAPE, MAD y MSD.

Modelo	Ecuación	MAPE	MAD	MSD
Tendencia Lineal	$Y(t) = 1.1862 + 0.000210 \cdot t$	20.5400	0.2420	0.0709
T. Cuadrática	$Y(t) = 1.3936 - 0.001022 \cdot t + 0.000001 \cdot t^2$	18.3280	0.2187	0.0623
T. Exponencial	$Y(t) = 1.1531 \cdot (1.00018 \cdot t)$	20.2557	0.2450	0.0715
Media Móvil	-	7.5139	0.0868	0.0277
Suav. Exp. Simple	-	4.4045	0.0496	0.0125

Tabla 16. Resumen Indicadores de Modelos de Series de Tiempo para IEEE

Modelo	Ecuación	MAPE	MAD	MSD
Tendencia Lineal	$Y(t) = 1.2728 + 0.000184 \cdot t$	16.6069	0.2103	0.0547
T. Cuadrática	$Y(t) = 1.4522 - 0.000882 \cdot t + 0.000001 \cdot t^2$	14.9146	0.1908	0.0483
T. Exponencial	$Y(t) = 1.2490 \cdot (1.00014 \cdot t)$	16.4854	0.2125	0.0550
Media Móvil	-	6.4332	0.0797	0.0218
Suav. Exp. Simple	-	3.9807	0.0479	0.0105

Tabla 17. Resumen Indicadores de Modelos de Series de Tiempo para IEC.

El mejor modelo de series de tiempo, para los dos casos (IEEE e IEC), sería el modelo de suavizamiento exponencial simple, debido a que los indicadores MAPE, MAD y MSD son menores.

4.3.2 ANÁLISIS DE LAS ESTIMACIONES DEL DESBALANCE DE TENSIONES

Las tablas 16 y 17 muestran las estimaciones para el desbalance de tensiones según las normas IEEE e IEC respectivamente, como resultado de la aplicación del modelo de suavizamiento exponencial simple.

Desbalance de Tensiones según IEEE (valores en %)			
Tipo Estimación	Límite Inferior	Pronóstico	Límite Superior
Estadística Descriptiva	0.48210	1.29432	2.10654
Modelo Suav. Exp. Simple	1.36705	1.48377	1.60050

Tabla 18. Estimación del Desbalance de Tensiones. (IEEE)

Desbalance de Tensiones según IEC (valores en %)			
Tipo Estimación	Límite Inferior	Pronóstico	Límite Superior
Estadística Descriptiva	0.65743	1.36743	2.07744
Modelo Suav. Exp. Simple	1.43061	1.54315	1.65569

Tabla 19. Estimación del Desbalance de Tensiones (IEC)

De las tablas 16 y 17 se puede apreciar la estimación acompañada de un intervalo de confianza del 95%, con los límites inferior y superior en los extremos y el pronóstico como media.

El modelo de suavizamiento exponencial entrega un mejor ajuste que el de la estadística descriptiva, debido a que el intervalo de confianza es más pequeño, y por lo tanto, más preciso. El intervalo de confianza de la estadística descriptiva se construyó basándose en la desigualdad de Chebyshev con $Z = 3$ como se explicó en la sección 4.1.6 donde el 89% de los datos se encuentra dentro del intervalo (media ± 3 desviación estándar). Por otro lado, el intervalo de confianza del modelo de suavizamiento exponencial simple se construyó con un 5% de nivel de significancia.

La información del pronóstico que entregan las tablas es determinante para la evaluación del “Derating Factor” del sistema eléctrico, ya que con ese dato se calcula el rendimiento energético del alimentador.

4.4 MODELO Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO SELECCIONADO

Para medir la influencia del desbalance de tensiones en el rendimiento del alimentador se utiliza la ecuación siguiente que se desprende de la norma NEMA,

descrita en la figura, que en términos sencillos cuantifica la reducción de potencia en el sistema eléctrico debido al nivel de desbalance de voltaje.

$$1 + \frac{2 * (\text{porcentaje de desequilibrio})^2}{100} = \left(\frac{\text{porcentaje de carga}}{100} \right)^{-1.7}$$

