



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO AL
SISTEMA DE POTENCIA DE LA SUBESTACIÓN DE 69KV EN INGENIO
AZUCARERO DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA, EMPLEANDO ESTUDIO DE
CALIDAD DE POTENCIA, CUMPLIENDO LA NORMA IEC 61000-4-30**

Abner Haroldo Castellanos Arana

Asesorado por el MSc. Ing. Jorge Enrique Mejía Morales

Guatemala, septiembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO AL
SISTEMA DE POTENCIA DE LA SUBESTACIÓN DE 69KV EN INGENIO
AZUCARERO DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA, EMPLEANDO ESTUDIO DE
CALIDAD DE POTENCIA, CUMPLIENDO LA NORMA IEC 61000-4-30**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ABNER HAROLDO CASTELLANOS ARANA

ASESORADO POR EL MSC. ING. JORGE ENRIQUE MEJÍA MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pèrez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftalí López Orozco
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pèrez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO AL SISTEMA DE POTENCIA DE LA SUBESTACIÓN DE 69KV EN INGENIO AZUCARERO DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA, EMPLEANDO ESTUDIO DE CALIDAD DE POTENCIA, CUMPLIENDO LA NORMA IEC 61000-4-30

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 23 de septiembre de 2018.



Abner Haroldo Castellanos Arana

Ref. AGS-MIMPP-002-2019

Guatemala, 26 de febrero de 2019.

Director
Otto Fernando Andrino González
Escuela de **Ingeniería Eléctrica**
Facultad de Ingeniería
Su despacho.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Abner Haroldo Castellanos Arana** con carné número **200213074**, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Ingeniería en Mantenimiento**.

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

Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a todos"



Maestro. Ing. Jorge Enrique Mejía M.
Asesor(a)

Sandra Ninett Ramirez Flores
INGENIERA QUÍMICA, COL. No. 437
Asc. INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

Maestra. Inga. Sandra Ninett Ramírez F.
Coordinadora de Ingeniería de Mantenimiento



Maestro. Ing. Edgar Darío Álvarez Col
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Cc: archivo/L.Z.L.A.

RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA: Proceso de Graduación aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.



REF. EIME 26.2019.
20 DE MAYO 2019.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y visto bueno del revisor y la aprobación del Área de Lingüística de su Proyecto de Graduación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO AL SISTEMA DE POTENCIA DE LA SUBESTACIÓN DE 69KV EN INGENIO AZUCARERO DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA, EMPLEANDO ESTUDIO DE CALIDAD DE POTENCIA, CUMPLIENDO LA NORMA IEC 61000-4-30** presentado por el estudiante universitario; Abner Haroldo Castellanos Arana, considerando que el protocolo es viable para realizar el Diseño de Investigación procedo aprobarlo, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Otto Fernando Andrino González
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



Universidad de San Carlos
de Guatemala




Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 352.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO AL SISTEMA DE POTENCIA DE LA SUBESTACIÓN DE 69KV EN INGENIO AZUCARERO DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA, EMPLEANDO ESTUDIO DE CALIDAD DE POTENCIA, CUMPLIENDO LA NORMA IEC 61000-4-30**, presentado por el estudiante universitario: **Abner Haroldo Castellanos Arana**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Ariabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, septiembre de 2019

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme vida, salud, sabiduría y fuerzas para alcanzar este gran logro en mi vida.
- Mis padres** Haroldo Castellanos y Celia Arana, por su amor y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida y formación profesional.
- Mi hermana** Evelin Castellanos, por su cariño, por su apoyo hacia mi persona y por todos los momentos que hemos compartido.
- Mis abuelos** (q. e. p. d.) Por su paciencia y amor.
- Mis tíos y primos** Por su apoyo y cariño incondicional.
- Mis hermanos** Por ser mi compañía y por todos esos momentos que hemos compartido, sé que puedo confiar en ustedes. Gracias por su apoyo incondicional.
- Mis amigos** Wuilmar Velásquez, Alejandro Retana, Alexis Bardales, Anael Argueta, William Colindres y todos con quienes compartí buenas y malas experiencias a lo largo de la carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

Guatemala

Mi querido país, donde tuve el privilegio de nacer y el que me ha visto crecer y convertirme en un profesional.

Universidad de San Carlos de Guatemala

Por brindarme la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos, por la formación académica y profesional.

