

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



**ANÁLISIS DE LA NORMA DE CALIDAD DEL SERVICIO DE
LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE SIGET: A)
DESBALANCE DE TENSIONES B) INDICADORES DE
DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE**

PRESENTADO POR:

**NELSON NOÉ RAMÍREZ DÍAZ
JONÁS ESTEVIS ROSA MONGE
GABY STANLEY VÍCHEZ PINEDA**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO:

DOCTOR EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**ANÁLISIS DE LA NORMA DE CALIDAD DEL SERVICIO
DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE SIGET: A)
DESBALANCE DE TENSIONES B) INDICADORES DE
DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE**

Presentado por:

**NELSON NOÉ RAMÍREZ DÍAZ
JONÁS ESTEVIS ROSA MONGE
GABY STANLEY VÍCHEZ PINEDA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

SAN SALVADOR, NOVIEMBRE DE 2021

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha lunes 25 de octubre de 2021 de 2021, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 2:00 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

2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma

pos: 
Firma



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

- ING. ARMANDO MARTINEZ CALDERON
(Docente Asesor)


Firma



- MSC. LUIS ROBERTO CHEVEZ PAZ

Firma



- INGRA. ANA MARIA FIGUEROA DE MUNGUIA

Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

ANÁLISIS DE LA NORMA DE CALIDAD DEL SERVICIO DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE SIGET: A) DESBALANCE DE TENSIONES. B) INDICADORES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE

A cargo de los Bachilleres:

- ROSA MONGE JONÁS ESTEVIS

- RAMÍREZ DÍAZ NELSON NOÉ

- VÍCHEZ PINEDA GABY STANLEY

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 9.1

(nove punto uno =)

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a DIOS TODOPODEROSO por haberme permitido llegar al final de mis estudios universitarios.

A mi familia por el apoyo incondicional que siempre me brindaron en diferentes aspectos a lo largo de este camino para llegar a ser profesional, a pesar de todas las situaciones difíciles que tuvimos en todo este periodo de tiempo siempre estuvieron ahí para mí.

Quiero agradecer especialmente al Ing. Armando Martínez Calderón, por darnos la oportunidad de ser nuestro asesor y brindarnos sus valiosos e invaluable conocimientos, en lo personal gracias por ser mi mentor, mi guía y enseñarme que la ingeniería no son solo números y letras.

Otro agradecimiento especial a “El Cartón SV”, un grupo de amigos que siempre estuvieron apoyando en todo momento y aun nos seguimos apoyando, al igual que el entretenimiento de la “hora feliz” que nunca faltó en el grupo de chat.

A mis compañeros de trabajo de graduación por habernos ayudado a completar esta etapa. Al Sr. Salvador Posada y Juan (a pesar de ser como es) gracias por esa amistad sincera. A niña Reina que a pesar de tener un carácter duro me dio los lineamientos necesarios para poder cumplir con mis asuntos académicos y labores en el trabajo demostrando ser una persona que muchos deberían conocer. Gracias a todos aquellos que estuvieron a lo largo de este capítulo en mi vida. ¡MUCHAS GRACIAS!

Nelson Noe Ramírez Diaz

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por regalarme tiempo de vida y las habilidades necesarias para poder terminar este documento.

A mi tutor Ing. Armando Calderón, quien con sus conocimientos y apoyo me guió a través de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba.

También, quiero agradecer a todos mis amigos, ese grupo de personas con los cuales he compartido muchas historias buenas y malas, a los cuales estimo mucho, autodenominados “El Cartón SV”. En los cuales siempre encontré una mano extendida dispuestos ayudar en lo que se necesitara. Agradecimientos especiales a David Cardona, el cual parecía un tutor más para el desarrollo de este documento.

A mi familia, por apoyarme en todo momento aun cuando todo parecía complicado. Mis hermanas Nora y Marleni por creer en mí y apoyarme en todo lo que estuvo a su alcance. A mis sobrinos Alan y Dylan por ser un motorcito más de alegría en este camino.

En especial, quiero hacer mención de mis padres, que siempre estuvieron ahí para darme palabras de apoyo y un abrazo reconfortante para renovar energías. Y que al día de hoy Dios los tiene en su gloria, este documento es dedicado a ellos, a mis padres que dieron todo de si para poder verme cumplir mis metas. Los extraño.

En memoria de María M. Monge y José V. Rosa.

Muchas gracias a todos.

Jonás Estevis Rosa Monge

Agradecer a Dios primero por permitirme culminar mis estudios universitarios, por darme inteligencia, sabiduría, paciencia y salud, y sobre todo haberme cuidado hasta el final.

Agradezco a mis padres por todo el apoyo incondicional que me han brindaron a lo largo de toda mi vida, a mi esposa y mi hijo por ser la inspiración que nunca me llevo a rendirme.

Al Ing. Armando Martínez Calderón por habernos tenido paciencia y habernos asesorado en todo tiempo para poder concluir con este trabajo de graduación, también a agradecerle al señor Salvador Posada laboratorista de la Escuela de Ingeniería Eléctrica por su amistad y ayuda brindada, a niña Irma esposa del señor Posada por brindarnos esa amistad tan sincera

También un agradecimiento a mis amigos, Carolina Ramos, Jorge Carpio, Francisco Chevez, quienes siempre me dieron animo en aquellas situaciones que parecían difíciles, gracias por todas sus palabras de ánimo.

A mis compañeros de tesis que a pesar de los obstáculos y dificultades que nos encontramos en la realización de nuestro trabajo de graduación siempre supimos coordinarnos para superar esas situaciones y finalmente a todas las personas que ayudaron de una u otra forma a la realización de este trabajo de graduación gracias por su ayuda, que Dios los bendiga a todos.

Gaby Stanley Vichez Pineda.

CONTENIDO

INTRODUCCION	17
OBJETIVOS	20
ALCANCES	21
ANTECEDENTES	22
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
JUSTIFICACION	24
CAPITULO I: GENERALIDADES	25
1.1 DESBALANCE DE TENSION	25
1.2 CAUSAS, EFECTOS Y CONSECUENCIAS DEL DESBALANCE DE TENSIÓN	26
1.2.1 QUE ES EL DESBALANCE DE TENSIONES Y QUE LO PRODUCE 26	
1.2.2 CONSECUENCIA DEL DESBALANCE DEL VOLTAJE EN MOTORES ELÉCTRICOS	27
1.3 ARMÓNICOS DE CORRIENTE	32
1.3.1 DISTORSION ARMONICA	32
1.4 CAUSAS, EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS ARMÓNICOS DE CORRIENTE	34
1.4.1 EFECTOS DE LA DISTORCION ARMONICA EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS	34
1.5 SOLUCIONES QUE EXISTEN PARA CONTRARRESTAR LOS ARMÓNICOS	37
1.6 FUENTES QUE PRODUCEN ARMÓNICAS	38
1.7 EFECTO DE LOS ARMÓNICOS SOBRE LOS MOTORES	39
CAPITULO 2. NORMA DE CALIDAD DE SERVICIO NACIONAL E INTERNACIONAL	41
2.1 CALIDAD DE SERVICIO EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	41
2.2 NORMAS DE CALIDAD DEL SERVICIO DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN (SIGET)	42
2.3 ESTRUCTURA DE LA NORMA DE CALIDAD DE SERVICIO SIGET ..	42

2.3.1	PRODUCTO TÉCNICO: A) DESBALANCE DE TENSIÓN.....	43
2.3.2	PRODUCTO TÉCNICO: B) ARMÓNICOS	43
2.4	NORMATIVAS INTERNACIONALES	46
2.4.1	DESBALANCE DE TENSION.....	46
2.4.1.1	IEEE.....	46
2.4.1.2	ANSI/NEMA.....	47
2.4.1.3	IEC	48
2.4.1.4	MÉTODO POR COMPONENTES SIMÉTRICAS.....	49
2.4.1.5	MÉTODO ALTERNATIVO O ABREVIADO	49
2.5	ARMONICOS DE CORRIENTE.....	50
2.5.1	IEC 61000-3-2.....	50
2.5.2	IEEE 519-1992.....	52
CAPITULO 3. CRITERIOS DE MEDICION.....		55
3.1	CRITERIO DE MEDICIÓN PARA EQUIPOS SEGÚN NORMATIVA NACIONAL SIGET, IEC 61000-4-30, IEEE STD 1159-1995.....	55
3.1.1	SIGET	55
3.1.1.2	PRODUCTO TÉCNICO: A) DESBALANCE DE TENSIÓN.....	56
3.1.2	IEC	56
3.1.3	IEEE STD 1159-1995.....	59
CAPITULO 4. CALCULADOR DE PERDIDAS POR DESBALANCE		60
EN MOTORES TRIFASICOS.....		60
4.1	DESCRIPCIÓN DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN.....	60
4.2	PARÁMETROS DE MEDICIÓN EN MOTORES ASÍNCRONOS	62
4.3	METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA CALCULADOR DE PERDIDA UTILIZANDO UN MOTOR VIRTUAL ASÍNCRONO	63
4.3.1	ANÁLISIS MATEMÁTICO Y ECONÓMICO DE UN MOTOR TRIFÁSICO CONSIDERANDO LAS PERDIDAS POR DESBALANCE APLICANDO EL MÉTODO DE COMPONENTES SIMÉTRICAS	64
CAPITULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		74
5.1	PRESENTACIÓN DE DATOS OBTENIDOS EN CAMPAÑA DE MEDICIÓN.....	74

5.2 ANÁLISIS DE DATOS UTILIZANDO EL CALCULADOR DE PERDIDAS POR DESBALANCE DE TENSIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	75
5.2.1 ANÁLISIS DE DATOS	75
5.2.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	76
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
6.1 CONCLUSIONES	84
6.2 RECOMENDACIONES	88
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	93
GLOSARIO.....	97

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. EFECTOS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS.....	35
TABLA 2. LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE TENSIÓN EN REDES DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN.....	44
TABLA 3. LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE LA CORRIENTE DE CARGA EN MEDIA Y BAJA TENSIÓN	45
TABLA 4. LÍMITES PARA EQUIPOS DE CLASE A.....	51
TABLA 5. LÍMITES PARA EQUIPOS DE CLASE C.....	52
TABLA 6. LÍMITES PARA EQUIPOS CLASE D.....	52
TABLA 7. LÍMITES DE DISTORSIÓN ACTUALES PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN GENERAL (120 V HASTA 69 000 V).....	53
TABLA 8. LÍMITES DE DISTORSIÓN ACTUALES PARA SISTEMAS DE SUBTRANSMISIÓN GENERALES (69001 V HASTA 161000 V).....	53
TABLA 9. LÍMITES DE DISTORSIÓN DE CORRIENTE PARA SISTEMAS DE TRANSMISIÓN GENERALES B161 KV), GENERACIÓN Y COGENERACIÓN DISPERSAS.....	54
TABLA 10. COSTO DEL CONSUMO DEL MOTOR SEGÚN FRANJA HORARIA, CONSUMO DE UN AÑO.....	80
TABLA 11. PORCENTAJES DE AUMENTO SEGÚN EL DESBALANCE DE TENSIÓN.....	81

TABLA 12. DIFERENCIA PORCENTUAL DE DINERO SEGÚN DESBALANCE DE TENSIÓN.....93

TABLA 13. INCREMENTO DE TEMPERATURA SEGÚN DESBALANCE.....94

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. SISTEMA DE TENSIONES BALANCEADAS	25
FIGURA 2. SISTEMAS DE TENSIONES DESBALANCEADAS.....	25
FIGURA 3. SISTEMAS DE TENSIONES DE SECUENCIA	28
FIGURA 4. CURVAS TORQUE – VELOCIDAD DE CADA MÁQUINA ALIMENTADA POR TENSIONES DE SECUENCIA.....	29
FIGURA 5. FACTOR DE CORRECCIÓN DEL MOTOR DEBIDO AL DESBALANCE VOLTAJE	31
FIGURA 6. FORMAS DE ONDA DE UNA CARGA LINEAL.....	32
FIGURA 7. FORMAS DE ONDA DE UNA CARGA NO LINEAL	33
FIGURA 8. FORMA DE ONDA IDEAL Y FORMA DE ONDA DISTORSIONADA	33
FIGURA 9. CONTENIDO ARMONICO EN MOTORES DE INDUCCION	39
FIGURA 10. FACTOR DE REDUCCIÓN DE ACUERDO CON EL FACTOR DE TENSIÓN ARMÓNICA.....	40
FIGURA 11. INTERFAZ GRÁFICA DEL CALCULADOR DE PÉRDIDAS POR DESBALANCE	70
FIGURA 12. INTERFAZ GRÁFICA PARA SELECCIONAR EL MODELO DEL MOTOR EN FORMA MANUAL	70
FIGURA 13. FORMATO DEL ARCHIVO TXT PARA LA SELECCIÓN DE LAS TARIFAS A SER APLICADAS.....	71
FIGURA 14. SELECCIÓN DEL ARCHIVO XML DONDE SE ENCUENTRAN LAS MEDICIONES DE VOLTAJE	71

FIGURA 15. VALIDACIÓN DE DATOS SEGÚN NORMATIVA DE CALIDAD DE SIGET	72
FIGURA 16. SELECCIÓN DE LA NORMATIVA A APLICAR EN EL ANÁLISIS DEL MOTOR.....	72
FIGURA 17. MUESTRA DE DATOS OBTENIDOS EN CAMPAÑA DE MEDICIÓN.....	74
FIGURA 18. DATOS INGRESADOS AL MODELO DEL MOTOR EN FORMA MANUAL.....	75
FIGURA 19. RESULTADO FINAL DEL ANÁLISIS DE DATOS POR MEDIO DE INTERFAZ GRÁFICA.....	76
FIGURA 20. RESULTADO FINAL DEL ANÁLISIS DE DATOS POR MEDIO DE ARCHIVO DE SALIDA	77
FIGURA 21. GRÁFICO DE DESBALANCE DE TENSIÓN VS TIEMPO	77
FIGURA 22. GRÁFICO DE COSTO DE ENERGIA CONSUMIDA EN LAS DIFERENTES FRANJAS HORARIAS	78
FIGURA 23. GRÁFICO DE COSTOS POR PERDIDAS EN LAS DIFERENTES FRNJAS HORARIAS.....	79
FIGURA 24. GRÁFICO DE COSTOS POR ENERGÍA ABSORBIDA EN DÓLARES DURANTE 7 DIAS	80
FIGURA 25. GRÁFICO DE COSTOS POR PERDIDAS CTOTALES EN DINERO POR AÑO SEGÚN DESBALANCE DE TENSION	82
FIGURA 26. EFECTO DE LA DISMINUCION DE LA POTENCIA NOMINAL SEGUN EL DESBLANCE DE TENSION.....	82
FIGURA 27. GRÁFICO DE AUMENTO DE TEMPERATURA SEGÚN DESBALANCE DE TENSIÓN	83

FIGURA 28. GRÁFICO DE EFICIENCIA SEGÚN DESBALANCE DE TENSION.....95

FIGURA 29. CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SECUENCIA POSITIVA Y NEGATIVA PARA EL MOTOR DE INDUCCIÓN INCLUYENDO LAS PÉRDIDAS EN EL HIERRO. (A) CONSIDERANDO LA RAMA DE MAGNETIZACIÓN EN PARALELO Y (B) CONSIDERANDO LA RAMA DE MAGNETIZACIÓN EN SERIE (CIRCUITO EN T).....95

FIGURA 30. FLUJO DE POTENCIA EN MOTOR TRIFASICO DE INDUCCION96

INTRODUCCION

La calidad de energía es un tema que en el sector eléctrico es muy importante, para esto primero debemos definir de una manera fácil que es la calidad de energía. La calidad de energía es un término utilizado para definir la calidad del suministro de la corriente alterna en las instalaciones eléctricas en términos de tensión eléctrica, forma sinusoidal, frecuencia de operación, así como otros parámetros como armónicos, flickers, etc.

En el presente trabajo nos enfocaremos la calidad del producto técnico: desbalance de tensión y distorsión armónica de corriente. El desbalance de tensión es producido por el desbalance de corriente eléctrica en las líneas de la red o de una instalación eléctrica, que es principalmente generado por cargas monofásicas en su mayoría son motores de inducción en un sistema trifásico simétrico, pudiendo llegar a generar un consumo mayor de energía y por ende una elevación en los costos.

Un sistema trifásico se clasifica como desbalanceado cuando los módulos de la componente fundamental de las tensiones del sistema no son iguales y/o cuando los ángulos de desfase entre las tensiones del mismo no son iguales. El principal motivo para la existencia de redes trifásicas desbalanceadas lo constituye la distribución de cargas monofásicas no equilibradas a lo largo de la red, que a su vez cambia a lo largo del tiempo dependiendo de la hora del día.

El desbalance en las redes de distribución provoca pérdidas adicionales por calentamiento, así como disminución en la eficiencia de los motores de inducción trifásicos tan frecuentemente utilizados en la industria.

En la NORMA DE CALIDAD DEL SERVICIO DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN (SIGET), no se establece un indicador para poder determinar el

desbalance de tensión, por lo tanto, no se podrá establecer límites para ello, será necesario recurrir a normativas internacionales (IEEE, IEC) que si establecen un método de cálculo matemático y un indicador de la calidad del producto técnico en sí.

Para que una muestra de datos sea válida es necesario respetar los criterios y recomendaciones de medición a aplicar para cada método de análisis, es importante mencionar que cada norma nacional e internacional establece sus propios criterios para obtener una buena captura de los datos al momento de realizar la medición.

SIGET en sus indicadores de calidad de energía establece que tomara como muestras validas todas aquellas campañas de medición que tengan una duración de 7 días y obtengan un muestro de datos cada 10 o 15 minutos, hablando del producto técnico como desbalance de tensión la misma considera metodologías de medición en cuanto a periodos (7 días) e intervalos (cada 10 minutos) pero no menciona ni define técnicas, consideraciones sobre equipos para poder medir este fenómeno

IEEE en el STD 1159-1995 define pasos y procedimientos a seguir para poder obtener una buena campaña de medición, considerando aspectos importantes como cuál es el objetivo de la campaña de medición, escoger el instrumento de medición acorde a la objetivo de la medición, así como también aspectos relacionados a las limitantes de los equipos de medición tales como: condiciones ambientales en el cual se instalara el equipo de medición, alimentación del equipo medición si necesita fuente AC o DC, etc. Esta normativa aporta también recomendaciones para la protección del equipo una vez instalado y protección a las personas al momento de colocar el equipo para realizar una campaña de medición.