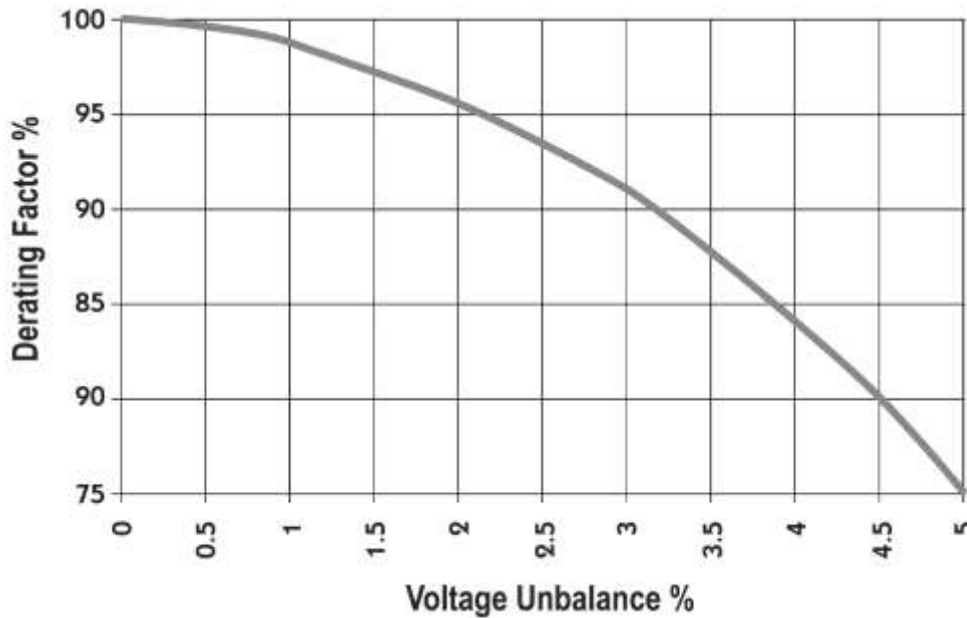


Figura 33. Factor de reducción media de potencia del motor debido al desbalance de Tensiones.

En la tabla siguiente se aprecia que al aumentar el desbalance de voltaje la reducción media de potencia cae débilmente cuando el desbalance es inferior al 2% y cae significativamente cuando el desbalance supera el 2%. Para desbalances superiores al 5% la potencia de salida del sistema se reduce aproximadamente al 77%, esto según los datos obtenidos en las mediciones.

Desbalance de Tensiones	2.0%	2.5%	3.0%	3.5%	4.0%	4.5%	5.0%
Derating Factor	95.57%	93.31%	90.72%	87.90%	84.93%	81.87%	75.70%

Tabla 20. Evaluación de la reducción de Potencia Media del motor debido al Desbalance de tensiones.

En la tabla siguiente se muestra el porcentaje de pérdida de potencia del sistema eléctrico estudiado, utilizando el indicador “Derating Factor”. Se evalúan las normas IEEE e IEC y las estimaciones generadas por la estadística descriptiva y el modelo de suavizamiento exponencial simple.

Norma	Tipo estimación	Desbalance de Tensiones	Derating Factor
IEEE	Media Muestral	1.2943%	98.08%
	Suavizamiento exponencial simple	1.4837%	97.50%
IEC	Media Muestral	1.3674%	97.86%
	Suavizamiento exponencial simple	1.5431%	97.30%

Tabla 21. Evaluación del Derating factor para las estimaciones de Desbalance de Tensiones.

De la tabla 19 se puede apreciar que el rendimiento varía según la norma y la estimación que se aplique, apreciándose un menor rendimiento con la norma IEC y el modelo de suavizamiento exponencial.

Aun cuando los valores de desbalance de tensiones cumplen con los límites establecidos por las normas IEEE e IEC, se obtiene una estimación mayor cuando se utiliza la norma IEC.

4.4.1 MODELO SELECCIONADO

Para hacer una comparación de los datos obtenidos se realiza una comparación con un modelo ideal con características similares a los equipos que se utilizan en la industria, esto con el fin de observar los efectos de un motor trabajando en condiciones ideales versus el motor en condiciones de desbalance.

El modelo es realizado en matlab al cual con valores críticos de desbalance de tensiones de los datos obtenidos se realizara tomas de datos que se ocuparan posteriormente en una comparación económica.