Facultad de Ingeniería

Por brindarme los conocimientos técnicos y científicos en toda mi formación académica y profesional.

Mis amigos de la Facultad

Por todos estos años de amistad y muchas horas de estudio, en que compartimos muchos buenos momentos. Gracias por su apoyo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
3.1. Descripción.....	9
3.2. Formulación de preguntas	11
3.2.1. General	11
3.2.2. Específica 1	11
3.2.3. Específica 2	11
3.2.4. Específica 3	11
4. JUSTIFICACIÓN	13
5. OBJETIVOS	15
5.1. Objetivo general	15
5.2. Objetivos específicos.....	15
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	17

7.	MARCO TEÓRICO	21
7.1.	Importancia de calidad de potencia eléctrica	21
7.2.	Definición de calidad de potencia eléctrica	22
7.3.	Tipos de componentes eléctricos.....	23
7.3.1.	Cargas lineales.....	23
7.3.2.	Cargas no lineales.....	24
7.4.	Parámetros de calidad de suministro	25
7.4.1.	Transitorios.....	26
7.4.1.1.	Transitorios oscilatorios.....	26
7.4.1.2.	Transitorios impulsivos	27
7.4.2.	Desbalance de voltaje	28
7.4.3.	Variaciones de voltaje de corta duración.....	30
7.4.3.1.	Depresión de voltaje (<i>sag</i>).....	31
7.4.3.2.	Elevación de voltaje (<i>swell</i>)	32
7.4.3.3.	Interrupciones de voltaje	33
7.4.4.	Distorsión armónica.....	34
7.4.4.1.	Distorsión armónica total (THD)	36
7.4.5.	Parpadeo (<i>flicker</i>)	37
7.5.	Normas.....	39
7.5.1.	Normas para la medición de calidad de potencia eléctrica	40
7.5.2.	Normas IEC 61000-4-30.....	41
7.6.	Generalidades del mantenimiento.....	41
7.6.1.	Mantenimiento correctivo	43
7.6.2.	Mantenimiento preventivo	44
7.6.3.	Mantenimiento predictivo.....	46
7.7.	Plan de mantenimiento predictivo	48
7.8.	Mantenimiento predictivo con medidor de calidad de potencia, empleando norma IEC 61000-4-30.....	50

7.8.1.	Progresos del mantenimiento en sistemas eléctricos.....	51
7.8.1.1.	Punto de conexión común	53
7.8.2.	Norma IEC 61000-4-30 sobre métodos de medición de calidad de potencia.....	55
7.8.2.1.	Mediciones clase A de la norma IEC 61000-4-30	56
7.8.2.2.	Mediciones clase B de la norma IEC 61000-4-30	57
7.8.3.	Analizador de calidad de potencia	58
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	61
9.	METODOLOGÍA.....	65
9.1.	Tipo de investigación.....	65
9.2.	Alcances de la investigación.....	65
9.3.	Diseño de investigación.....	66
9.4.	Variables cuantitativas.....	66
9.4.1.	Voltaje.....	66
9.4.2.	Armónicos THD	67
9.4.3.	Transitorios	67
9.4.4.	Desbalances	67
9.4.5.	<i>Flicker</i>	67
9.5.	Indicadores	68
9.6.	Fases de estudios	69
9.6.1.	Selección de la muestra	69
9.6.2.	Recolección de datos cuantitativos.....	69
9.6.3.	Análisis de datos cuantitativos.....	69
9.7.	Resultados esperados	70

10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	71
10.1.	Gráfico circular	71
10.2.	Gráfico de barras	72
10.3.	Línea de tendencia.....	72
11.	CRONOGRAMA	75
12.	RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	77
12.1.	Recursos.....	77
12.1.1.	Recurso humano	77
12.1.2.	Recurso material y equipo.....	77
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS





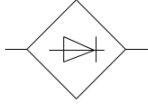

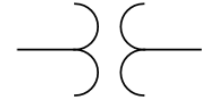
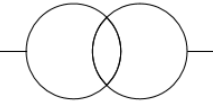