De acuerdo a lo expresado en la norma IEC 61000-4-30, como metodología de medición establece un periodo e intervalos entre muestras para que la campaña sea válida para dicho

fenómeno, pero también establece criterios sobre la obtención de los datos y del equipo utilizado para la toma de los mismos.

Existen diferentes métodos de como poder determinar un desbalance de tensión en motores trifásicos, ya sea realizando mediciones directas o calculándolas o simplemente si se requiere algo más preciso y exacto, combinando ambos métodos, a medida el resultado requerido se vuelve más exacto es necesario comenzar a considerar más y más variables con el fin de obtener una respuesta más certera, esto puede hacer que los cálculos se vuelvan un poco largos, tediosos y hasta cierto punto un poco más complejos.

Para el análisis de una considerable cantidad de datos se hace uso de la herramienta de análisis (Calculador de perdidas) la cual está basada en lenguaje 'm', el cual es interpretado por el software MATLAB, esta herramienta ayuda a que el procesamiento de los datos, posee la flexibilidad de seleccionar entre modelos precargados o establecer los propios para un análisis específico de un motor, y permite observar los resultados más rápido y eficientemente.

Finalmente se presentará un análisis de la incidencia del usuario en el producto técnico y manera en cómo esto afecta la facturación de la energía eléctrica.

OBJETIVOS

GENERAL

Realizar un estudio de la calidad de servicio de energía en una empresa estatal de servicio de suministro de agua potable con base en el análisis de posible desbalance de tensiones y contenido de disposición armónica de corriente.

ESPECIFICOS

- Estudiar la ley de calidad del servicio de los sistemas de distribución de SIGET, para el análisis del producto técnico, desbalance de tensiones y contenido armónico de corriente.
- Determinar el efecto de la calidad de producto técnico: desbalance de tensiones sobre la facturación por servicio eléctrico una empresa estatal de suministro de servicio de agua potable.
- Analizar los indicadores de distorsión armónica en la ley de calidad de SIGET con normativas internacionales (IEEE, IEC).

ALCANCES

Se pretende con el siguiente estudio emitir opinión técnica sobre la necesidad que podría existir de que el desbalance de tensión sea considerado para la ley de calidad de servicio de SIGET, y adicionalmente se analizarán las consecuencias de la aplicación de la metodología actual de los límites de calidad armónico de corriente especificados en la ley actual de SIGET comparándolas con otras normas: IEEE.

ANTECEDENTES

Existen estudios preliminares realizados por la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de El Salvador que tratan el tema, pero no han establecido su efecto sobre la facturación en el consumo de energía principalmente en la operación de motores eléctricos trifásicos de inducción.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los indicadores de calidad, permisibles en la ley actual de SIGET, respecto al producto técnico deben ser evaluados por un ente independiente de las partes: distribuidora y ente regulador en este caso la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador desarrollaran un estudio y análisis de la ley actual y los efectos que a nuestro juicio deben ser corregidos en la ley SIGET o en su defecto deben ser agregadas; nuestro análisis es netamente técnico.

JUSTIFICACION

La normalización de la calidad de servicio eléctrico, tiene efectos tanto técnicos (modo de operación, fallas, pérdidas, etc.) como económicos que conllevan a pagos adicionales por cargo de energía, compra de equipos, reparaciones, etc. afectando la economía de los usuarios; por tanto la decisión de la condiciones de suministro del servicio eléctrico deben ser medidas y analizadas, en el presente trabajo pretende mejorar la función académica de nuestros estudiantes en el área de análisis de calidad de servicio eléctrico.

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 DESBALANCE DE TENSION

TENSIONES BALANCEADAS

En los sistemas eléctricos balanceados las tensiones trifásicas cumplen las siguientes características: son de igual magnitud, las fases se hallan desfasadas 120° eléctricos una de la otra, ver Figura 1.

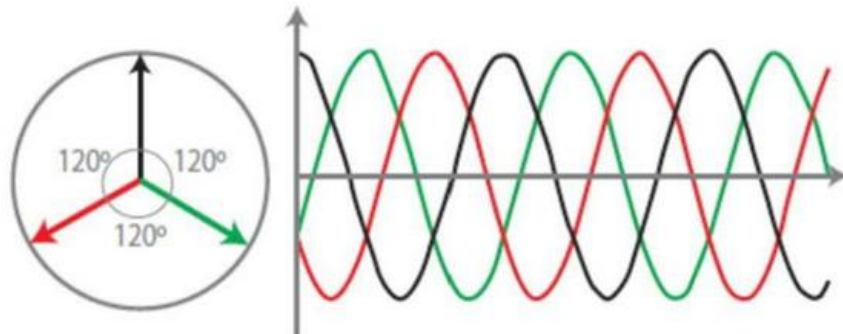


Figura 1. Sistema de tensiones Balanceadas.

TENSIONES DESBALANCEADAS.

En los sistemas eléctricos desbalanceados las tres fases presentan diferentes valores de tensión (magnitud) y un desfase angular entre fases diferente de 120° eléctricos.

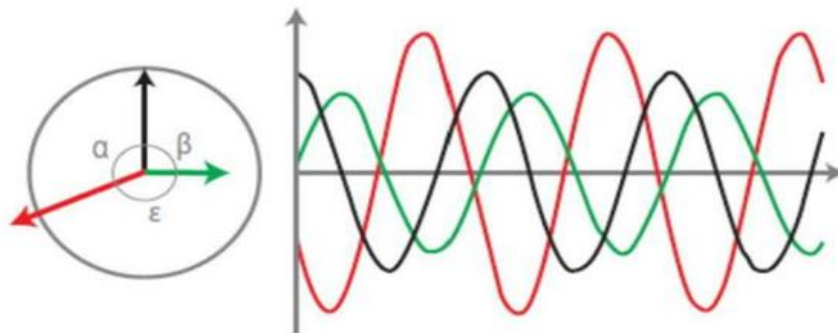


Figura 2. Sistema de tensiones desbalanceadas.

Entonces podemos decir que se considera que existe desbalance de tensión cuando el valor eficaz (Magnitud) y la separación vectorial (Angulo) entre las fases no son iguales, lo ideal es que tanto la Magnitud y el Angulo sean iguales.

1.2 CAUSAS, EFECTOS Y CONSECUENCIAS DEL DESBALANCE DE TENSIÓN

1.2.1 QUE ES EL DESBALANCE DE TENSIONES Y QUE LO PRODUCE

El desbalance de voltaje en instalaciones eléctricas es un indicador de cuan diferentes son las tensiones de un sistema eléctrico entre sí, y es expresado en valores de porcentaje. Lo ideal es que el desbalance de voltaje sea de 0%, pero en la realidad no es así, ya que este depende de muchos factores que pueden dar su origen.

El desbalance de voltaje a baja tensión se produce: cuando se incorporan cargas nuevas a un sistema eléctrico o se realizan remodelaciones sin previa planificación técnica, esto ocasiona que las fases del sistema posean diferentes niveles de carga y de corriente lo cual provoca un desbalance en el sistema eléctrico. Además, la presencia de armónicos en un sistema eléctrico puede ser el resultado de un sistema con tensiones desequilibradas.

El desbalance de voltaje afecta principalmente a los equipos trifásicos y bifásicos, por lo general estos sistemas poseen motores, ejemplo de ellos son los aires acondicionados y los sistemas de bombeo, el desbalance genera fluctuaciones de voltaje (altos/bajos) permanentes los cuales afectan el funcionamiento de estos equipos.

Entre las causas más comunes que pueden producir desequilibrio o desbalance de tensiones están:

- Deficiencias en la red principal (Compañía que supe la energía eléctrica).
- Transformadores sobrecargados.
- Los ajustes de taps en el transformador son desiguales.

- Fase abierta en el primario de un transformador de 3 fases en el sistema de distribución.
- Problemas de conexión en el banco de transformadores.
- Bancos de condensadores desequilibrados.
- Fusibles quemados o condensadores defectuosos en un banco de condensadores.
- Cargas desequilibradas.
- Mala repartición de fases en tableros de fuerza y alumbrado etc.

También el desbalance de voltaje se puede originar a niveles de media tensión, de acuerdo a la norma ANSI C84.1-1995, Electrical Power Systems and Equipment Voltage Ratings (60 Hz), ya que solamente el 66% de las tensiones de distribución entregadas por las distribuidoras eléctricas a plantas industriales está dentro del 1% de desequilibrio de fases. Entre las causas más comunes que pueden producir desequilibrio de tensiones a niveles de media tensión son:

- Pérdidas de simetría de líneas de transmisión/distribución
- Presencia de grandes cargas monofásicas (hornos de arco o de inducción, soldadoras, etc.)
- Bancos de condensadores con fallas internas de alguno de sus elementos.
- Transformadores con delta abierto o conectados en estrella.
- Equipos de protección y maniobra (interruptores, elementos térmicos, contactores) con una fase abierta.
- Cargas desequilibradas en instalaciones vecinas, etc.

1.2.2 CONSECUENCIA DEL DESBALANCE DEL VOLTAJE EN MOTORES ELÉCTRICOS

¿Pero qué sucede cuando un motor trabaja en un sistema que presenta desbalance de tensiones?, Para dar respuesta a este fenómeno es necesario analizar desde el punto de vista de las componentes simétricas y desde la Norma NEMA MG1.

Desde el punto de las componentes simétricas.

Un conjunto de tensiones trifásicas desequilibradas por medio de la transformación de Fortescue (componentes simétricas), se descompone en tres conjuntos de tensiones simétricas equilibradas: un conjunto de secuencia positiva, uno de secuencia negativa y un conjunto de tensiones mono polares (secuencia cero). Esta transformación es lineal y se puede escribir cada tensión original como una combinación lineal de los tres sistemas de tensiones anteriores. Las amplitudes de las tensiones de secuencia positiva, negativa y cero no son iguales entre sí, y dependen del grado de desequilibrio que presenten las tensiones trifásicas reales. Sin embargo, como son sistemas simétricos, la tensión de secuencia positiva de la fase “U” será idéntica en magnitud que la tensión de secuencia positiva de las fases “V” y “W” (en un sistema trifásico denominado U-V-W). Un sistema trifásico real perfectamente equilibrado tendrá solamente tensiones de secuencia positiva. La figura 3. Muestra un sistema de tensiones de secuencia. A la izquierda, se muestra el sistema de tensiones de secuencia positiva; al centro el sistema de tensiones de secuencia negativa, y a la derecha, el sistema de tensiones de secuencia cero.

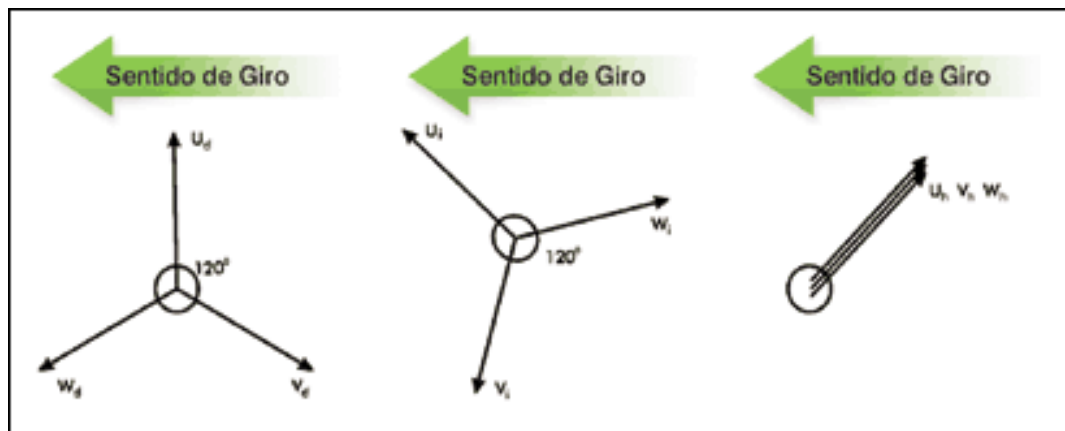


Figura 3. Sistemas de tensiones de secuencia.

Si se tiene un conjunto de tensiones trifásicas desequilibradas al aplicarlas a un motor, será como tener tres máquinas similares unidas por el eje y cada una alimentada con un conjunto simétrico de tensiones. Así, la máquina con tensiones de secuencia positiva

girará en sentido positivo, la máquina con tensiones de secuencia negativa tenderá a girar en sentido contrario, mientras que la máquina con tensiones monopolares (secuencia cero), sólo producirá flujos unipolares y producirá torques con velocidades sincrónicas de un tercio de las del sistema.

Como el torque de secuencia negativa es de signo contrario al de secuencia positiva, la máquina tenderá a frenarse, esta es la causa principal de calentamiento adicional de los motores. Por su parte, el torque monopolar contribuirá a producir oscilaciones de torque en algunos sectores de la curva torque-velocidad resultante, que la deformará y causará problemas de arranque y marcha.

En la figura 4 se muestran las curvas Torque – velocidad de cada máquina alimentada por tensiones de secuencia. El torque total resultante es la suma de todas las curvas. La amplitud de cada torque individual es proporcional al valor cuadrado de las tensiones de cada secuencia.

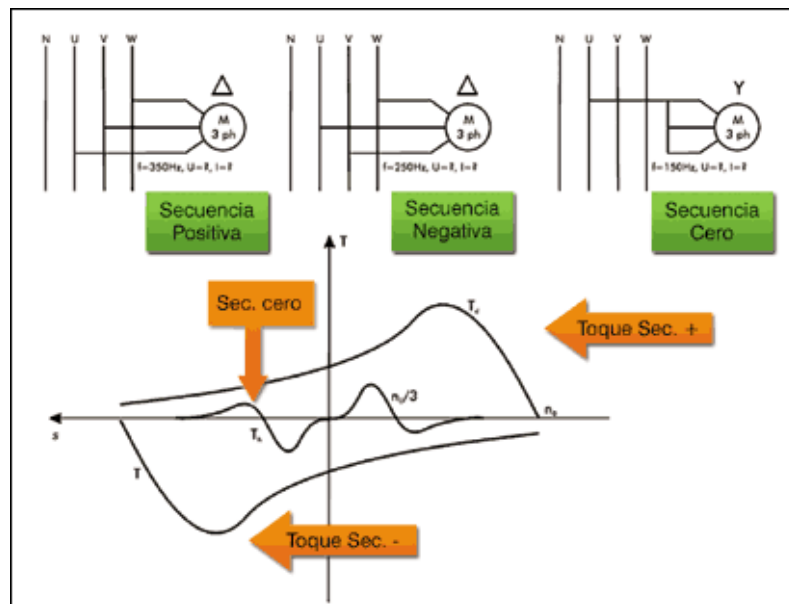


Figura 4. Curvas Torque – velocidad de cada máquina alimentada por tensiones de secuencia.

Desde el punto de la NORMA NEMA MG1.

La NORMA NEMA MG1 en la Sección 12.45 establece que “los motores polifásicos operarán con éxito bajo condiciones de funcionamiento a carga nominal cuando el desequilibrio de voltaje en los terminales del motor no supere el 1%”.

Cuando los voltajes de línea aplicados a un motor de inducción polifásico no son iguales (Sección 14.36), se producirán corrientes desequilibradas en los devanados del estator y un pequeño porcentaje de desequilibrio de voltaje resultará en un porcentaje mucho mayor de desequilibrio de corriente. En consecuencia, habrá un aumento de la temperatura del motor el cual opera a una carga particular y el desequilibrio de voltaje porcentual será mayor para este motor en comparación a otro motor que opera bajo las mismas condiciones con voltajes balanceados.

La norma NEMA MG1 permite operar un motor bajo estas condiciones de desequilibrio de tensiones, siempre y cuando se realice un "derating" o disminución de la potencia obtenida en el eje de la máquina. De esta manera es posible la operación bajo desequilibrio de tensiones sin dañar la máquina. No se recomienda el funcionamiento de motores por encima de una condición de desequilibrio de voltaje del 5 por ciento.

La figura 5 muestra la gráfica para aplicar “derating” o disminución de la potencia a una maquina eléctrica, por ejemplo, para un desequilibrio de tensiones del 3%, se podrá sacar del eje del motor aproximadamente el 88% de su potencia nominal.

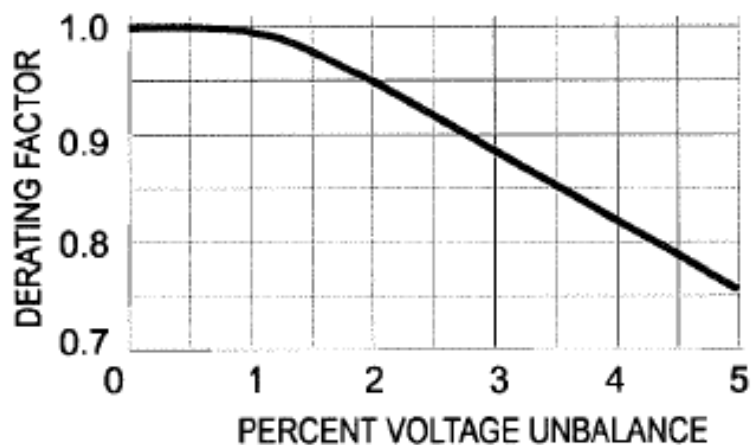


Figura 5. Factor de Corrección del motor debido al desbalance voltaje.

*figura tomada de la norma NEMA MG1.