➤ Descripción del modelo

El modelo utilizado para generar las condiciones es modelado en matlab con los siguientes parámetros:

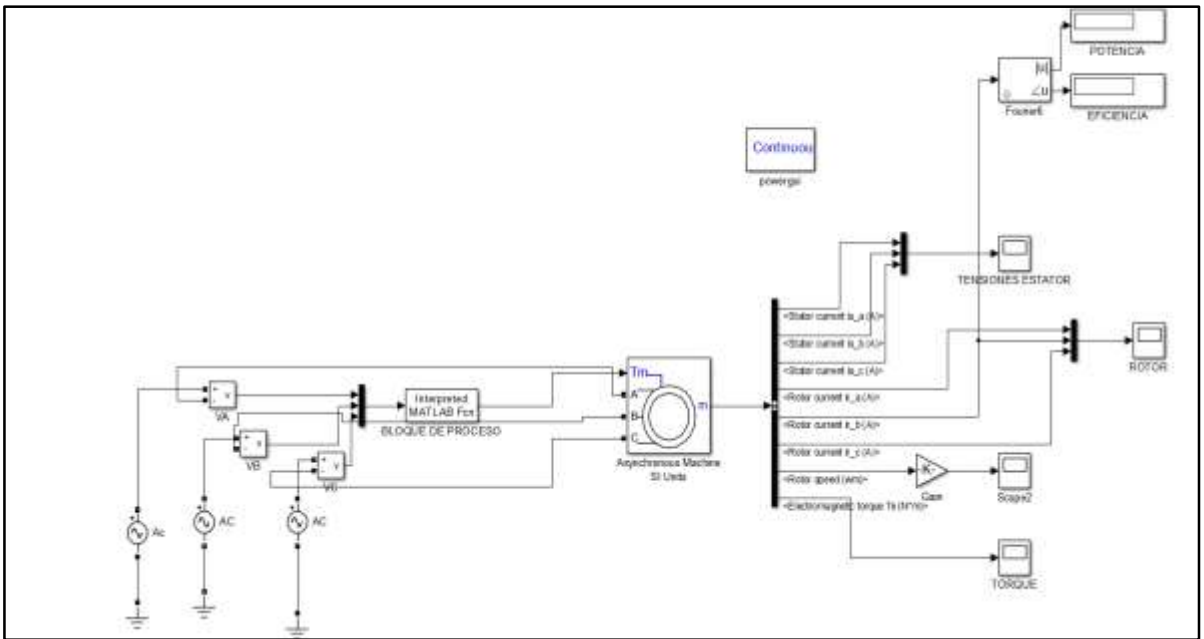


Figura 34. Modelado de Motor de Inducción en Matlab.

Los parámetros del motor utilizado son:

Un Motor de inducción Jaula de ardilla de 50 HP, que trabaja con una tensión de 460 volts de línea a línea.

➤ **Evaluación del desempeño del motor**

En la tabla siguiente se muestra el porcentaje de pérdida de potencia del sistema eléctrico estudiado, utilizando el indicador Derating Factor, para el modelo seleccionado, los datos utilizados son valores críticos de las mediciones obtenidas.

Desbalance	Eficiencia
0%	95.72%
1%	95.70%
2%	95.64%
3%	95.53%
4%	95.39%
5%	95.20%
6%	94.99%
7%	94.73%
8%	94.43%
9%	94.09%
10%	93.65%

Tabla 22. Perdida de potencia para el modelo seleccionado.

4.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL DESBALANCE DE TENSIONES.

Tener instalaciones eléctricas en mal estado puede generar mal funcionamiento de equipos, interrupciones en los procesos de producción, reducción en la vida útil de las máquinas, y en el peor de los casos accidentes laborales, cada uno de estos acontecimientos tienen un efecto final en común, lo que es las pérdidas económicas. Ante estas circunstancias sería imprudente y poco productivo, no tomar medidas en busca de soluciones a este tipo de problemas en la industria. En el escenario comercial cada vez más competitivo y exigente, en el que nos movemos, es necesario poner todos los medios a su alcance para asegurar que las inversiones sean rentables a lo largo del tiempo.

Un uso adecuado de un motor eléctrico se manifiesta en un ahorro de energía dentro de la industria, por ende se reducen los costos de operación y en forma simultánea se realiza una mejora en la productividad. Un proceso de operación correcto en un motor de inducción aporta la velocidad y el par adecuado sin perder la precisión, lo que contribuye a una calidad y un rendimiento más eficiente.