1.	Diagrama de flujo para medición de calidad de energía	18
2.	Cargas lineales en un circuito eléctrico	24
3.	Representación de cargas no lineales en un circuito eléctrico.....	25
4.	Transitorio oscilatorio	27
5.	Transitoria impulsiva	28
6.	Desbalance de voltaje	30
7.	Depresión de voltaje (<i>sag</i>)	32
8.	Elevación de voltaje en dos fases (<i>swell</i>).....	33
9.	Interrupción de voltaje	34
10.	Espectro de la distorsión armónica	35
11.	Espectro de la distorsión armónica total.....	36
12.	Índice de severidad de corta duración Pst	38
13.	Índice de severidad de larga duración Plt	39
14.	Punto de conexión común.....	54
15.	Medición en el punto de conexión común	55
16.	Medidor de calidad de potencia	59
17.	Cronograma de actividades	75

TABLAS

I.	Campo de aplicación de normas	40
II.	Ventajas y desventajas del mantenimiento correctivo	44
III.	Ventajas y desventajas del mantenimiento preventivo	46

IV.	Ventajas y desventajas del mantenimiento predictivo.....	47
V.	Rango de parámetros para mediciones clase A	57
VI.	Rango de parámetros para mediciones clase B	58
VII.	Indicadores de calidad de potencia.....	68
VIII.	Recurso financiero	78

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
 c	Capacitor en general
	Circuito digital integrado
 AC L	Fuente de corriente alterna
	Inductor en general
	Puente rectificador
 R	Resistencia en general
	Transformador principal
	Transformador secundario
 Q	Transistor bipolar

GLOSARIO

Amperaje	Movimiento de cargas eléctricas a través del medio conductor.
Bobina	Arrollamiento de alambre magneto sobre un núcleo laminado que, al ser sometido a una diferencia de potencial en sus puntas, genera magnetismo, que es canalizado por medio del núcleo.
Calidad de potencia	Es la condición de tensión, frecuencia y forma de onda del servicio de energía eléctrica, suministrada a los usuarios de acuerdo con las normas y reglamentos aplicables.
Calidad total	Forma de gestión de un organismo centrada en la calidad y basada en la participación de todos sus miembros.
Capacitor	Dispositivo que almacena carga eléctrica en forma de campo eléctrico.
Carga	Cantidad de potencia que debe ser entregada en un punto dado de un sistema eléctrico.
Confiabilidad	Es la habilidad del sistema eléctrico para mantenerse integrado y suministrar los

requerimientos de energía eléctrica en cantidad y estándares de calidad, tomando en cuenta la probabilidad de ocurrencia de la contingencia sencilla más severa.

Continuidad	Es el suministro ininterrumpido del servicio de energía a los usuarios, de acuerdo a las normas y reglamentos aplicables.
Circuito	Trayecto o ruta de una corriente eléctrica, formado por conductores, que transporta energía eléctrica entre fuentes.
Distorsión	Alteración de la forma de una señal cuando pasa a través de un sistema eléctrico.
Disturbio eléctrico	Variación o desorden de un sistema eléctrico en condiciones normales.
Distribución	Es la conducción de energía eléctrica desde los puntos de entrega de la transmisión hasta los puntos de suministro a los usuarios.
Efecto Joule	Pérdida de potencia activa, debida a la resistencia de un conductor, la cual se observa como calor y se representa y calcula como $P = I^2R$.

Equipo	Dispositivo que realiza una función específica utilizando una parte de o en conexión con una instalación eléctrica para la operación.
Factor de potencia	Coseno de ángulo formado por el desfase existente entre la tensión y la corriente en un circuito eléctrico alterno; representa el factor de utilización de la potencia eléctrica entre la potencia aparente o de placa con la potencia real.
Falla	Es una alternación o daño permanente o temporal en cualquier parte del equipo, que varía sus condiciones normales de operación y que generalmente causa un disturbio.
Forma de onda	Es una representación visual o gráfica del valor instantáneo de la señal, trazado contra el tiempo.
Frecuencia	Número de veces que la señal alterna se repite en un segundo. Su unidad de medida es el hertz (Hz).
Generación	Producción de energía eléctrica por el consumo de alguna otra forma de energía.
Hertz (Hz)	Unidad de la frecuencia en las corrientes alternas y en la teoría de las ondas. Es igual a una vibración o a un ciclo por segundo.