Cuando se aplica la curva de reducción de la figura 5 para operar en voltajes no balanceados, la selección y el ajuste del dispositivo de sobrecarga deben tener en cuenta la combinación del factor de reducción aplicado al motor y el aumento de la corriente resultante de los voltajes no balanceados. Se recomienda que los dispositivos de sobrecarga se seleccionen o ajusten, o ambos, al valor mínimo que no resulte en el disparo por el factor de reducción y el desequilibrio de voltaje que se aplica. Cuando se anticipan voltajes no balanceados, se recomienda que los dispositivos de sobrecarga se seleccionen de modo que respondan a I_{max} .

El efecto de los voltajes desequilibrados en los motores de inducción polifásicos es equivalente a la introducción de una "Tensión de secuencia negativa" que tiene una rotación opuesta a la que se produce con voltajes equilibrados. Esta tensión de secuencia negativa produce un flujo que gira en contra de la rotación del rotor y tiende a producir altas corrientes. Un pequeño voltaje de secuencia negativa puede producir corrientes altas en los bobinados del motor las cuales están por encima de las corrientes normales de funcionamiento (ver sección 14.36.1 de la norma).

1.3 ARMÓNICOS DE CORRIENTE

1.3.1 DISTORSION ARMONICA

ORIGEN DE LA DISTORSION ARMONICA

Actualmente los elementos semiconductores están presentes prácticamente en todos los hogares e industrias. Con el fin de mejorar la producción es indispensable contar con elementos tales como: controladores de velocidad, circuitos rectificadores, computadores. Los beneficios de estas tecnologías son innegables ya que van desde la regulación de la luminosidad de un bombillo hasta el control de máquinas rotatorias.

El inconveniente de los elementos antes mencionados es la contaminación que producen en el sistema eléctrico, ya que los elementos semiconductores modifican la naturaleza de la onda sinusoidal original y la convierten en señales deformadas, no sinusoidales y cuyas características no siempre son de fácil comprensión.

Con la utilización de equipos de electrónica de potencia (ordenadores, variadores de velocidad, etc.), la mayoría de los usuarios se enfrenta a la presencia de armónicos en las redes de distribución eléctrica. Toda red eléctrica está comprendida por una determinada cantidad de cargas. Cuando la corriente que atraviesa una carga tiene la misma forma de onda que la tensión, a esta carga se le denomina carga lineal (ver figura 6); por otra parte, cuando la forma de onda de la corriente no corresponde con la forma de la tensión, la carga se denomina carga no lineal (ver figura 7).

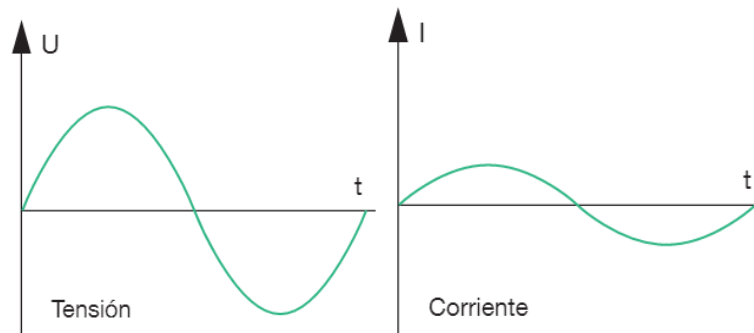


Figura 6. Formas de onda de una carga Lineal.

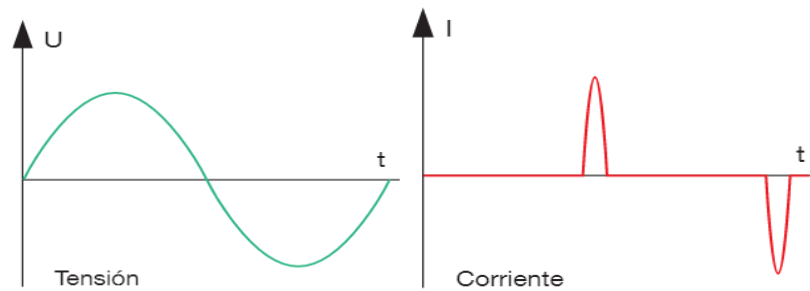


Figura 7. Formas de onda de una carga No Lineal.

Cuando una onda periódica no tiene una forma sinusoidal se dice que tiene contenido armónico, lo cual puede alterar su valor pico y/o valor RMS causando alteraciones en el funcionamiento normal de los equipos que estén sometido a esta tensión (figura 8). Razón por la cual los conceptos aplicados para estudiar el comportamiento de sistemas lineales pierden validez, de la misma forma los elementos de protección y de medida ven mermada su efectividad frente a señales distorsionadas.

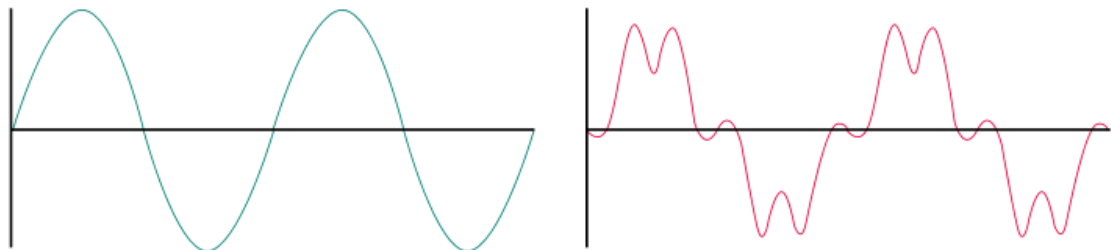


Figura 8. Forma de onda Ideal y forma de onda distorsionada.

Una señal periódica no sinusoidal puede ser convertida mediante la aplicación de la serie de Fourier en una sumatoria de funciones sinusoidales. Un sistema no lineal puede ser analizado realizando los cálculos de cada componente y así obtener la respuesta total de la señal distorsionada.

Las componentes armónicas aparecerán cada vez que se modifique la naturaleza de una señal sinusoidal.

Alimentar una carga con una onda distorsionada es equivalente a alimentarla con múltiples fuentes sinusoidales de distinta frecuencia y magnitud, pero relacionadas entre sí en forma armónica, vale decir frecuencias cuyo valor es un múltiplo (2, 3, 4, 5, n) de la frecuencia fundamental (50 o 60 Hz). El número “n” determina el rango de la componente armónica. Se le denomina “armónico del rango n” a la componente armónica del rango correspondiente a “n” veces la frecuencia de la red.

Si sumamos hasta el infinito todas las componentes armónicas que forman una señal sinusoidal distorsionada obtendríamos la señal resultante total, esta señal resultante tiene la misma frecuencia que la fundamental, pero características muy distintas ya que presentaría diferente valor efectivo (RMS), diferente valor máximo etc., por lo tanto, tratar una señal distorsionada de la misma forma que una señal sinusoidal es un error.

1.4 CAUSAS, EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS ARMÓNICOS DE CORRIENTE

1.4.1 EFECTOS DE LA DISTORSION ARMONICA EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

Como ya se ha mencionado en los sistemas de distribución podemos encontrar cargas no lineales tanto en redes monofásicas como trifásicas. En las redes monofásicas es común encontrar distorsión armónica ya que estas redes alimentan edificios de oficinas donde existen redes computacionales, elementos de calefacción regulables, sistemas electrónicos de control de luminarias etc., los cuales por su naturaleza producen distorsión de la señal senoidal. En los sistemas trifásicos las plantas industriales poseen gran cantidad de elementos electrónicos utilizados en los diferentes procesos de producción los cuales provocan contaminación armónica en las redes eléctricas.

Cuando un sistema posee distorsión armónica es necesario encontrar algún método para mitigar sus efectos y lograr que los aparatos alimentados funcionen en forma adecuada. Dependiendo de la contaminación armónica presente en un circuito específico, se tomarán en forma simultánea más de alguna opción.

La presencia de armónicos en una instalación, o red de distribución eléctrica puede acarrear innumerables problemas, tales como:

Componente / Elemento	Problema	Efecto
Conductor	<ul style="list-style-type: none"> – Aumento de la corriente – Aumento de la resistencia. – Aumento de pérdidas térmicas (efecto Joule) – Efecto “Skin”. 	<ul style="list-style-type: none"> – Calentamiento de cables. – Disparo de protecciones.
Conductor de neutro	<ul style="list-style-type: none"> – Circulación de armónicos múltiplos de 3. – Retorno por el conductor de neutro. 	<ul style="list-style-type: none"> – Sobre intensidad de la corriente circulando por el neutro. – Calentamiento en el neutro. – Degradación prematura del conductor de neutro. – Tensión neutro-tierra. – Disparo de protecciones.
Condensadores	<ul style="list-style-type: none"> – Resonancia paralela con el sistema. – Amplificación de los armónicos. 	<ul style="list-style-type: none"> – Calentamiento. – Envejecimiento prematuro de condensadores. – Destrucción de condensadores.

Transformadores	<ul style="list-style-type: none"> - Circulación de corrientes armónicas por los devanados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobrecalentamiento de los devanados. - Pérdida de aislamiento térmico por calentamiento. - Pérdidas en el cobre y en el hierro (Histéresis y Foucault) - Disminución del rendimiento. - Sobredimensionado del transformador. - Saturación del transformador (crea mayor distorsión).
Motores	<ul style="list-style-type: none"> - Circulación de corrientes armónicas por los devanados 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobrecalentamiento de los devanados. - Pérdida de aislamiento térmico por calentamiento. - Pérdidas en el cobre y en el hierro (Histéresis y Foucault). - Disminución del rendimiento. - Vibraciones en el eje, desgaste mecánico en rodamientos y excentricidad. - Reducción del par
Interrupidores automáticos y diferenciales (Breaker)	<ul style="list-style-type: none"> - Apertura de circuitos sin existir falla apreciable. 	<ul style="list-style-type: none"> - Disparos inapropiados por corrientes de armónicos

Equipos de medida y Control	<ul style="list-style-type: none"> - Medidas no válidas. - Errores en procesos de control. 	<ul style="list-style-type: none"> - Error en equipos que toman como referencia el paso por cero de la onda. - Saturación de transformadores de medida y/o protección. - Valores de magnitudes incorrectas.
-----------------------------	--	--

Tabla 1. Efectos de la distorsión armónica en las instalaciones eléctricas.

Todos estos efectos acarrearán pérdidas económicas importantes debido a:

- Necesidad de sobredimensionamiento de los conductores y de las potencias contratadas en una instalación.
- Necesidad de sustitución con mayor frecuencia de los aparatos y máquinas dañados por los armónicos.
- Paradas de producción debidas a los disparos intempestivos de los elementos de protección y mando.

1.5 SOLUCIONES QUE EXISTEN PARA CONTRARRESTAR LOS ARMÓNICOS

- Sobredimensionamiento de conductores y pletinas. Utilización de un neutro para cada fase.
- Utilización de transformadores de aislamiento de estrella-triángulo, con secundario en zig-zag o con doble secundario.
- Filtros pasivos como las impedancias anti armónicas o los llamados “shunt resonantes”, formados por elementos pasivos como inductancias y condensadores. Filtros activos y convertidores “limpios”.

- Utilización de diferenciales “superinmunizados” calibrados para soportar altas tasas de THD.
- Separación de los elementos no lineales de las “cargas limpias” en una instalación eléctrica.
- Impedancias de alisado, conectadas a las cargas no lineales. Filtros en cargadores y alimentadores.

1.6 FUENTES QUE PRODUCEN ARMÓNICAS

Saturación de los transformadores

La saturación de transformadores provoca la generación de armónicas, pues se trata de un elemento no lineal, las armónicas generadas por la saturación son las armónicas impares, principalmente la 3°. La generación de estas armónicas se presenta en estado estable para cuando el transformador este sobre cargado, provocando que el transformador opere en su región no lineal.

Lámparas fluorescentes

El uso en gran escala de lámparas fluorescentes como un medio para reducir el consumo de energía, se ha visto recientemente incrementado en muchos lugares. La utilización de nuevas tecnologías que abarcan diseños de lámparas fluorescentes y lámparas de vapor de metal, constituyen sistemas más eficientes de iluminación. El lado negativo del uso masivo de lámparas fluorescentes es la generación de armónicos.

Equipo de cómputo

El equipo de cómputo y generalmente el equipo de oficina funcionan en base a una fuente de alimentación la cual es un puente rectificador, el cual posee la característica natural de generar frecuencias armónicas.

Equipo doméstico.

La gran mayoría de electrodomésticos en la actualidad utilizan para su funcionamiento una gran cantidad de dispositivos electrónicos los cuales por si característica de consumo son considerados cargas no lineales.

1.7 EFECTO DE LOS ARMÓNICOS SOBRE LOS MOTORES

El mayor efecto que tienen los armónicos de tensión en la maquinas 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 una la excitación sinusoidal. También pueden producir variaciones en el hueco de aire entre el estator y el rotor, esto debido a la flexión o el movimiento del estator y el rotor debido a fuerzas centrífugas operativas, fuerzas magnéticas y efectos térmicos producidos por los armónicos de corriente lo cual produce daños en el motor causados por el calentamiento inducido magnéticamente o el roce entre el rotor y el estator, además pueden causar o aumentar el fenómeno llamado “cogging” el cual describe la velocidad angular no uniforme en la rotación del rotor, en lugar de una rotación lineal y suave, la rotación ocurre en tirones o incrementos. Cuanto más bajo es el "cogging", más suave es la rotación, y el motor experimentará una mejor carrera, además estas corrientes armónicas pueden producir una disminución en el rendimiento mecánico del motor.

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

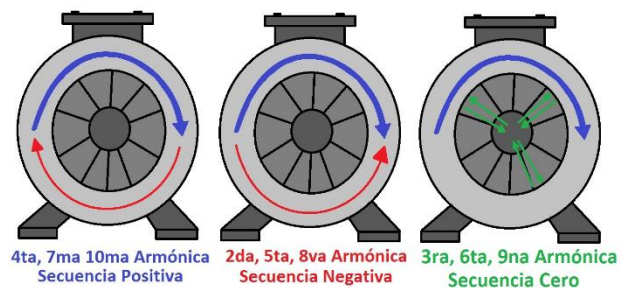


Figura 9. Contenido armónico en motores de inducción

La Figura 10 muestra el factor de reducción de la capacidad del motor de acuerdo con el factor de tensión armónica. Según la norma CEI 60892 el factor armónico de tensión (HVF) (1.0) debe ser inferior al 2%. Este factor se calcula con la fórmula siguiente:

$$HVF = \frac{1}{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1}\right)^2 \times \frac{1}{n}}} \leq 2\% \quad (1.0)$$

Donde:

V_1 = Tensión fundamental.

V_n = Tensión de distorsión armónica individual

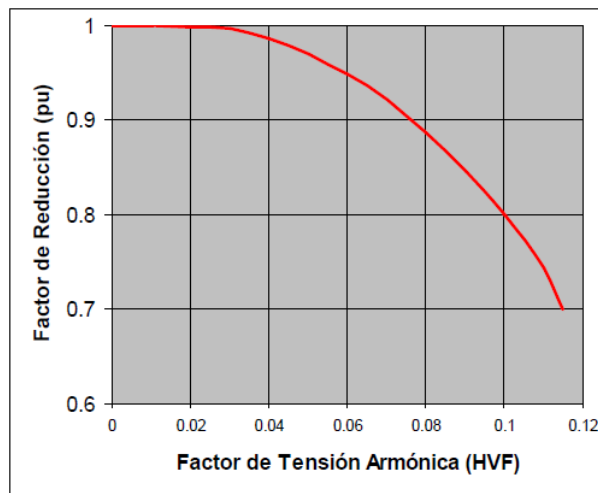


Figura 10. Factor de reducción de acuerdo con el factor de tensión armónica.

En resumen, se podría decir que los armónicos de tensión y de corriente influyen sobre las pérdidas por: fricción, ventilación, en el cobre del estator y rotor, en el hierro, la elevación de temperatura, además pérdidas causadas en la potencia nominal, en la eficiencia y en el tiempo de vida útil de los rodamientos. Por lo tanto, para evitar el sobrecalentamiento del motor, la potencia nominal del motor debe ser reducida de tal forma que la temperatura del aislamiento no sobrepase su clase térmica.

CAPITULO 2. NORMA DE CALIDAD DE SERVICIO NACIONAL E INTERNACIONAL

2.1 CALIDAD DE SERVICIO EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

La calidad del servicio eléctrico es un parte importante hoy en día para garantizar la calidad del suministro eléctrico, por lo que todo país deberá contar con una normativa que defina técnicas indicadores y parámetros que garantice una buena calidad del servicio.

Por definición trataremos a la calidad del servicio eléctrico como al conjunto de características, técnicas y comerciales, inherentes al suministro eléctrico exigibles por los sujetos, consumidores y por los órganos competentes del sector electricidad en el país.

Es importante tener en cuenta que el término “calidad del servicio eléctrico”, no se lo utilice aislado para expresar un grado de excelencia en un sentido comparativo, si no usarlo en sentido cuantitativo para evaluaciones técnicas. Para expresar significado comparativo, se debe usar un adjetivo calificativo antes del término, como, por ejemplo: Buena calidad de servicio eléctrico, Mala calidad de servicio eléctrico, etc.

En El Salvador SIGET siendo el máximo organismo regulatorio de telecomunicaciones y electricidad en su acuerdo 192-E-2014 “**Normas de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución**”, tiene 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 respecto de los siguientes parámetros igualmente considerados e incorporados en la tarifa.

2.2 NORMAS DE CALIDAD DEL SERVICIO DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN (SIGET)

Para el salvador SIGET presenta una normativa para calidad de energía titulada “*Normas de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución*”, esta norma trata sobre índices e indicadores de referencia para calificar la calidad con el que las empresas distribuidoras suministran los servicios de energía eléctrica a los usuarios, compensaciones y métodos de control como una manera de regulación en el país.