Utilizando los valores de la tabla 20, se ha realizado un análisis de energía y costos para verificar el aumento de la factura según el grado de desbalance de tensión que exista en la red o sistema eléctrico.

Para el cálculo de los costos de operación se utilizó la siguiente ecuación:

$$\Delta\$ = 0.746 * HP * L * N * C * \frac{1}{E}$$

Donde:

- HP: es la potencia de salida del motor.
- L: % de carga del motor.
- N: número de horas de operación.
- C: Costo de la energía.
- E: Eficiencia del motor al % de carga.

Para los cálculos la carga del motor se utilizó a un 80% de la carga, el número de horas de operación considerando que es una industria se consideró la operación de 720 horas, el valor del costo de energía se tomó de las tablas de la SIGET según la

tarifa de media potencia, la eficiencia del motor es la que se obtuvo con los parámetros del motor.

Desbalance	Costo [\$]
0%	\$ 2,446.22
1%	\$ 2,446.70
2%	\$ 2,447.89
3%	\$ 2,450.05
4%	\$ 2,452.75
5%	\$ 2,456.54
6%	\$ 2,460.90
7%	\$ 2,465.98
8%	\$ 2,472.06
9%	\$ 2,479.08
10%	\$ 2,488.04

Tabla 23. Cálculo de costos de operación neto por Desbalance de Tensiones.

Desbalance	Incremento
0%	
1%	\$ 768.45
2%	\$ 767.26
3%	\$ 765.09
4%	\$ 762.39
5%	\$ 758.60
6%	\$ 789.25
7%	\$ 815.17
8%	\$ 843.08
9%	\$ 856.07
10%	\$ 889.11

Tabla 24. Incremento de Costo por Desbalance de Tensiones.

En las tablas 21 y 22 se puede observar que el costo de operación es mensual y tiene un incremento según el grado de desbalance de tensiones, para ver el incremento mensual en la tabla 22 observamos que para un desbalance del 5% hay un incremento en la factura o en el costo de operación del motor de \$758.60 por lo tanto se comprueba el desbalance de tensión tiene un efecto económico en la operación de los motores y por lo tanto en la eficiencia y calidad de la producción.

CAPITULO CINCO: RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

5.1 RECOMENDACIONES PARA MEDICIONES Y CONTROL DEL DESBALANCE DE TENSIONES.

Las siguientes recomendaciones prácticas pueden ser de utilidad para que el personal de la industria examine la operación de los motores de inducción que operan con desequilibrio de tensiones, y realice acciones para protegerlos de fallas.

- ✚ La principal y más importante recomendación es que en la normativa de calidad de servicios de distribución se debería hacer una reforma de esta en la cual se incluya el desbalance con parámetros admisibles tomando en cuenta que tanto la distribuidora como el usuario deben y tiene la obligación de controlar este problema y verificar que se cumpla la normativa, si bien idealmente no debería existir desbalance se debe tomar en cuenta los parámetros tanto normativos existentes como los de fabricación para los equipos. Es importante desarrollar métodos prácticos que puedan usarse en la industria para proteger al motor en casos de desequilibrio de tensiones. El método de las componentes simétricas y los resultados experimentales pueden ser aplicados para desarrollar estas recomendaciones.
- ✚ En los últimos años se han desarrollado cambios en el diseño de motores de inducción, debido a que la crisis energética y ambiental ha obligado al uso de motores más eficientes. El año 2009 se implementaron normas en Europa y USA que clasifican a los motores de acuerdo a su eficiencia. Así la Norma IEC clasifica a los motores en: IE1 (eficiencia standard), IE2 (alta eficiencia) e IE3 (eficiencia Premium). Por otro lado en USA la norma NEMA MG1 los clasifica en: motores de alta eficiencia (EPACT) y los motores NEMA Premium. En este nuevo contexto se considera importante iniciar investigaciones sobre el efecto del desequilibrio en la desclasificación de potencia de estos nuevos tipos de motores. Considerando motores de diferente tipo de diseño y tamaño, se propone como objeto de estudio. Esto

daría mayor información para proponer una nueva curva de desclasificación que permita que los motores operen en forma más eficiente y confiable. En esta nueva curva debe considerar tanto el efecto del factor de desequilibrio VUF% como el de la tensión de secuencia positiva V1.