IEC	La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC por sus siglas en inglés) es la principal organización del mundo que prepara y publica estándares internacionales para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y relacionadas.
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE por sus siglas en inglés).
Inductor	Dispositivo que almacena carga eléctrica en forma de campo magnético.
Mantenimiento	Conservación de una cosa en buen estado o en una situación determinada para evitar su degradación.
Medición	Comparación de un valor obtenido por medio de un aparato y un patrón ya establecido y normado.
Motor	Máquina eléctrica diseñada para la conversión de energía eléctrica en energía mecánica.
Perturbación	Acción y efecto de alterar el estado estable del sistema eléctrico.
Potencia eléctrica	Tasa de producción, transmisión o utilización de energía eléctrica, generalmente expresada en Watts.

Producción	Departamento (o empresa) que requiere y demanda el servicio de mantenimiento de los equipos que utiliza para producir bienes y servicios.
PU	Relación entre una cantidad y la cantidad base. Se expresa como un decimal. En ingeniería eléctrica, en el campo de los sistemas eléctricos, se expresan las cantidades eléctricas (potencia, tensión, corriente, impedancia) como valores por unidad.
RMS	Valor del voltaje o corriente en C.A. que produce el mismo efecto de disipación de calor que su equivalente de voltaje o corriente directa.
Sag	Disminución de voltaje por un período menor de un segundo en un sistema eléctrico.
Sistema eléctrico	Instalaciones de generación, transmisión y distribución, físicamente conectadas entre sí, operando como una unidad integral, bajo control, administración y supervisión.
Subestación	Conjunto de aparatos eléctricos localizados en un mismo lugar, y edificaciones necesarias para la conversión o transformación de energía eléctrica o para el enlace entre dos o más circuitos.
Swell	Incremento de voltaje significativo por un período menor de un segundo en un sistema eléctrico.

Transformador

Dispositivo que sirve para convertir el valor de un flujo eléctrico a un valor diferente.

Transitorio

Cuando se hace pasar a un circuito de una condición a otra se produce un período de transición, durante el cual las corrientes en las ramas y las caídas de tensión varían desde sus valores iniciales hasta otros nuevos.

Voltaje

Magnitud física que impulsa a los electrones a lo largo de un conductor en un circuito eléctrico cerrado.

RESUMEN

En el presente trabajo se propone el diseño de un plan de mantenimiento por medio del análisis de calidad de potencia, con base en la norma IEC61000-4-30. Este se presenta como una alternativa para predecir fallas en la red eléctrica en usuarios de la industria. Este documento aborda definiciones que están relacionadas con la calidad de potencia, tipos de mantenimiento y la descripción del instrumento de medición de calidad de potencia, como también todo lo referente al normativo que lo regula. Este documento está compuesto en una primera parte por la investigación de datos similares ocurridos anteriormente y el planteamiento del problema en específico en un ingenio azucarero de la costa sur de Guatemala, para a su vez con estos elementos poder justificar la investigación y establecer objetivos concretos.

Con base en lo expuesto previamente, la segunda parte consta de un marco teórico, en el cual se abordan conceptos fundamentales y precisos para el desarrollo de la investigación. En esta parte también se incluye la metodología a emplear, el tipo de investigación, alcances, indicadores, fases de estudio, recolección de datos, así como la técnica de análisis de información, que es fundamental para la propuesta del plan del mantenimiento predictivo, por medio del estudio de calidad de potencia con la norma IEC 61000-4-30. También se incluyó el estudio de factibilidad para la investigación, todo esto apoyado en las fuentes bibliográficas necesarias.

1. INTRODUCCIÓN

En el departamento de Escuintla se encuentra ubicado el Ingenio Santa Ana, cuenta con una subestación interconectada al Sistema Nacional Eléctrico en dos líneas de 230 KV y a un generador del ingenio con una potencia instalada de 62,3 MW. Allí también se encuentra una subestación de enlace de 230 KV a 69 KV, existe una tercera subestación con una entrada de 69 KV que sirve como distribuidora del servicio eléctrico de todo el ingenio.

El enfoque principal del ingenio es la producción de azúcar de caña, siendo su producción en el mes de noviembre hasta el mes de mayo del siguiente año. En meses de producción se genera energía eléctrica por cogeneración con biomasa, en los meses de mayo a junio no se produce azúcar de caña, pero se genera energía eléctrica por medio de carbón mineral.