2.3 ESTRUCTURA DE LA NORMA DE CALIDAD DE SERVICIO SIGET

La normativa de calidad de SIGET contempla varios parámetros a considerar para poder determinar “la calidad” del servicio eléctrico y se lo modela de la siguiente manera:

Las normas se dividen en 3 áreas importantes:

- a) La calidad del suministro o servicio técnico prestado, que está relacionado principalmente con las interrupciones del servicio.
- b) La calidad del producto técnico suministrado, persigue analizar las características y nivel de la señal de voltaje en el punto de acoplamiento común, además de las perturbaciones, e implica los elementos siguientes:
 - i. Niveles de Tensión
 - ii. Perturbaciones en la onda de voltaje (flicker y tensiones armónicas)
 - iii. Incidencia del Usuario en la calidad.
- c) La calidad del servicio comercial, que trata de buscar dar plazos y cualidades de la atención por parte de la compañía distribuidora para el cumplimiento de las solicitudes e información requerida por el usuario y está relacionado con los elementos siguientes:
 - i. La Atención al usuario
 - ii. Los medios de atención al usuario
 - iii. La precisión de los elementos de medición.

Para nuestro caso, por efecto de estudio de la normativa nos enfocaremos en **b)** La calidad del producto técnico suministrado, considerando el desbalance de tensiones y contenido armónico.

2.3.1 PRODUCTO TÉCNICO: A) DESBALANCE DE TENSION

Se considera que existe desbalance de tensión cuando el valor eficaz (Magnitud) y la separación vectorial (Angulo) entre las fases no son iguales, lo ideal es que tanto la Magnitud y el Angulo sean iguales.

SIGET se refiere al producto técnico como los elementos o parámetros a realizar las mediciones para poder de manera técnica obtener resultados en campañas de medición.

En este caso SIGET en su norma de calidad solo presenta en cuanto a tensión se refiere, regulación de tensión. Por lo tanto, el desbalance de tensión no es considerado en la normativa vigente. Sin embargo, existen normativas internacionales que si lo consideran y que sirven como una guía y apoyo para el análisis de este parámetro.

2.3.2 PRODUCTO TÉCNICO: B) ARMÓNICOS

La distorsión armónica son señales de tensión o corriente con una frecuencia que es un múltiplo entero de la fundamental; éstas se suman a la onda fundamental y la distorsionan generando con ello una "distorsión armónica"

El Art.53 de SIGET en la norma de calidad del servicio dice que las mediciones deberán ser realizadas de acuerdo con la norma IEC 61000-4-7 o la que la sustituya, registrando durante un período de al menos siete (7) días calendario y en intervalos de diez (10) minutos la corriente de carga, la distorsión armónica total de la corriente de carga y la distorsión armónica individual de la corriente de carga.

La norma de calidad del servicio de los sistemas de distribución (SIGET) al igual la normativa IEEE define los armónicos de tensión como responsabilidad del distribuidor y atribuye este problema a la empresa distribuidora la cual en media y baja tensión. Los límites de distorsión armónica de tensión en media y baja tensión, no deben ser superados durante más del cinco por ciento (5 %) del período de medición, tomando en cuenta que el análisis de cumplimiento debe realizarse para cada una de las fases existentes en el punto de medición. Estableciendo los siguientes parámetros:

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 2. 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, según el art 50. De la norma de calidad de la energía (SIGET), establece los indicadores y límites de la distorsión armónica de la corriente de carga originada en las instalaciones internas de un usuario final dependerán de la potencia registrada por fase en cada intervalo de la medición realizada en el punto de entrega del usuario y del orden de la armónica correspondiente y no deberán sobrepasar los límites indicados en la Tabla 3. 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	12.0
	7	1.54	8.5
	11	0.66	4.3
	13	0.42	3.0
	17	0.26	2.7
	19	0.24	1.9
	23	0.20	1.6
	25	0.18	1.6
>25	4.5/n	0.2+0.8*25/n	
Órdenes impares múltiplos de 3	3	4.60	16.6
	9	0.80	2.2
	15	0.30	0.6
	21	0.21	0.4
	>21	4.5/n	0.3
Órdenes pares	2	2.16	10.0
	4	0.86	2.5
	6	0.60	1.0
	8	0.46	0.8
	10	0.37	0.8
	12	0.31	0.4
	>12	3.68/n	0.3
Distorsión Armónica Total de Corriente (%)		—	20

Tabla 3. 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 THD al 20%.

2.4 NORMATIVAS INTERNACIONALES

2.4.1 DESBALANCE DE TENSION

A continuación, se muestran normas internacionales que hacen referencia a el desbalance de tensión dentro sus estándares.

2.4.1.1 IEEE

NORMATIVA: IEEE STD 1159,” IEEE, Tech. Rep., 1995, IEEE Recommended Practice For Monitoring Electric Power Quality.

La IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), es también conocida como “Phase Voltage Unbalance Rate (PVUR)”,

DEFINICIÓN

La norma IEEE STD 1159-1995, 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.

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.

MÉTODO DE CALCULO

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:

$$PVUR = \frac{\text{Desviación máxima del promedio de } \{V_a, V_b, V_c\}}{\text{Promedio de } \{V_a, V_b, V_c\}} \quad (2.0)$$

$$\text{Donde: Promedio de } \{V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}\} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (2.1)$$

V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} son las tensiones fase-neutro del sistema que alimenta el motor.

Límite establecido de desbalance del: 2%.

2.4.1.2 ANSI/NEMA

NORMATIVA: ANSI std C84.1-2006 American National Standard for Electric Power Systems and Equipment—Voltage Ratings (60 Hertz).

La Norma ANSI/NEMA C84.1. define el desbalance de tensión mediante un índice conocido como “Line Voltage Unbalance Rate (LVUR)”.

DEFINICIÓN

Es la máxima desviación del voltaje de línea con respecto al valor de línea promedio, dividido entre el voltaje de línea promedio.

MÉTODO DE CALCULO

$$LVUR = \frac{\text{Desviación máxima del promedio de } \{V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}\}}{\text{Promedio de } \{V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}\}} \quad (2.2)$$

$$\text{Donde: Promedio de } \{V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}\} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad (2.3)$$

V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} son las tensiones de línea del sistema eléctrico que alimenta a el motor.

Generalmente el desbalance de tensiones se da en porcentaje, por lo tanto

$$\%LVUR = LVUR * 100\% \quad (2.4)$$

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.

Límite establecido de desbalance del: 3%

2.4.1.3 IEC

NORMATIVA:

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 Low frequency Conducted Disturbances And Signaling In Public Low- Voltage Power Supply Systems.”

IEC 61000-3-2, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: “Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)”.

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

IEC 61000-4-27:2020, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-27: Testing and measurement techniques - Unbalance, immunity test.

2.4.1.4 MÉTODO POR COMPONENTES SIMÉTRICAS

El desbalance de tensión según el método de las componentes simétricas está dado por:

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} \quad (2.5)$$

Donde V_2 es la amplitud de la componente de tensión de secuencia negativa V_2 y V_1 es la amplitud de la componente de tensión de secuencia positiva V_1 .

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:

$$V_1 = \frac{V_{ab} + a * V_{bc} + a^2 * V_{ca}}{3} \quad (2.6)$$

$$V_2 = \frac{V_{ab} + a^2 * V_{bc} + a * V_{ca}}{3} \quad (2.7)$$

$$\text{Donde: } a = -0.5 + j0.866 \text{ y } a^2 = -0.5 - j0.866 \quad (2.8)$$

2.4.1.5 MÉTODO ALTERNATIVO O ABREVIADO

La norma IEC 61000-4-30 dice que el desbalance de voltaje es una condición en un sistema polifásico en que los valores rms. de los voltajes de línea (componentes fundamentales), o los ángulos de fase entre los voltajes de línea consecutivos no son todos iguales.

Este cálculo será definido por la ecuación:

$$u_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} * 100\% \text{ en donde } \beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2} \quad (2.9)$$

Esta norma establece como límite un desbalance de voltaje del 2%, pero además la norma IEC 61000-2-12 establece que para condiciones especiales el desbalance de voltaje puede llegar al 3%.

2.5 ARMONICOS DE CORRIENTE

A continuación, se muestran normas internacionales que hacen referencia a los armónicos de corriente dentro sus estándares.

2.5.1 IEC 61000-3-2

Establece los límites de distorsión de armónicos de corriente manejados en Europa, es necesario aclarar que los límites especificados en las tablas 4, 5, 6 son definidos para el sistema eléctrico conectado a 220/380, 230/400 y 240/415 V operando a 50 o 60Hz.

El estándar está limitado para equipos con emisiones de corrientes armónicas menores a 16 amperios. Para propósitos de limitar las corrientes armónicas se clasifican los equipos de la siguiente manera:

Clase A: Equipo trifásico balanceado, utensilios domésticos (excluyendo equipos clasificados como clase D), herramientas (excluyendo herramientas portátiles), controladores de lámparas incandescentes y equipo de audio. (tabla 4).

Clase B: Herramientas portátiles y equipos de soldadura de arco que no son equipos profesionales.

Clase C: Equipo de iluminación. (tabla 5).

Clase D: Computadores personales y televisores. En la tabla 6 se resumen los límites permitidos que establece la norma 61000-3-2 para los equipos clase A (se aplican los mismos límites para los equipos clase D), clase B y clase C detalladas anteriormente.

Orden del armónico n	Corriente armónica máxima admisible A
Armónicos impares	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \frac{15}{n}$
Armónicos pares	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \frac{8}{n}$

Tabla 4. Límites para equipos de clase A.

Orden del armónico n	Corriente armónica máxima admisible expresada en porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental %
2	2
3	$30 \cdot \lambda^*$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (sólo armónicos impares)	3

* λ es el factor de potencia del circuito.

Tabla 5. Límites para equipos clase C.

Orden del armónico n	Corriente armónica máxima admisible por vatio mA/W	Corriente armónica máxima admisible A
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
$13 \leq n \leq 39$ (sólo armónicos impares)	$\frac{3,85}{n}$	Véase tabla 1

Tabla 6. Límites para equipos clase D.

2.5.2 IEEE 519-1992

Establece los límites de distorsión armónica de corriente, tomando en cuenta la relación de la máxima corriente de corto-circuito y la máxima corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de suministro o punto de acople común del sistema de distribución.

Este estándar establece que los armónicos pares están limitados al 25% de los límites de armónicos impares. Además, establece que todos los equipos de generación de potencia están limitados al valor de distorsión de corriente $I_{sc}/I_L < 20$, sin importar el valor real de la relación I_{sc}/I_L (ver tablas 7, 8, 9).

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Tabla 7. Límites de distorsión actuales para sistemas de distribución general (120 V hasta 69 000 V).

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Tabla 8. Límites de distorsión actuales para sistemas de subtransmisión generales (69001 V hasta 161000 V).

Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	THD
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Tabla 9. Límites de distorsión de corriente para sistemas de transmisión generales b161 kV), Generación y cogeneración dispersas.

CAPITULO 3. CRITERIOS DE MEDICION

La determinación del desbalance de tensiones y los efectos de este sobre los parámetros nominales de las maquinas eléctricas deberán ser estudiados usando como metodología de análisis el método de componentes simétricas (IEC) y el concepto matemático de simetría.

Respecto a la determinación del desbalance de tensiones, se realizará un análisis matemático en bases a mediciones actuales para así determinar el estado de la red en ese punto en términos de porcentaje, al igual se proponen indicios de caracterización más precisos en comparación a los datos actuales en relación con los efectos sobre las maquinarias eléctricas más que todo del tipo trifásico.

Es importante destacar que tanto la toma de datos como el procesamiento de estos deberá seguir recomendaciones de normas internacionales (IEC, IEEE) para su validez tanto en el ámbito laboral como en el ámbito legal, por lo tanto, es importante destacar que los equipos de medición deberán estar diseñados de acuerdo con estas recomendaciones.

3.1 CRITERIO DE MEDICIÓN PARA EQUIPOS SEGÚN NORMATIVA NACIONAL SIGET, IEC 61000-4-30, IEEE STD 1159-1995.

A continuación, se presentan criterios para una correcta medición tanto para el ámbito laboral y legal siguiendo las recomendaciones de normativas nacionales e internacionales.

3.1.1 SIGET

En El Salvador SIGET siendo el máximo organismo regulatorio de telecomunicaciones y electricidad en su acuerdo 192-E-2014 “**Normas de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución**”, tiene 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 respecto de los siguientes parámetros igualmente considerados e incorporados en la tarifa.

Para nuestro caso, por efecto de estudio de la normativa nos enfocaremos en **b)** La calidad del producto técnico suministrado, considerando el desbalance de tensiones y contenido armónico.

3.1.1.2 PRODUCTO TÉCNICO: A) DESBALANCE DE TENSION

Se considera que existe desbalance de tensión cuando el valor eficaz (Magnitud) y la separación vectorial (Angulo) entre las fases no son iguales, lo ideal es que tanto la Magnitud y el Angulo sean iguales.

SIGET se refiere al producto técnico como los elementos o parámetros a realizar las mediciones para poder de manera técnica obtener resultados en campañas de medición.

En este caso SIGET en su norma de calidad solo presenta en cuanto a tensión se refiere, regulación de tensión. Por lo tanto, el desbalance de tensión no es considerado en la normativa vigente. Por lo mismo no se define algún requerimiento en cuanto al diseño de construcción y procesamiento de datos, así como también metodología de medición de los equipos de medición para este fenómeno es específico.

3.1.2 IEC

La normativa IEC 61000-4-30 define al desbalance de tensión como desequilibrio de voltaje condición en un sistema polifásico en el que el r.m.s. valores de las tensiones de línea (fundamental componente), o los ángulos de fase entre voltajes de línea consecutivos, no son todos iguales.

NOTA 1 El grado de desigualdad generalmente se expresa como las razones de la secuencia negativa y cero componentes al componente de secuencia positiva.

NOTA 2 En esta norma, el desequilibrio de voltaje se considera en relación con los sistemas trifásicos.

Esta normativa habla sobre técnicas y métodos de medición de calidad de energía que se deben cumplir por efectos de un buen resultado.

De manera general para equipos, ofrece clases de desempeño de medición para cada parámetro medido y se definen dos clases de desempeño de medición.

Rendimiento de clase A

Esta clase de rendimiento se utiliza cuando se necesitan mediciones precisas, para ejemplo, para aplicaciones contractuales, verificar el cumplimiento de estándares, resolver disputas, etc. Cualquier medición de un parámetro realizada con dos instrumentos diferentes cumplir con los requisitos de la clase A, al medir las mismas señales, producirá resultados coincidentes dentro de la incertidumbre especificada. Para garantizar que se produzcan resultados coincidentes, el instrumento de rendimiento de clase A requiere una característica de ancho de banda y una frecuencia de muestreo suficiente para la incertidumbre especificada de cada parámetro.

Rendimiento de clase B

Esta clase de rendimiento se puede utilizar para estudios estadísticos, resolución de problemas aplicaciones y otras aplicaciones donde no se requiere baja incertidumbre. Para cada clase de rendimiento, el rango de factores de influencia que se deben cumplir es especificado en 6.1. Los usuarios deben seleccionar la clase de desempeño de la medición teniendo en cuenta la situación de cada caso de aplicación.

NOTA 1 Un instrumento de medición puede tener diferentes clases de desempeño para diferentes parámetros.

NOTA 2 El fabricante del instrumento debe declarar las cantidades de influencia que no se dan expresamente y que puede degradar el rendimiento del instrumento.

Esta normativa expresa el desbalance de tensión como desequilibrio de tensión de alimentación. En el apartado 5.7.1 titulado como “Medición” se establece los tipos de clases el cual los equipos deben cumplir para este fenómeno.

Para rendimiento de clase A

El desequilibrio de la tensión de alimentación se evalúa mediante el método de componentes simétricos.

Además del componente de secuencia positiva, en condiciones de desequilibrio también hay existe al menos uno de los siguientes componentes: componente de secuencia negativa u_2 y / o componente de secuencia cero u_0 .

El componente fundamental del r.m.s. la señal de entrada de voltaje se mide durante un ciclo de 10 intervalo de tiempo para sistemas de energía de 50 Hz o un intervalo de tiempo de 12 ciclos para sistemas de energía de 60 Hz.

NOTA El efecto de los armónicos se minimizará mediante el uso de un filtro o mediante el uso de un algoritmo DFT. El componente de secuencia negativa u_2 se evalúa mediante la siguiente relación, expresada como porcentaje:

$$u_2 = \frac{\text{Secuencia negativa}}{\text{Secuencia positiva}} * 100\% \quad (3.0)$$

Para sistemas trifásicos, esto se puede escribir (con U_{ij} fondo = fase i a fase j fundamental voltaje):

$$u_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} * 100\% \quad \text{en donde } \beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2} \quad (3.1)$$

El componente u_0 de secuencia cero se evalúa mediante la magnitud de la siguiente relación, expresado como porcentaje:

$$u_0 = \frac{\text{Secuencia cero}}{\text{Secuencia positiva}} * 100\% \quad (3.2)$$

Para rendimiento de clase B

El fabricante especificará los algoritmos y métodos utilizados para calcular el desequilibrio.

3.1.3 IEEE STD 1159-1995

El propósito de esta normativa es orientar a los usuarios en el monitoreo y la interpretación de datos de los fenómenos electromagnéticos que causan problemas en la calidad de la energía. Esta norma también forma la opinión de consenso sobre métodos seguros y aceptables para monitorear los sistemas de energía eléctrica e interpretar los resultados. Además, ofrece un tutorial sobre las perturbaciones del sistema eléctrico y sus causas comunes.

Las entradas de señal de los instrumentos de medición que se estarán utilizando estarán limitadas a 1000 VAC rms o menos, con un rango de frecuencia de los sistemas de AC de 45 a 450 Hz.

CAPITULO 4. CALCULADOR DE PERDIDAS POR DESBALANCE EN MOTORES TRIFASICOS

Existen diferentes métodos de como poder determinar un desbalance de tensión en motores trifásicos, ya sea realizando mediciones directas o calculándolas o simplemente si se requiere algo más preciso y exacto, combinando ambos métodos, a medida el resultado requerido se vuelve más exacto es necesario comenzar a considerar más y más variables con el fin de obtener una respuesta más certera, esto puede hacer que los cálculos se vuelvan un poco largos, tediosos y hasta cierto punto un poco más complejos. Hoy en día con el uso de la tecnología existen herramientas de cálculo y simulación que consiguen facilitar la labor, sin embargo, la herramienta no lo es todo sin un buen programador o diseñador del modelado de la simulación.