- ✚ La magnitud de la tensión de secuencia positiva de línea, es aproximadamente igual a la tensión promedio de las tensiones de línea. Así, calculando la tensión promedio, se conoce si el sistema tiene sobretensión o subtensión. En condiciones de desequilibrio es más perjudicial tener una tensión promedio menor a la tensión nominal, por tanto es mejor tomar mediciones aguas arribas del equipo hasta los puntos de entrega para asegurar que las tensiones no estén abajo del promedio.
- ✚ Los equipos utilizados para tomar mediciones se recomiendan que sean clase A, pues estos toman medidas de los ángulos de desfases de cada tensión y estos sirven para analizar los grados de desbalance de tensiones que hay en los sistemas, con esos datos se pueden analizar y tomar decisiones antes que los sistemas colapsen o fallen.
- ✚ El desequilibrio de corrientes del motor en vacío, necesariamente no es un indicador de fallas en el motor, pues en esta condición un desequilibrio de tensiones de 1% puede generar desequilibrios de corriente del 11%. En cambio el desequilibrio de corrientes en carga está en el rango de 4 a 7 veces el desequilibrio de tensiones. Por lo tanto la medición del desequilibrio de corrientes debe de medirse en carga.
- ✚ El estudio desarrollado en esta tesis supone que la red de alimentación tiene forma sinusoidal. Pero debido a que en la actualidad los problemas de la calidad de la potencia en los sistemas eléctricos pueden generar la presencia de armónicos de tensión en la red, lo que también puede ocurrir cuando el motor es alimentado por variadores de frecuencia. Entonces otro tema futuro

de trabajo es el estudio de la desclasificación de potencia que incluya el efecto del desequilibrio de tensiones y de los armónicos de tensión.

5.2 CONCLUSIONES

Para finalizar este trabajo de investigación y análisis de desbalance de tensiones de un sistema eléctrico industrial compuesto mayoritariamente por motores trifásicos, se puede concluir lo siguiente:

- Entre los diferentes métodos de cálculo de desbalance el definido por la norma IEC resulta ser el más riguroso ya que al utilizar componentes simétricas podemos destacar que toma en cuenta la magnitud y el ángulo de desfase y eso toma una clara diferencia con los otros métodos porque al tomar solo la magnitud no podemos tener una exactitud que complemente dichas mediciones, así para el análisis utilizando parámetros estadísticos las estimaciones de desbalance de tensiones resultan ser más precisas con el modelo de suavizamiento exponencial simple, el desbalance de tensiones según norma IEEE es 1.48% y según IEC es 1.54% con lo cual se infiere que el desbalance es mayor cuando se utiliza la norma IEC, es decir existe diferencia en el uso de la norma.

Los equipos trifásicos operando con tensiones desbalanceadas generalmente funcionan en forma inadecuada, pudiendo sufrir daños y reducción de su vida útil. Según se establece en la norma IEEE 1159 un desbalance de 3,5% en tensión puede resultar en un 25% de aumento del calentamiento en algunos motores. Un nivel excesivo de desequilibrio de tensión puede tener serios impactos en la conexión a la red de motores de inducción. Tal desequilibrio en las corrientes de línea, puede llevar a pérdidas excesivas en el estator y el rotor, que provoca que los sistemas de protección operen, causando pérdida de producción, y eficiencia.