4.1 DESCRIPCIÓN DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Como apoyo de la tecnología a la investigación y realización del calculador de pérdidas por desbalance en motores trifásicos se utilizó el software de procesamiento matemático MATLAB.

MATLAB significa Matrix Laboratory, en su definición más básica es un software de alto nivel para cálculos numéricos y símbolos.

Hablando de prestaciones, este software ofrece dentro de las más básicas la representación de datos y funciones, creación de interfaces de usuarios, manipulación de matrices, la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos de hardware e implementación de algoritmos. Es decir, matlab cuenta con una gran diversidad de usos como son: simular, modelar, crear prototipos, analizar datos y encontrar soluciones a los sistemas complejos.

Hablando del lenguaje de programación en matlab, este se desarrolló en un lenguaje propio o lenguaje tipo M, este lenguaje es interpretado, y puede ejecutarse tanto en el entorno interactivo, como a través de un archivo de script (archivos *.m). Este lenguaje permite operaciones de vectores y matrices, funciones, cálculo lambda, y programación orientada a objetos.

Dentro de muchas herramientas incorporadas en el mismo, se encuentra 1 de nuestro interés para la realización del calculador de desbalance de tensión:

- **Simulink con los paquetes de bloques (blocksets)**

Simulink es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab.

Es un entorno de programación de más alto nivel de abstracción que el lenguaje interpretado Matlab (archivos con extensión .m). Simulink genera archivos con extensión mdl (de "model").

Simulink viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos.

Se hace hincapié en el análisis de sucesos, a través de la concepción de sistemas (cajas negras que realizan alguna operación).

Es ampliamente usado en ingeniería electrónica en temas relacionados con el procesamiento digital de señales (DSP), involucrando temas específicos de ingeniería biomédica, telecomunicaciones, entre otros. También es muy utilizado en ingeniería de control y robótica.

4.2 PARÁMETROS DE MEDICIÓN EN MOTORES ASÍNCRONOS

Voltaje: El voltaje es una magnitud física, con la cual podemos cuantificar o “medir” la diferencia de potencial eléctrico o tensión eléctrica entre dos puntos, y es medible mediante un voltímetro. En cada país el voltaje estándar tiene un número específico, para El Salvador los niveles de tensión establecidos según el acuerdo 93-E-2008 de SIGET, son:

- Tensiones Eléctricas y Sistemas Normales de Distribución en Media Tensión:

TENSIÓN NOMINAL (VOLTIOS)

4,160Y/2,400

13,200Y/7,620

22,860Y/13,200

34,500

46,000

- Tensiones Eléctricas y Sistemas Normales de Distribución en Baja Tensión:

TENSIÓN NOMINAL (VOLTIOS)

120

120/240

240

Corriente eléctrica: De forma general, la corriente eléctrica es el flujo neto de carga eléctrica que circula de forma ordenada por un medio material conductor. Dicho medio material puede ser sólido, líquido o gaseoso y las cargas son transportadas por el movimiento de electrones o iones.

Energía eléctrica: La energía eléctrica es la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico.

La energía eléctrica puede transformarse en muchas otras formas de energía, tales como la energía lumínica o luz, la energía mecánica y la energía térmica.

Desbalance de tensión: El desequilibrio es la medida de la diferencia entre las tensiones de fase. El desequilibrio de la tensión es la medida de diferencias de tensión entre las fases de un sistema trifásico. Degrada el rendimiento y reduce la vida útil de los motores trifásicos.

Eficiencia: La eficiencia del motor eléctrico es la relación entre la potencia de salida (mecánica) y la potencia de entrada (eléctrica). La salida de potencia mecánica se calcula en base al par y la velocidad requerida (es decir, la potencia requerida para mover el objeto conectado al motor) y la entrada de energía eléctrica se calcula en base al voltaje y la corriente suministrados al motor.

Factor de potencia: Es la relación entre la energía que se convierte en trabajo y la energía eléctrica que un circuito o dispositivo se consume. En otras palabras: es el cociente entre el voltaje total aplicado a un circuito y el voltaje en la parte resistiva del mismo.

Perdidas: Es la potencia de pérdida que se obtiene debido al paso de corriente en el devanado de la armadura. Se le llama pérdida de cobre o pérdida por el efecto Joule.

4.3 METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA CALCULADOR DE PERDIDA UTILIZANDO UN MOTOR VIRTUAL ASÍNCRONO

En la metodología de cálculo se presenta la manera matemática para determinar diferentes parámetros del motor, necesarios para la elaboración del calculador de perdidas, también se presenta un ejemplo que trata sobre pruebas reales hechas a un motor trifásico de inducción con el fin de determinar su funcionalidad por medio de una resolución que representaría el análisis de datos como una sola muestra de ellos

4.3.1 ANÁLISIS MATEMÁTICO Y ECONÓMICO DE UN MOTOR TRIFÁSICO CONSIDERANDO LAS PERDIDAS POR DESBALANCE APLICANDO EL MÉTODO DE COMPONENTES SIMÉTRICAS

Ensayos realizados a motor trifásico de inducción:

Prueba DC en estator por fase

Prueba de rotor bloqueado a frecuencia nominal

Prueba de rotor bloqueado a baja frecuencia

Prueba en vacío

Análisis de ensayos

A continuación, se realiza el análisis de caracterización del motor partiendo de los ensayos realizados

Prueba de rotor bloqueado a 60 Hz

$$\begin{array}{l} |V_{Scu}| \quad |I_{SC}| \quad |P_{SC3\phi}| \\ R_{c(60 \text{ Hz})} = r_{1(60 \text{ Hz})} + r'_{2(60 \text{ Hz})} \end{array} \quad (4.0)$$

$$Z_{e(60 \text{ Hz})} = R_{c(60 \text{ Hz})} + jX_{c(60 \text{ Hz})}X_{c(60 \text{ Hz})} \quad (4.1)$$

$$X_{c(60 \text{ Hz})} = X_{1(60 \text{ Hz})} + X'_{1(60 \text{ Hz})} \quad (4.2)$$

Prueba DC estator

$$\begin{array}{l} V_{DC} \quad I_{DC} \\ r_{1DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \end{array} \quad (4.3)$$

Prueba de rotor bloqueado a 15 Hz

$$\begin{array}{ccc} |V_{scu}| & |I_{sc}| & |P_{sc3\phi}| \\ R_{c(15\text{ Hz})} = r_{1(15\text{ Hz})} + r'_{2(15\text{ Hz})} & & \end{array} \quad (4.4)$$

$$r_{1(60\text{ Hz})} = \frac{R_{c(60\text{ Hz})}}{R_{c(15\text{ Hz})}} \times r_{1DC} \quad (4.5)$$

Prueba de vacío

$$\begin{array}{ccc} |V_{0cu}| & |I_{oc}| & |P_{oc3\phi}| \\ P_c = P_{oc3\phi} - P_{cu} - P_{rot} = P_{oc3\phi} - 3(I_{oc})^2(r_{1(60\text{ Hz})}) - P_{rot} & & \end{array} \quad (4.6)$$

$$\cos\theta_{oc} = \frac{P_{oc3\phi}}{3(V_{0cu})(I_{oc})} \quad (4.7)$$

$$r_c = \frac{3 \left(\frac{V_{0cu}}{\sqrt{3}} \right)^2}{P_c} \quad (4.8)$$

$$I_m = I_{oc} \times \sin\theta_{oc} \quad (4.9)$$

$$X_m = \frac{|V_{0cu}|/\sqrt{3}}{I_m} \quad (4.10)$$

Parámetros del rotor en condición desbalance de tensiones [2]

Cálculo de R'2 y X'2

$$R'_2 = R_2\sqrt{2} \quad (4.11)$$

$$X'_2 = \frac{X_2}{\sqrt{2}} \quad (4.12)$$

Velocidad de operación del motor

$$S = \frac{n_{sinc} - n_{mec}}{n_{sinc}} = 1 - \frac{n_{mec}}{n_{sinc}} \quad (4.13)$$

$$n_{sinc} = \frac{120 f}{p} \quad (4.14)$$

Aplicando análisis por componentes simétricas

Calculando las impedancias de secuencia positiva y negativa

$$z_{eq1} = \frac{R_c * X_m}{R_c + X_m} \quad (4.15)$$

$$z_{rotor} = \frac{R_2}{s} + X_2 \quad (4.16)$$

$$z_{estator} = R_1 + X_1 \quad (4.17)$$

Impedancia de secuencia positiva

$$Z_1 = \frac{z_{eq1} * z_{rotor}}{z_{eq1} + z_{rotor}} + z_{estator} \quad (4.18)$$

Impedancia de secuencia negativa

$$z_{rotor} = \frac{R'_2}{s} + X'_2 \quad (4.19)$$

$$Z_2 = \frac{Z_{eq1} * Z_{rotor}}{Z_{eq1} + Z_{rotor}} + Z_{estator} \quad (4.20)$$

Considerando un desbalance de que se obtendrá mediante el análisis de desbalance de tensiones

Método de componentes simétricas

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

$$V_1 = \frac{V_{ab} + a * V_{bc} + a^2 * V_{ca}}{3} \quad (4.22)$$

$$V_2 = \frac{V_{ab} + a^2 * V_{bc} + a * V_{ca}}{3} \quad (4.23)$$

$$Unb = \frac{V_2}{V_1} * 100\% \quad (4.24)$$

Calculando corriente de secuencia positiva y negativa

$$I_1 = \frac{V}{z_1} \quad (4.25)$$

$$I_2 = \frac{V}{z_2} \quad (4.26)$$

Determinación de valores potencia de entrada de secuencia positiva y negativa

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cos \varphi_1 \quad (4.27)$$

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cos \varphi_2 \quad (4.28)$$

Fuerza electromotriz para cálculo de pérdidas en el entrehierro de secuencia positiva y negativa

$$\varepsilon_1 = U_1 - Z_{estator} \cdot I_1 \quad (4.29)$$

$$\varepsilon_2 = U_2 - Z_{estator} \cdot I_2 \quad (4.30)$$

Ahora, conocido el valor de la fuerza electromotriz, se puede calcular las pérdidas.

$$P_{fe1} = \frac{3 \cdot \varepsilon_1^2}{R_c} \quad (4.31)$$

$$P_{fe2} = \frac{3 \cdot \varepsilon_2^2}{R_c} \quad (4.32)$$

A partir de lo anterior se procede a calcular el valor de las pérdidas Joule tanto en el estator como en el rotor para desarrollar las pérdidas en el entrehierro:

$$P_{js1} = 3 \cdot R_s \cdot I_1^2 \quad (4.33)$$

$$P_{js2} = 3 \cdot R_s \cdot I_2^2 \quad (4.34)$$

$$P_{a1} = P_1 - P_{js1} - P_{fe1} \quad (4.35)$$

$$P_{a2} = P_2 - P_{js2} - P_{fe2} \quad (4.36)$$

$$P_{jr1} = s \cdot P_{a1} \quad (4.37)$$

$$P_{jr2} = (2 - s) \cdot P_{a2} \quad (4.38)$$

Ahora es posible calcular las pérdidas totales de cada secuencia

$$P_{tot1} = P_{js1} + P_{jr1} + P_{fe1} + P_{rot1} \quad (4.39)$$

$$P_{tot2} = P_{js2} + P_{jr2} + P_{fe2} + P_{rot2} \quad (4.40)$$

Al sumar estas pérdidas a las pérdidas constantes por ventilación y funcionamiento que poseen todos los motores, se logra obtener las pérdidas totales de este motor de inducción en específico:

$$P_{perdT} = P_{tot1} + P_{tot2} \quad (4.41)$$

Mientras que el rendimiento del motor, cuando trabaja con un LVUF, se calcula de la siguiente manera:

$$\eta(\%) = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} = \frac{P_1 - P_{perdT}}{(P_1 + P_2)} \quad (4.42)$$

Cálculo de costos por energía absorbida considerando las pérdidas provocadas por efecto del desbalance de tensión

El pliego tarifario valido será el comprendida en el periodo de tiempo respectivo al realizar el análisis

$$Energia = Potencia \times tiempo \quad (4.43)$$

$$Costo = Energia \times (Tarifa \text{ para el suministro electrico}) \quad (4.44)$$

4.3.2 GUÍA DE USUARIO

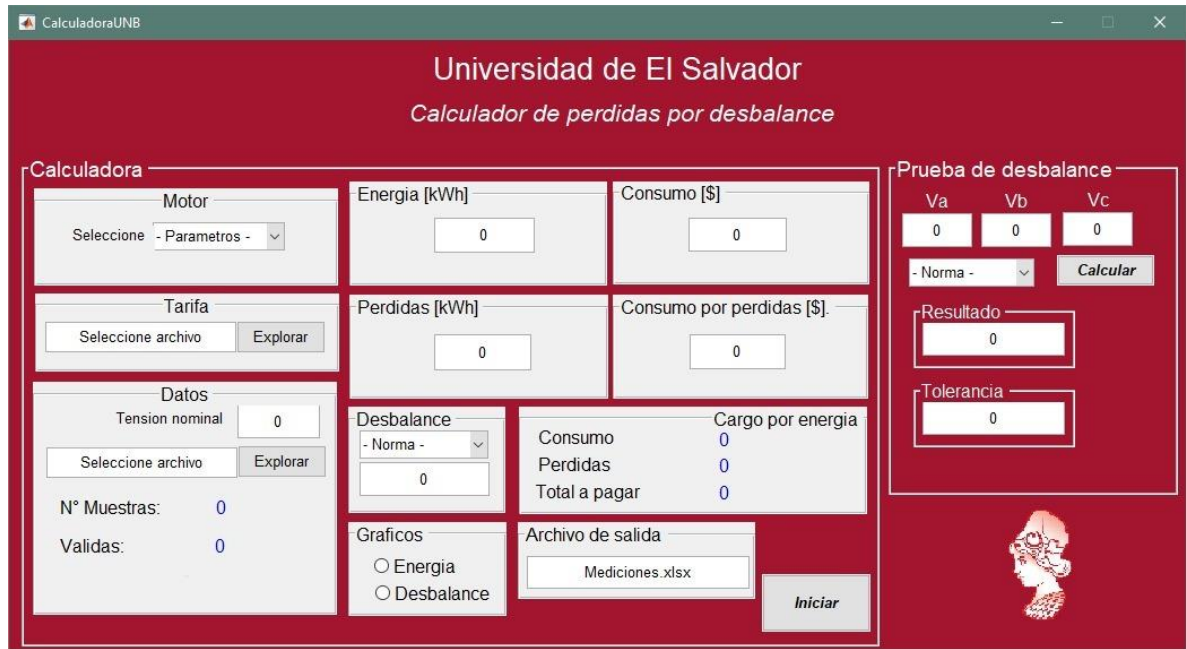


Figura 11. Interfaz gráfica del calculador de pérdidas por desbalance.

Archivos necesarios: txt con tarifas a aplicar (ver figura 14) y .xmls con los valores de voltaje a analizar ver formato en (ver figura 15)

- **Calculadora**

- 1) Motor: Selecciona el modo de aplicación del modelo ya sea de forma manual o precargada

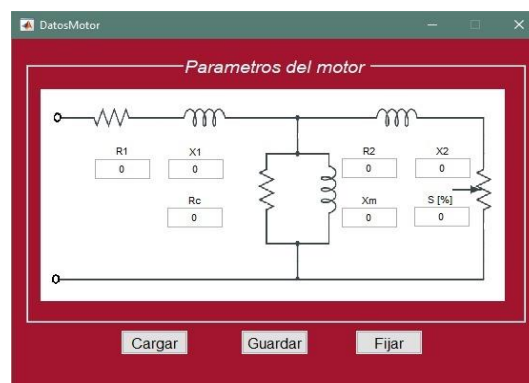


Figura 12. Interfaz gráfica para seleccionar el modelo del motor en forma manual.

- 2) Tarifa: Seleccionar archivo txt que contenga las tarifas a ser aplicadas

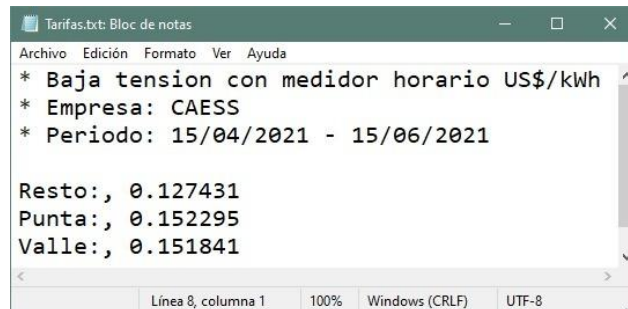


Figura 13. Formato del archivo txt para la selección de las tarifas a ser aplicadas.

- 3) Datos: Colocar el voltaje nominal al que se tomaron las mediciones y seleccionar el archivo xmls donde se encuentran los datos. En esta sección se hacen dos tipos de validación de datos, uno es la cantidad de muestras y dos la cantidad de muestras validas esto según normativa de calidad de SIGET. Solicita que no deben de ser una cantidad de muestras menor a 864 y que cada muestra no debe de sobrepasar los limites $1.2 \cdot T_{nominal}$ y $0.7 \cdot T_{nominal}$. Nota: si no se cumplen las validaciones de datos el instrumento podrá utilizarse con una cantidad menor de datos.

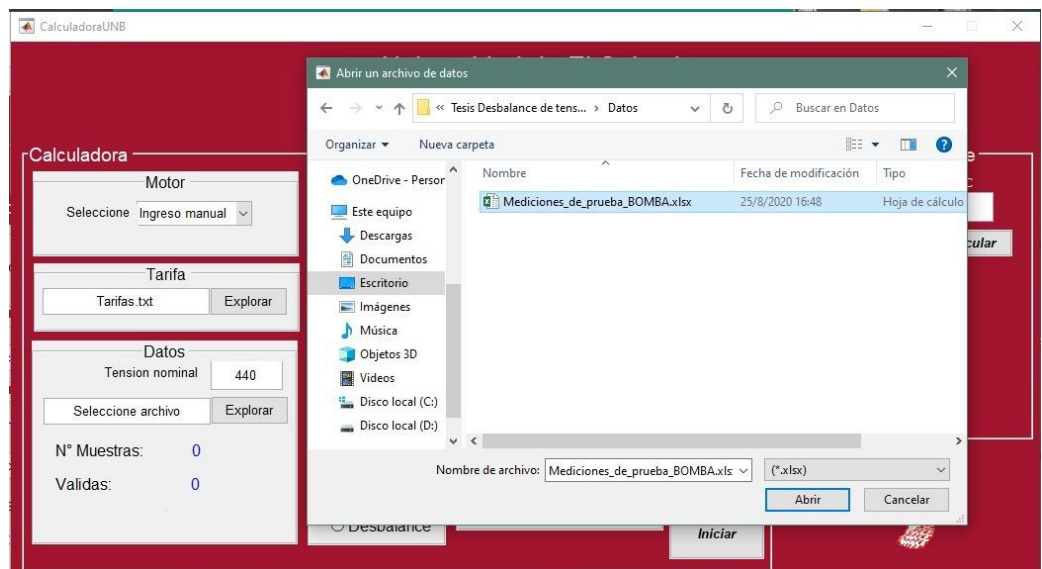


Figura 14. Selección del archivo xml donde se encuentran las mediciones de voltaje.



Figura 15. Validación de datos según normativa de calidad de SIGET.

- 4) Desbalance: en este apartado se puede seleccionar la normativa a aplicar ya sea IEEE o IEC.



Figura 16. Selección de la normativa a aplicar en el análisis del motor.

- 5) Gráficos: puede elegirse para ver en tiempo real entre ver un gráfico de energía o desbalance de voltaje.
- 6) Archivo de salida: Puede cambiarse el nombre por defecto del archivo de salida, es este el que contendrá todos los resultados de las muestras procesadas.
- 7) Botón iniciar: este da comienzo al análisis de las muestras ingresadas procesando una por una hasta llegar a su finalización.

Nota: El archivo de salida con el nombre elegido se encuentra en el mismo directorio de ejecución del código del instrumento.

Prueba de desbalance

Este apartado está pensado para poder hacer una prueba rápida de los valores de voltaje

- 1) En las entradas de datos Va, Vb y Vc se colocan los valores de voltaje de la muestra a probar
- 2) Seleccionar la norma aplicar a la muestra.
- 3) Botón calcular: genera el resultado de aplicar la norma seleccionada y la muestra en la misma sección

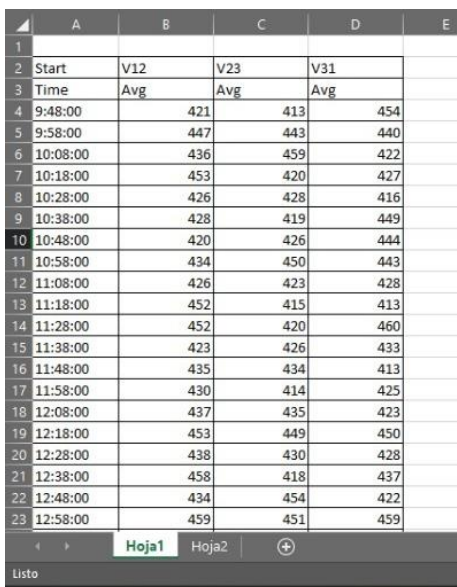
Observación:

Esta herramienta es un script que se puede migrar parcialmente a otro lenguaje de programación, por ser un script puede correr o funcionar sobre Octave o Python, ya que se puede adaptar el ambiente grafico a estos lenguajes, pero algunos componentes del mismo no funcionarían por que se utilizan toolbox dedicadas de Simulink y los modelos de motor precargados del mismo siendo todos propiedad de MATLAB.

CAPITULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 PRESENTACIÓN DE DATOS OBTENIDOS EN CAMPAÑA DE MEDICIÓN

Se realizó una campaña de medición en una estación de equipos de bombeo de una entidad dedicada al suministro de agua potable en la ciudad de San Salvador. Los datos obtenidos conforman una lista de 1008 mediciones tomadas en periodos de 10 minutos, por 7 días de la semana con un analizador de calidad de energía, para efectos de comprobar el desbalance de tensiones, la toma de datos se realizó en el tablero de alimentación del motor trifásico de 50HP, 440Vac, 60Hz. La muestra de datos obtenidos en la campaña de medición se muestra en la figura 17.



	A	B	C	D	E
1					
2	Start	V12	V23	V31	
3	Time	Avg	Avg	Avg	
4	9:48:00	421	413	454	
5	9:58:00	447	443	440	
6	10:08:00	436	459	422	
7	10:18:00	453	420	427	
8	10:28:00	426	428	416	
9	10:38:00	428	419	449	
10	10:48:00	420	426	444	
11	10:58:00	434	450	443	
12	11:08:00	426	423	428	
13	11:18:00	452	415	413	
14	11:28:00	452	420	460	
15	11:38:00	423	426	433	
16	11:48:00	435	434	413	
17	11:58:00	430	414	425	
18	12:08:00	437	435	423	
19	12:18:00	453	449	450	
20	12:28:00	438	430	428	
21	12:38:00	458	418	437	
22	12:48:00	434	454	422	
23	12:58:00	459	451	459	

Figura 17. Muestra de datos obtenidos en campaña de medición.

Si bien es cierto los datos obtenidos a través de las mediciones realizadas comprenden una campaña de medición para 7 días, el calculador de perdidas está diseñado para poder analizar cualquier cantidad de mediciones, sin embargo, las validaciones de los datos dentro del calculador de perdidas esta especificadas según la metodología de medición de calidad del producto técnico dentro de la normativa de calidad de la energía de SIGET, la

cual establece campañas de medición de 7 días, en intervalos de 10 minutos, y el valor de tensión medido no debe de ser menor al 70% y no superar el 120% del valor nominal, de lo mencionado anteriormente 864 muestras deberán cumplir dichas condiciones para ser considerada una campaña de medición valida.

5.2 ANÁLISIS DE DATOS UTILIZANDO EL CALCULADOR DE PERDIDAS POR DESBALANCE DE TENSIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5.2.1 ANÁLISIS DE DATOS

Los resultados mostrados en el calculador de pérdidas por desbalance son el análisis de los datos obtenidos en la campaña de medición mencionada anteriormente y los valores de tensión obtenidos en la campaña de medición mostrada en el apartado 5.1, se encuentran en el archivo “Medicion_Moto-Bomba_50hp.xmls”. El calculador de pérdidas por desbalance tiene una configuración para un motor de 50Hp, 440Vac, 60Hz. El Circuito equivalente de secuencia positiva se muestra en la Figura 18 y contiene los valores de reactancias previamente calculadas para el motor antes mencionado.

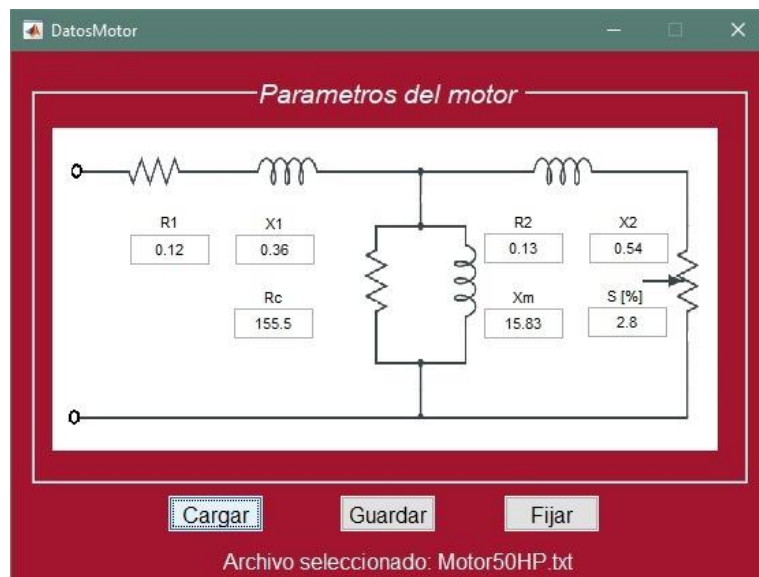


Figura 18. Datos ingresados al modelo del motor en forma manual.

Posteriormente se cargan las tarifas a aplicar, que para este caso, siendo un motor de 50Hp se aplican las tarifas de mediana demanda, baja tensión con medición horaria, CAESS; luego se escribe la tensión nominal de operación del motor, se carga el archivo .xml que contiene la campaña de medición que se analizara, se define la metodología de cálculo para el desbalance de tensión que establece la norma IEEE STD 1159-1995 y se escribe el nombre del archivo donde se guardarán los resultados de la ejecución del programa. Los resultados se almacenan en un archivo de salida con extensión .xlms nombrado como “Resultados_de_analisis_de_mediciones_a_moto-bomba50hp” el cual se encuentra en la carpeta de ejecución del software calculador de pérdidas.

5.2.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del calculador de pérdidas en su presentación de interfaz gráfica Figura 19, archivo de salida Figura 20, así como también un gráfico en donde se demuestra la aleatoriedad del desbalance en las muestras procesadas Figura 21.

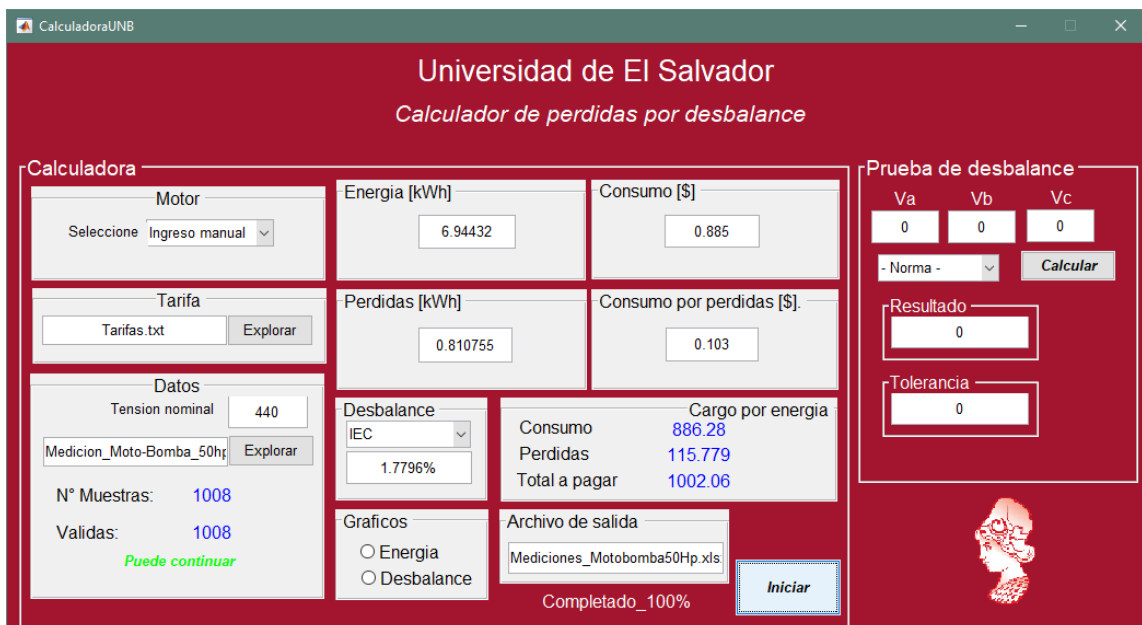


Figura 19. Resultado final del análisis de datos por medio de interfaz gráfica.

Va	Vb	Vc	Unb	la	lb	lc	Carga	Eficiencia(%)	Pa[kWh]	Perdidas[kWh]	ConsumoA[\$]	Consumo Perdidas[\$]	Franja
448	410	455	3.2	56.2328279	56.2328279	56.2328279	0.93281609	86.65741987	7.26568112	0.844928865	0.926	0.108	Resto
441	424	452	1.86	56.4041351	56.4041351	56.4041351	0.93565783	86.96004307	7.28944497	0.837354588	0.929	0.107	Resto
454	452	442	0.83	57.731817	57.731817	57.731817	0.95768193	87.26919404	7.61532816	0.859272723	0.97	0.109	Resto
454	436	435	1.4	56.7467854	56.7467854	56.7467854	0.94134174	87.07293834	7.37068045	0.841709665	0.939	0.107	Resto
454	444	445	0.71	57.5176754	57.5176754	57.5176754	0.95412966	87.24569943	7.5604872	0.85467044	0.963	0.109	Resto
460	417	439	2.83	56.3613375	56.3613375	56.3613375	0.93494775	86.76677742	7.29153773	0.843946764	0.929	0.108	Resto
442	425	441	1.26	56.0186967	56.0186967	56.0186967	0.92926395	86.97611289	7.1888625	0.826763967	0.916	0.105	Resto
458	457	445	0.92	58.2457509	58.2457509	58.2457509	0.9662073	87.33468022	7.74703895	0.869956756	0.987	0.111	Resto
426	440	431	0.95	55.5475858	55.5475858	55.5475858	0.92144897	86.93049151	7.07120629	0.816458619	0.901	0.104	Resto
427	455	412	2.92	55.4191214	55.4191214	55.4191214	0.91931786	86.59811817	7.06037449	0.825985286	0.9	0.105	Resto
457	425	427	2.37	56.0615518	56.0615518	56.0615518	0.92997472	86.81799201	7.21054945	0.834097778	0.919	0.106	Resto
459	429	441	1.97	56.9180954	56.9180954	56.9180954	0.94418352	87.01989367	7.41902821	0.848309768	0.945	0.108	Resto
426	420	410	1.11	53.7916679	53.7916679	53.7916679	0.8923209	86.62140897	6.64939399	0.783468827	0.847	0.1	Resto
417	435	436	1.44	55.1621229	55.1621229	55.1621229	0.91505479	86.82028599	6.98037674	0.810837561	0.89	0.103	Resto
412	442	430	2.04	54.9908128	54.9908128	54.9908128	0.91221302	86.70723551	6.94432374	0.810755116	0.885	0.103	Resto
Subtotal pur	228.778	0	0										
Subtotal vall	274.043	0	0										
Subtotal rest	499.238	0	0										
Total:	1002.059	0	0										
Perdidas pur	Perdidas vall	Perdidas resto,											
26.439	31.67	57.67											

Figura 20. Resultado final del análisis de datos por medio de archivo de salida.

El calculador de pérdidas por medio de su interfaz Figura 19 y archivo de salida Figura 20, muestran los resultados de una campaña de medición con 1008 muestras validas (100%) que corresponden a 7 días en presencia de desbalance de tensión de 1.78% en promedio, tal y como se muestra en la Figura 21.

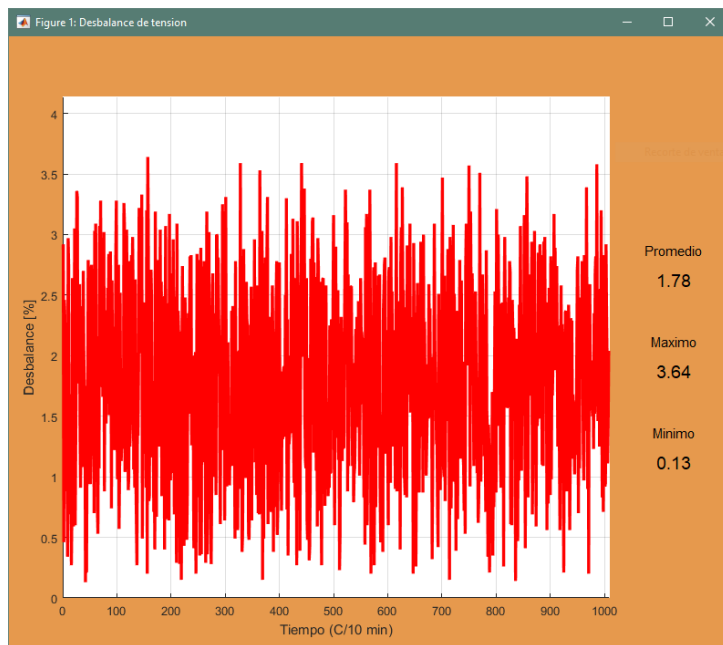


Figura 21. Gráfico de desbalance de tensión vs tiempo.

El gráfico de la figura 21 se observa el análisis en términos de desbalance de cada una de las 1008 muestras en dicha campaña de medición, por cada una de las muestras se obtiene un desbalance diferente o similar con respecto a las demás, por lo tanto, se muestra un valor promedio de desbalance de tensión para poder establecer una tendencia general y también se registran valores máximos y mínimos para efectos de análisis en otras instancias.

En el archivo de salida del calculador de pérdidas por desbalance de tensiones mostrado en la Figura 20 se obtiene un resultado más detallado en donde por cada muestra analizada se muestra información de tensiones, corrientes, desbalance de tensión, carga, eficiencia, potencia eléctrica, perdidas de potencia eléctrica, consumo de energía en termino de dinero y la franja horaria (punta, valle, resto) a la cual corresponde, que por la capacidad y tensión de operación del motor entra en tarifas de mediana demanda, baja tensión con medición horaria, CAESS.