- ✚ Definir parámetros totalmente normativos es difícil pues desde el punto de vista ingenieril se debe tomar en cuenta los efectos que se tiene con tan solo un 1% de desbalance de tensiones, y como el crecimiento de este deteriora los equipos, por tanto si el usuario es multado por tener defectos en su instalación, la distribuidora debería de ser multada si es ella quien genera este problema por eso se habla de la regulación y renovación normativa para que eficientemente los sistemas eléctricos funcionen y no hayan defectos en los equipos.
- ✚ En última instancia los clientes son los que incurren a grandes costos cuando hay desbalance de tensiones, estos son altos pues no solo genera costos de energía sino también costos de equipo no solo en motores como lo hemos estudiado sino también a transformadores, conductores eléctricos en general, cargas monofásicas, etc. También genera reacciones en cadenas pues al tener desbalance de tensiones también este genera Armónicos y Flicker que igualmente dañan los equipos. Y para tal demostración los registros de desbalance de tensiones estudiados en este trabajo con la norma IEEE se obtiene un Derating factor igual a 97,5% y con la norma IEC se obtiene un Derating factor de 97,3%, por lo tanto cuando se usa la norma IEEE se obtiene mejor eficiencia energética en el proceso.
- ✚ De la conclusión anterior se puede decir que la eficiencia y el factor de potencia dependen de la magnitud de $V1$ y del VUF. El factor de potencia aumenta a medida que la magnitud de $V1$ disminuye. Para un $V1$ constante, variaciones de VUF% de 5% disminuye la eficiencia aproximadamente en 1%. Asimismo el efecto de la magnitud de $V1$ sobre la eficiencia depende del tipo de diseño del motor.
- ✚ Actualmente a nivel industrial la curva de desclasificación NEMA es la más aplicada para el ajuste de la potencia en condiciones de desequilibrio de tensiones. Esta curva publicada en 1978 por la NEMA MG1, está basada en

pruebas experimentales sobre motores diseñados en la década del 60. La evolución en los diseños de motores en la última década y los resultados obtenidos en este estudio, sugieren que la aplicación de la curva de desclasificación NEMA para condiciones de desequilibrio de tensiones debe ser reconsiderada con el propósito de proponer límites más adecuados.

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Norma De Calidad Del Servicio De Los Sistemas De Distribución SIGET. Dic2014.
- ✓ Norma “NEMA MG1-2009: Motors And Generation”, Published By National Electrical Manufacturer’s Association, 2009, Sección 14.36.
- ✓ ANSI Standard C84.1-2006. American National Standard For Electric Power Systems And Equipment-Voltage Ratings (69 Hz). American National Standards Institute, 11 West 42 Street, New York, NY 10036.
- ✓ IEEE STD 1159,” IEEE, Tech. Rep., 1995, IEEE Recommended Practice For Monitoring Electric Power Quality.
- ✓ IEC 61000-4-30,” International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 2003, Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing And Measurement Techniques - Power Quality Measurement Methods.
- ✓ IEC 61000-2-2,” International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 1990, Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2-2: Compatibility Levels For Lowfrequency Conducted Disturbances And Signaling In Public Low-Voltage Power Supply Systems.

- ✓ EN 50160. Características De La Tensión Suministrada Por Las Redes Generales De Distribución. 1999.
- ✓ Quispe, E.; Viego, P. And Cogollo, J., Statistical Equations To Evaluate The Effects Of Voltage Unbalance On The Efficiency And Power Factor Of A Three-Phase Induction Motors. Weseas Transaction On Circuit And Systems. Issue 4, Volume 4, April 2005.
- ✓ Quispe, E. C.; López-Fernández, X. M., Mendes, A. M. S.; Marquez Cardoso, A. J. And Palacios, J. A., Experimental Study Of The Effect Of Positive Sequence Voltage On The Derating Of Induction Motors Under Voltage Unbalance, Proceedings Of The Ieee International Electric Machines And Drives Conference (Iemdc 2011). May 15-18, 2011.
- ✓ Pragasen Pillay, Peter Hofmann Y Marubini Manyage, “Derating Of Induction Motors Operating With A Combination Of Unbalanced Voltages And Over Or Undervoltages”, IEEE Transaction On Energy Conversion, Vol.17, N°4, Diciembre 2002.
- ✓ Jay L. Devore, Probabilidad Y Estadística Para Ingeniería Y Ciencias, Sexta Edición, Editorial Thomson, México, 2005.
- ✓ Marcos A. De Armas Teyra, Julio R. Gómez Sarduy Y Carlos Pérez Tello, “Análisis De Un Sistema De Potencia Desbalanceados Mediante Herramientas Estadísticas. Empleo De Coeficientes Complejos Y Modelación Por Redes Neuronales Artificiales”, Revista Energética 37, Julio, 2007.
- ✓ Burchi, Cristian Lazaroiu, Nicolae Golovanov Y Maria Cristina Roscia, “Estimation Of Voltage Unbalance In Power System Supplying High Speed Railway”, Electrical Power Quality And Utilisation, Journal Vol. Xi, No.2, 2005.