También muestran los costos referentes al consumo de energía por cada franja horaria:

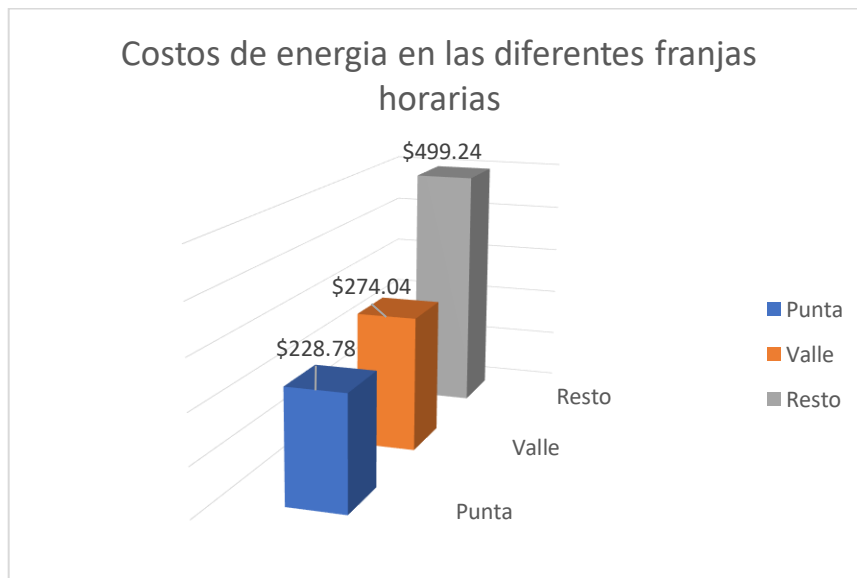


Figura 22. Gráfico de costo de energía consumida en las diferentes franjas horarias.

Podemos observar en la Figura 22 en forma gráfica que dentro de cada franja horaria tenemos consumos (\$) diferentes de energía, pero “Resto” es mayor que las demás, esto se debe a que esta franja horaria obedece al bloque del pliego de mayor duración en la franja horaria por estar comprendido en el horario 5am-5:59pm (12h). La Figura 23 muestra en forma gráfica las pérdidas en términos de costo por energía para cada bloque en las diferentes franjas horarias, en donde las 3 franjas horarias juntas suman los costos de energía por pérdidas totales por desbalance de tensión.

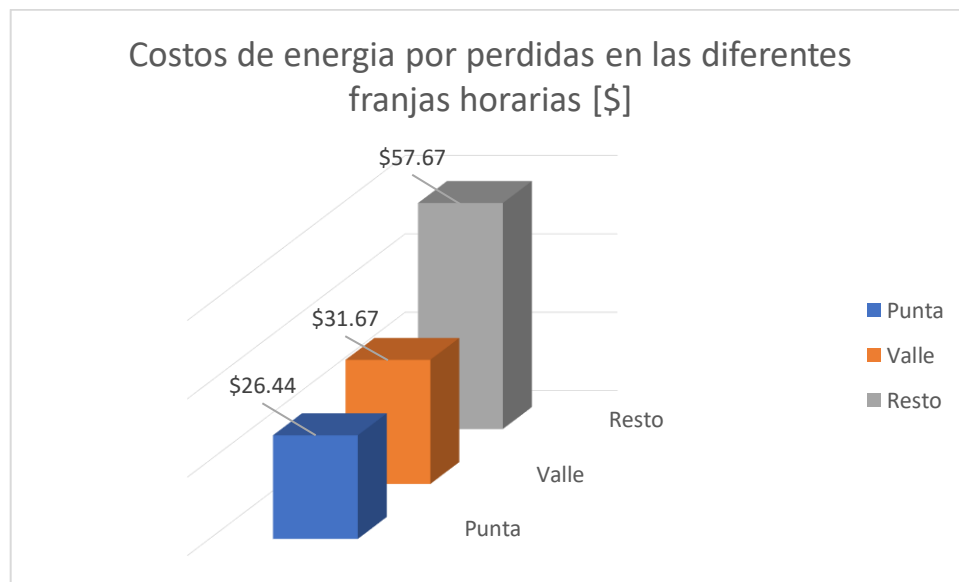


Figura 23. Gráfico de costos por pérdidas en las diferentes franjas horarias.

Y de la interfaz gráfica siendo está más amigable podemos observar el total de consumo por energía, las pérdidas generadas por el desbalance de tenciones en el motor y el cargo por energía a pagar, de las cuales se ha generado el grafico de costo por energía absorbida Figura 24, de la cual se puede observar que:

- Consumo: \$886.29; este costo refleja el consumo por energía nominal demandada.
- Pérdidas: \$115.78; este costo refleja el consumo por energía demandada en término de pérdidas.

Siendo el costo total a pagar de: \$1002.06, es decir, que, en presencia del desbalance de tensión, se puede observar un incremento a pagar por cargo de energía demandada en términos de pérdidas.

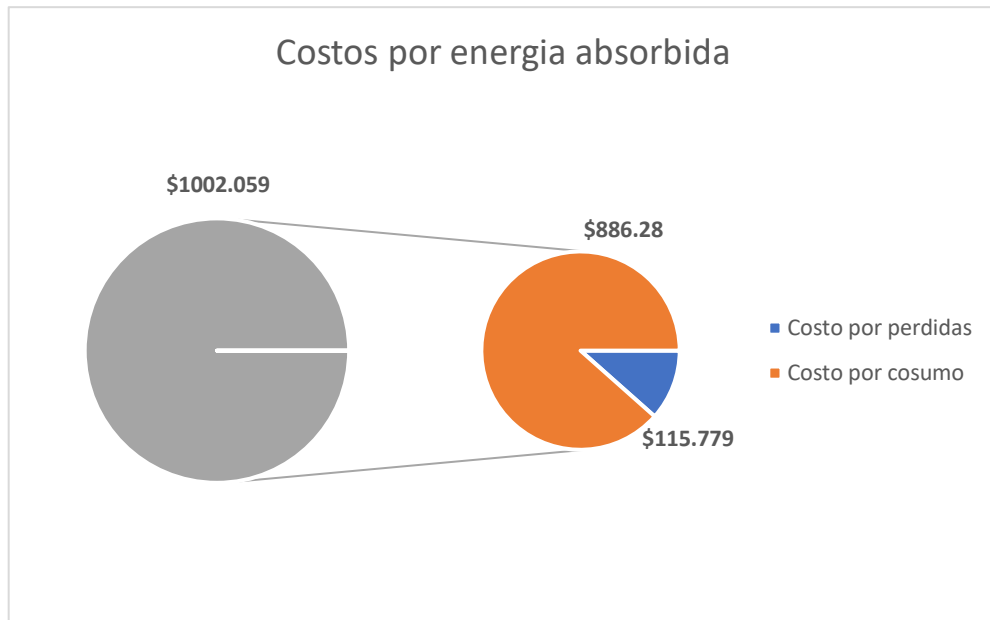


Figura 24. Gráfico de costo por energía absorbida en dólares durante 7 días.

Consumo al año: motor trabajando 24 horas 7 días de la semana

Franja	Consumo [Dólares]	Consumo por pérdidas [Dólares]
Resto	26,031.72	3,007.08
Punta	11,929.15	1,378.61
Valle	14,289.40	1,651.37
Total	52,250.26	6,037.05

Tabla 10. Costo del consumo del motor según franja horaria, consumo de un año.

- Costo total a pagar por energía sin condición de desbalance de tensión
\$53,706.54
- Costo total a pagar por energía con condición de desbalance de tensión
\$52,250.26

Al comparar un motor de 50 Hp 440V 60Hz que no presenta desbalance con uno que si está trabajando en condiciones de desbalance se puede observar un incremento en los costos por perdidas dependiendo del grado de desbalance que este posea que son apreciables a largo plazo, para efectos de demostración se realizaron análisis con diferentes porcentajes de desbalance de tensión, cada análisis se realizó con 0.5% de incremento desde 0% hasta 5% los cuales representan un incremento en los costos que van desde 0.62% hasta 7.58% reflejados en el consumo de energía tal y como se muestra en la tabla 16. Determinado por formula 5.1 ver anexos.

UNB	% de aumento del costo por perdidas
0	0
0.5	0.62
1	1.02
1.5	1.17
2	0.48
2.5	6.60
3	3.86
3.5	6.60
4	8.99
4.5	5.26
5	7.58

Tabla 11. Porcentajes de aumento según el desbalance de tensión.

Es importante destacar que si bien es cierto las pérdidas no representan un incremento sustancial en el consumo en un periodo de 7 días tal como lo muestra la figura 24, pero si esta evidenciado que si existe un incremento de los costos por perdidas en un año tal y como se muestra en la figura 25. Por otra parte, el rendimiento o la eficiencia se ven afectados directamente siendo estos con tendencia a disminuir a medida se incrementa el desbalance, en anexos la figura 29 muestra un gráfico de desbalance vs eficiencia en donde se puede observar que efectivamente a medida que se incrementa el desbalance de tensión, la eficiencia se ve afectada, es decir, la maquina como motor trifásico de inducción se vuelve menos eficiente.

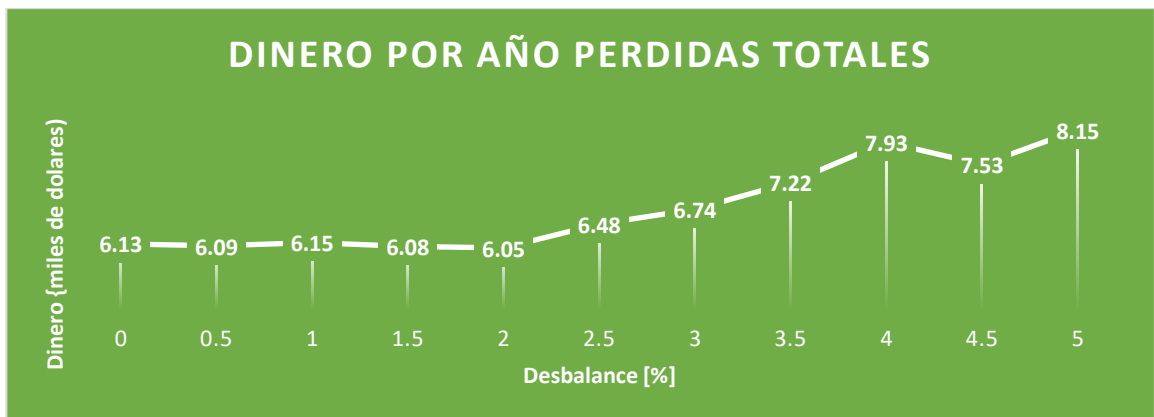


Figura 25. Gráfico de costo por pérdidas totales en dinero por año según desbalance de tensión.

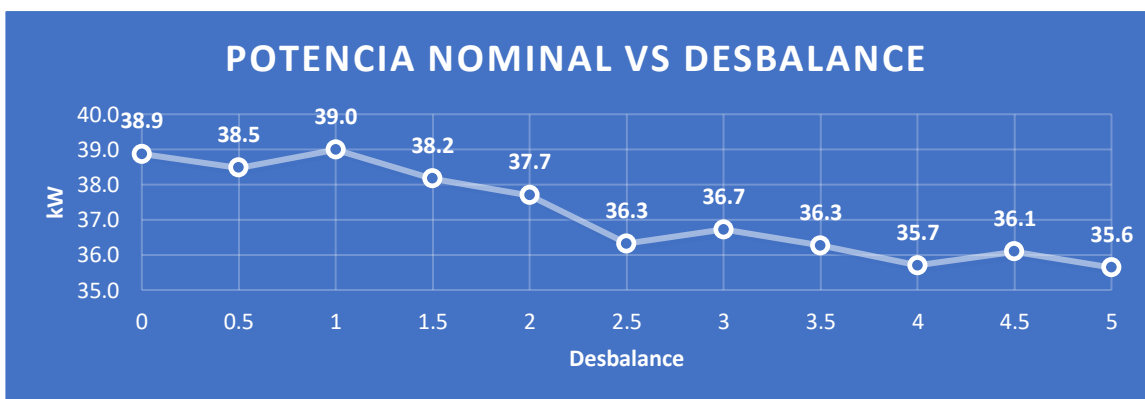


Figura 26. Efecto de la disminución de la potencia nominal según desbalance de tensión.

A medida que se incrementa el desbalance se observan ciertos fenómenos como: el efecto que se produce en la potencia nominal tal y como se muestra en la figura 26 en donde se observa el decrecimiento de la potencia a medida que se incrementa el grado de desbalance, esto podría dar paso a considerar que el motor está demandando menos energía a la fuente, pero se está provocando en el motor un aumento en las pérdidas que conllevan a una temperatura mayor a la normal de operación la cual está ocasionando un mayor desgaste en el equipo. La figura 27 muestra una comparativa para diferentes porcentajes de desbalance y el aumento de la temperatura

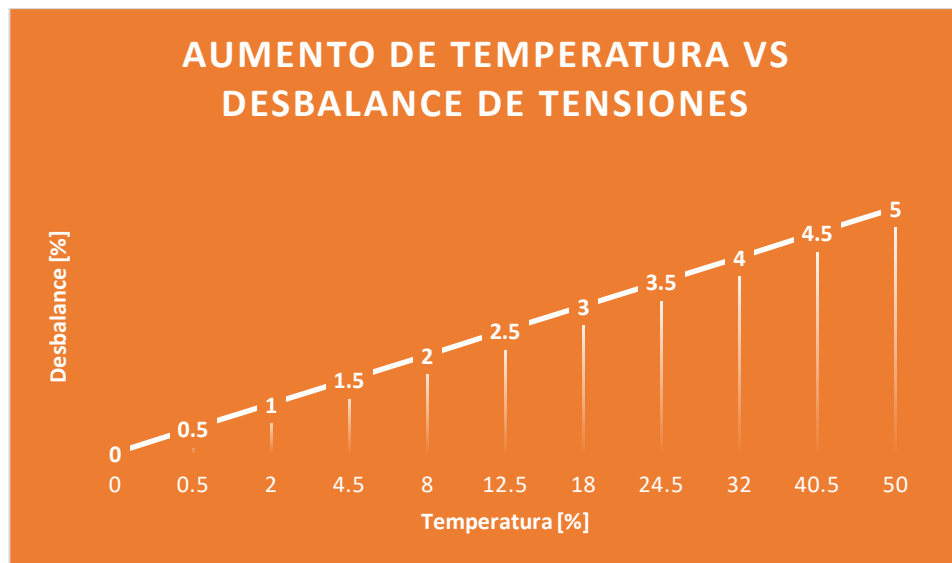


Figura 27. Gráfico de Aumento de temperatura según desbalance de tensión.

De la figura 27 se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de desbalance de tensión, linealmente también se produce un incremento de la temperatura.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- La normativa de calidad de SIGET contempla varios parámetros a considerar para poder determinar “la calidad” del servicio eléctrico, en términos de la calidad del producto técnico suministrado SIGET se refiere al producto técnico como los elementos o parámetros a realizar las mediciones para poder de manera técnica obtener resultados en campañas de medición. En este caso en su norma de calidad solo presenta en cuanto a tensión se refiere, regulación de tensión. Por lo tanto, el desbalance de tensión no es considerado en la normativa vigente.
- Para el análisis de desbalance de tensión, se puede utilizar cualquier método desde el punto de vista legal, sin embargo, el método más exacto para el análisis se da por medio de la norma IEC 61000-4-30 “análisis por medio de componentes simétricas” el cual garantiza la mayor cantidad de variables, considerando un porcentaje de desbalance permitido no mayor al 2%.
- Como metodología de medición SIGET en su norma de calidad de energía al no considera el desbalance de tensión como producto técnico, no define un proceso para la obtención de datos, Sin embargo, IEEE STD 1159, “Recommended Practice For Monitoring Electric Power Quality”, define un método para la obtención de datos para que luego puedan ser analizados por los métodos recomendados en las normas NEMA, IEEE, IEC.
- IEC establece que para que una campaña de medición de desbalance de tensión el equipo deberá ser clase “A” para mediciones precisas utilizando el método de análisis por componentes simétricas y una clase “B” en resolución de problemas o aplicaciones donde no se requiere baja incertidumbre. El fabricante especificará los algoritmos y métodos utilizados para calcular el desequilibrio.

- Para efectos de análisis, las metodologías de cálculos tradicionales resultan útiles para condiciones sin desequilibrio de tensiones, pero para casos en donde existe presencia de desequilibrio de tensión es necesario utilizar un método que considere un análisis por sistemas de secuencias ya que se producen efectos (elevaciones de temperatura, mayor consumo, etc.), pérdidas a considerar en los motores de inducción
- Debido a la cantidad de cálculos necesarios para desarrollar el estudio en cada entrada de datos, fue necesaria la creación de una herramienta la cual facilitara el procesamiento de todas estas operaciones de forma repetitiva y eficiente. Por tal razón se creó la herramienta “Calculador de desbalance” creada como un script que corre bajo la plataforma Matlab y hace uso de herramientas como Simulink y Guide para la simulación de un motor trifásico que puede ser configurado según sea la necesidad.
- El calculador de pérdidas es una herramienta de cálculo que tiene la capacidad de análisis de cualquier cantidad de datos de entrada según sea requerido, mostrar resultados en términos de potencia y costos por energía consumida. también tiene la capacidad de mostrar datos en tiempo real así como también almacenar los resultados en un archivo tipo .xmls para su posterior análisis, logrando en un entorno grafico facilitar el ingreso de datos referidos a su configuración previa al análisis.
- Se analizó un motor de inducción trifásico de 50Hp, 440V, 60Hz con datos obtenidos de una medición realizada en una estación de bombeo por un periodo de 7 días, los cuales muestran un desbalance de tensión de 1.78% en promedio, obteniendo un consumo por energía nominal demandada de \$886.28 y consumo por energía demandada en termino de pérdidas de \$115.78. Siendo el costo total a pagar de: \$1002.06 en presencia del desbalance de tensión, se puede observar un

incremento a pagar por cargo de energía demandada en términos de pérdidas correspondiente a un 7.65% del consumo normal.

- Los costos por energía consumida no representan un incremento sustancial por pérdidas de desbalance de tensión a corto plazo, pero si a un largo plazo.
- La potencia que el motor entrega se ve afectada directamente por el desbalance, reduciendo esta la capacidad del motor de entregar toda su potencia a la carga para la cual fue instalado. Esta reducción de potencia también se ve reflejada en la entrada, haciendo parecer que el motor está demandando menos potencia a la fuente debido a esta condición de desbalance.
- Se demuestra en la tabla 16 que a diferentes porcentajes de desbalance de tensión, que van desde 0% hasta 5% en incrementos de 0.5%, existe un aumento en los costos que van desde 0.62% hasta 7.58% por energía consumida en pérdidas por desbalance de tensión.
- El desbalance de tensión causa en entre otros fenómenos una aparición de corrientes de secuencias positiva y negativa las cuales causan fenómenos que afectan directamente e funcionamiento del motor aumentando las pérdidas en este debido a la aparición de flujos magnéticos contrarios que causan en este una carga extra a vencer al momento de funcionar, por ende, demanda más energía que se convierte directamente en pérdida pues no es aprovechada de ninguna manera por el motor para su funcionamiento o rendimiento en la operación del trabajo para el cual está destinado.
- El aumento del desbalance de tensión incide directamente en el incremento de pérdidas y esto se traduce en dinero, el cual se paga directamente en la factura como consumo de energía absorbida, gastado en la reparación y recambio de unidades, por este fenómeno se deteriora el aislamiento de las bobinas de un motor

en un menor tiempo del estimado debido a los flujos de corrientes desbalanceadas que causan calor adicional al del normalmente esperado en un ambiente de trabajo al exceder la temperatura para la cual están especificados.

- Un desbalance del 3% representa un 3.86% de incremento en el consumo diario de operación y este mismo desbalance puede causar un aumento en la temperatura del 18% es decir un motor trabajando a 40 °C sentirá una temperatura de 47.2 °C. Puede considerarse como un aumento en el consumo despreciable y asumible en la operación continua de esta situación, pero la inversión en el mantenimiento y recambio de nuevas unidades es inminente.

6.2 RECOMENDACIONES

- Las siguientes recomendaciones son para que se lleve a cabo una revisión de la Norma de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución (SIGET), en la sección de producto técnico: desbalance de tensión ya que no cuenta con ninguna consideración más que la que se menciona en el art. 19 que solo hace mención de del criterio de medición para ese parámetro.
 - Adoptar una normativa internacional en donde se contemple el desbalance de tensión, métodos de análisis, límites permisibles, causas y efectos de este parámetro, la siguiente recomendación se ha hecho en base a el contenido de las normas IEEE Std 1159-1995, IEC 61000-4-30, UNE EN 50160 siendo parte de ella compatible con la norma de calidad existente y vigente en el país ya que contiene indicadores de algunos contenidos siendo iguales o similares. Donde en la sección 2.10 Desequilibrio de tensión suministrada se describen los límites admisibles de desequilibrio para evitar daños en cargas trifásicas y evitar generar costos por no tener un sistema simétrico.
- Separación de fuentes de alimentación trifásicas con las monofásicas, se obtiene una mejora suplementaria alimentando con transformadores separados. Aunque esta opción es más cara económicamente hablando porque eleva el costo de la instalación.
- Cambiar la configuración de la sub estación, una conexión delta-estrella elimina los armónicos de orden 3 (los armónicos circulan por cada una de las fases, y retornan por el neutro del transformador).
- Identificar la fuente del desbalance de tensión, el desbalance de tensión puede producirse por efecto de distribución de los equipos los tableros de la instalación eléctrica, también por efectos del suministro eléctrico, por lo tanto, al realizar

campañas de medición y diferentes puntos en la instalación eléctrica se podría determinar la fuente.

- Utilización de un filtro pasivo, la instalación de este filtro ayudara a la corrección del factor de potencia.
- Utilización de un filtro activo, es necesaria la reducción de la tasa de distorsión de corriente para evitar las sobrecargas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] José R. López Beltrán y Elvia N. Ventura Gámez. (2019). *Estudio del desbalance de tensiones y sus efectos en la calidad del producto técnico para sistemas de distribución a nivel industrial*. Universidad del Salvador.
- [2] Blanca Martínez, Yancy Henríquez, Edgardo Recinos (2008). *Evaluación de las Normas de Calidad del Servicio en los Sistemas de Distribución de SIGET*. Universidad del Salvador.
- [3] “IEC 60050(161),” International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 161: Electromagnetic compatibility*.
- [4] “IEEE std 1159”, IEEE, Tech. Rep., 1995, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*.
- [5] “IEC 61000-4-30,” International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 2003. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*.
- [6] “UNE 61000-3-2”, Compatibilidad electromagnética (CEM), (2005), *Limites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada < 16 A por fase)*.
- [7] “IEEE Std. 519-1992”, IEEE, Tech. Rep., (1992), *IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electrical power systems*.
- [8] Gonzalo Casaravilla y Virginia Echinope, Instituto de Ingeniería Eléctrica, *Desbalances – Estudios de alternativas para su estimación*.

[9] Juan C. Hidalgo B. Grupo TERMOGRAM, *Análisis de las zonas de falla de motores eléctricos.*

[10] Enrique Ciro Quispe Oqueña, Grupo de Investigación en Energías GIEN-UAO, Departamento de Energética y Mecánica Universidad Autónoma de Occidente, *Efectos del Desbalance y los Armónicos de Voltaje en la Operación de los Motores de Inducción.*

[11] Luis Antonio Guardiola de Cabo, Ingeniería Técnica Industrial, Especialidad en Electricidad, *Análisis de la norma IEC 60034-2-1. Aplicación en la determinación de las pérdidas y el rendimiento de motores de inducción trifásicos.*

[12] Ismael Morera Alonso, Ingeniero Industrial, *Identificación de Parámetros de Modelos de Motores de Inducción a Partir de Datos de Catálogo, 2010.*

[13] Rafael Rodríguez Berdún, Trabajo Fin de Grado: Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales, *Efectos de desequilibrio de tensión en máquinas de inducción.*

[14] “ANSI std C84.1-2006”, American National Standard for Electric Power Systems and Equipment—Voltage Ratings (60 Hertz)

[15] “IEC 61000-2-2”, International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 1990, Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2-2: “Compatibility Levels for Low Frequency Conducted Disturbances and Signaling in Public Low- Voltage Power Supply Systems.”

[16] “IEC 61000-3-2”, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: “Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)”

[17] “IEC 61000-4-27”, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-27: Testing and measurement techniques - Unbalance, immunity test, 2020

[18] Norma de Calidad del Servicio de los Sistemas de Distribución.
Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones, Acuerdo 192-E-2004.

[19] “UNE EN 50160”, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems.

[20] “NEMA MG1-2009: Motors and Generation”, Published By National Electrical Manufacturer’s Association, 2009, Sección 14.36.

[21] Jesús Fraile Mora, Catedrático de electrotecnia E.T.S.I caminos, Canales y puertos U.P.M, *Maquinas Eléctricas, quinta edición en español.*

[22] Norma técnica de conexiones y reconexiones eléctricas en redes.
Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones, Acuerdo 93-E-2008.

ANEXOS

- Cálculo de diferencia porcentual de dinero según desbalance de tensión

Unb [%]	Perdidas nominales [kW]	Perdidas desbalance [kW]	Eficiencia [%]	Dinero por año [\$]	Aumento de temperatura [%]
0	4.17	0.83	87.12	6127.87	0
0.5	4.14	0.84	87.07	6090.17	0.5
1	4.18	0.84	87.09	6152.97	2
1.5	4.11	0.86	86.95	6082.09	4.5
2	4.07	0.87	86.82	6053.20	8
2.5	4.40	0.89	86.64	6481.18	12.5
3	4.59	0.92	86.49	6741.32	18
3.5	4.95	0.95	86.30	7217.90	24.5
4	5.50	0.98	86.08	7930.88	32
4.5	5.13	1.02	85.95	7534.48	40.5
5	5.59	1.06	85.69	8152.34	50

Tabla 12. Diferencia porcentual de dinero según desbalance de tensión.

$$\Delta\% = \left(1 - \frac{\textit{Anterior}}{\textit{Actual}}\right) \times 100 \quad (5.1)$$

Donde:

$\Delta\%$: diferencia porcentual

Anterior: Valor anterior en dólares por año

Actual: Valor actual en dólares por año

- Incremento de la temperatura según desbalance

Unb [%]	Aumento de temperatura [%]	Trabajando a 40 grados
0	0	40
0.5	0.5	40.2
1	2	40.8
1.5	4.5	41.8
2	8	43.2
2.5	12.5	45
3	18	47.2
3.5	24.5	49.8
4	32	52.8
4.5	40.5	56.2
5	50	60

Tabla 13. Incremento de temperatura según desbalance.

$$\Delta T = 2 * Unb^2 \quad (5.2)$$

Donde:

ΔT : Cambio de temperatura

Unb : Desbalance de voltaje

- **Desbalance vs eficiencia de un motor trifásico de inducción**

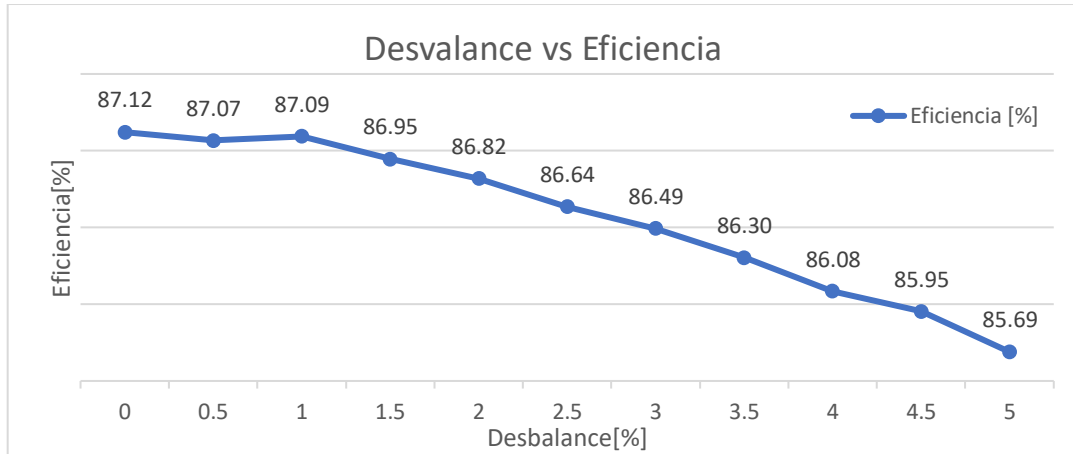


Figura 28. Gráfico de eficiencia según desbalance de tensión

- **Circuitos equivalentes de secuencia positiva y negativa, generado cuando existe desbalance de tensión en un motor de inducción.**

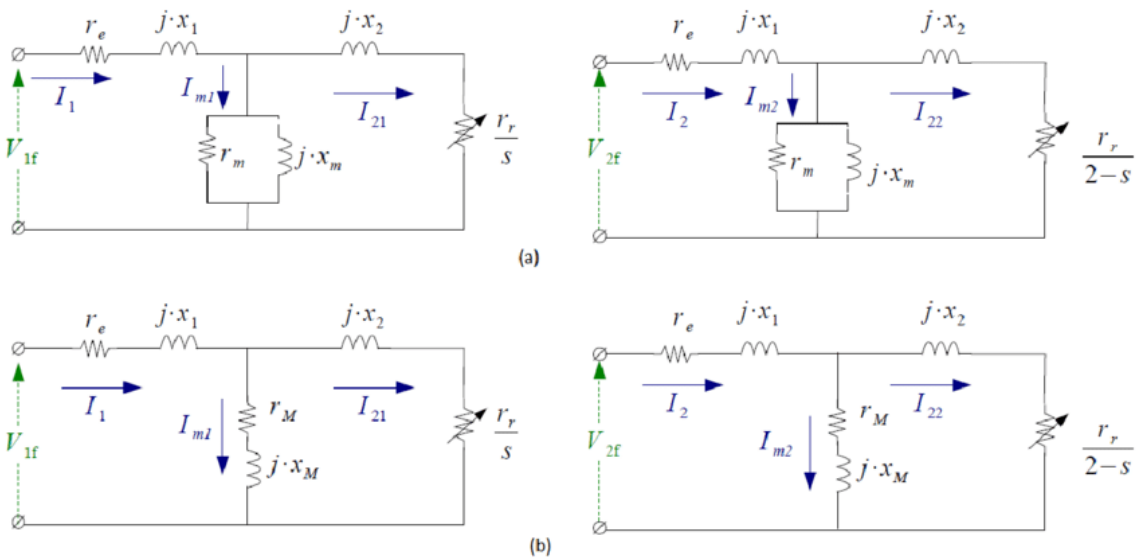


Figura 29. Circuitos equivalentes de secuencia positiva y negativa para el motor de inducción incluyendo las pérdidas en el hierro. (a) Considerando la rama de magnetización en paralelo y (b) Considerando la rama de magnetización en serie (circuito en T).

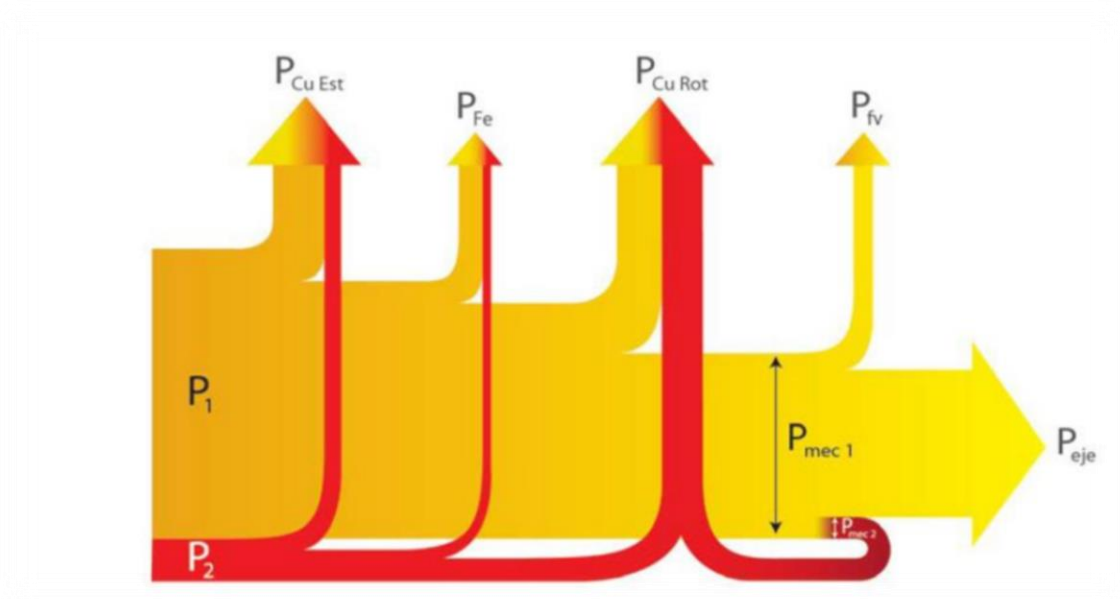


Figura 30 Flujo de potencias en motor trifásico de inducción

GLOSARIO

ANSI: Instituto de Normas Nacionales Americanas, es un cuerpo que administra numerosas normas industriales en el EE.UU. Incluyendo varios que pertenece a la construcción de utilidad eléctrica.

NEMA: National Electrical Manufacturers Association, es una organización de normalización en Washington, EE. UU., que publica una serie de estándares técnicos.

IEC: Comisión Internacional Electrotécnica.

IEEE: Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

SIGET: Súper Intendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones.

Voltaje Nominal: Voltaje con que se especifica o se diseña un sistema.

LVUR: Tasa de Desequilibrio de voltaje de línea

THD: Distorsión armónica total

RMS: Valor eficaz

HVF: Factor de voltaje armónico

PVUR: Tasa de desequilibrio de voltaje de fase

VUF: Factor de desequilibrio de voltaje

TC: Transformador de corriente

CA: Corriente alterna

DVM: Voltímetro digital

CC: Corriente continua

NEC: Código eléctrico nacional

MATLAB: Matrix Laboratory

GUIDE: Interfaz gráfica de usuario

Simulink: Simulador del comportamiento de los sistemas dinámicos

DSP: Procesamiento digital de señales.

Mediana Demanda: Comprende aquellos servicios cuya demanda máxima es mayor a 10kW y hasta 50 kW.

Pliego tarifario: Son los precios de la energía eléctrica a trasladar a las tarifas de las distintas empresas distribuidoras.

Consumo de energía eléctrica: Es toda la energía eléctrica que se utiliza para hacer funcionar maquinaria del tipo eléctrico.

Baja Tensión: Nivel de tensión menor o igual a seiscientos (600) voltios.

CAESS: Compañía de alumbrado eléctrico de san salvador S.A de C.V.

Desbalance de tensión [%]: Es un indicador de cuán diferentes son las tensiones de un sistema trifásico entre sí expresado en términos de porcentaje.

Carga del motor [%]: Equivalente al par motor que tiene que suministrar un motor eléctrico para vencer las resistencias que se oponen a su movimiento expresado en términos de porcentaje.

Eficiencia del motor [%]: La eficiencia de un motor se define como la relación que existe entre la potencia de salida (mecánica) y la potencia de entrada (eléctrica), expresada en porcentaje.

Energía de cada fase [kWh]: Potencia demandada de un sistema trifásico demanda en el tiempo.

Energía por pérdidas [kWh]: Potencia demandada en términos de tiempo que no es aprovechada para la realización del trabajo.

Consumo en cada fase [\$]: Es el valor de la energía por cada fase expresado en términos de dinero.

Consumo por pérdidas [\$]: Es el valor de la energía de las pérdidas expresada en términos de dinero.

Franja horaria [resto – punta – valle]: División de tiempo en horas por día que define el uso que se le da a la energía durante ese tiempo.

Archivo de salida (xmls): Documento con formato específico “xmls” correspondiente a Microsoft Excel, en el cual se almacenan todos los datos obtenidos del uso del calculador de pérdidas.

Archivo de franja horaria .txt: Archivo de texto plano el cual contiene las tarifas de interés para el análisis correspondiente, en un formato separado por comas.

Calculador de pérdidas: Herramienta de cálculo diseñada sobre lenguaje de programación MATLAB, puede hacer cálculos de desbalance de tensión y hacer un análisis de pérdidas en motores trifásicos de inducción y traducirlas en costos a pagar por consumo de energía en la facturación.

Script: Es una secuencia de comandos que son ejecutados por un intérprete y no necesitan ser compilados.