En el período de producción de azúcar de caña en el ingenio se presentan fallas recurrentes, lo cual hace el sistema eléctrico y de cogeneración muy inestable, hasta llegar al punto que el Ingenio Santa Ana llega a presentar una falta de suministro eléctrico total, como consecuencia se detiene la producción de caña de azúcar, teniendo pérdidas económicas significativas.

La norma IEC61000-4-30 establece parámetros de calidad del suministro de energía eléctrica, para comparar los resultados estadísticos de las mediciones que se obtienen utilizando el analizador de redes Dranetz Power Visa clase A con los parámetros de la norma IEC61000-4-30.

La investigación se enfoca en la medición de los siguientes parámetros: potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, fluctuaciones, interrupciones, incrementos de tensión y transitorios de tensión, todos estos parámetros medidos y comparados con la norma IEC61000-4-30 dan un valor y un margen estándar, así como el diagnóstico del estado actual de la instalación, para tomar las medidas correctivas pertinentes.

El estudio está estructurado en cuatro capítulos, los cuales se describen a continuación:

En el capítulo 1 se define la importancia de la calidad de la potencia eléctrica en los ingenios azucareros, debido a que de ella depende la estabilidad del suministro eléctrico, se incluyen las características y el funcionamiento que tienen las magnitudes eléctricas, las cuales son necesarias para diseñar un plan de mantenimiento predictivo en el ingenio azucarero. También se describe el uso de la norma IEC61000-4-30 para la medición de calidad de potencia y los criterios que se utilizan para un mantenimiento predictivo que se utilizará en la investigación.

En el capítulo 2 se detallará la metodología para la obtención de datos de calidad de potencia por medio del equipo de medición Dranetz Power Visa, clase A, empleando la norma IEC61000-4-30. Con esto se obtendrán los datos estadísticos que darán la información de la red eléctrica del ingenio azucarero, y también se establecerán los parámetros para determinar la frecuencia de toma de datos y la interpretación de los resultados.

En el capítulo 3 se interpretarán los resultados estadísticos de los parámetros medidos con el analizador de redes Dranetz Power Visa, clase A, a su vez serán cotejados con la norma IEC61000-4-30, generando así una

opinión de las fallas más recurrentes que se pueden encontrar en la red eléctrica del ingenio azucarero.

En el capítulo 4 se determinan las fallas más graves que afectan el sistema eléctrico con referencia a los resultados mostrados en la interpretación de la medición, así mismo se establece la propuesta para la implementación de un plan de mantenimiento predictivo, con el fin de reducir el número de paros indebidos por fallas del sistema eléctrico del ingenio azucarero de la costa sur.

2. ANTECEDENTES

En los ingenios azucareros del sur de Guatemala nunca se ha realizado ninguna medición de calidad de potencia eléctrica en las subestaciones para medir las perturbaciones que transcurren en el sistema eléctrico, por tanto no se tiene ningún antecedente o registro interno de estas mediciones para poder compararlo. Cuando no se cuenta con esta información en sus registros, los costos de producción y mantenimiento se elevan por las constantes fallas que el sistema eléctrico presenta.

La presente investigación se orientará al análisis de las perturbaciones eléctricas de cargas no lineales de un sistema eléctrico implementado por los ingenios azucareros desde una subestación de 69 KV, recalcando que los ingenios azucareros no cuentan con un Laboratorio de Instrumentación Industrial ni con un equipo de medición de calidad de potencia. Este es un excelente motivo para llevar a cabo la investigación.

Robledo (2008) detalla que la calidad de potencia eléctrica tiene un papel importante en la modernización de la industria y el sector eléctrico lleva a establecer parámetros normalizados para protección de equipos y sistemas, se minimizan fallas y fenómenos eléctricos. Por esta razón es muy importante para el crecimiento de la industria azucarera contar con tecnología que le ayude a ser más competitiva, esto se puede lograr modernizando los equipos y sistemas de una forma que se contemplen indicadores que deben seguir normas establecidas. Los indicadores eléctricos son una forma de medir crecimiento ordenado.

Ramírez y Cano (2003) comentan que la importancia de la calidad potencia eléctrica es encontrar soluciones a los disturbios y eventos que suceden en una falla por deficiencia del sistema eléctrico, limitaciones y daño del equipo, así como malas instalaciones. Tomando en cuenta el estudio anterior se comprende que las perturbaciones que están presentes en una red eléctrica tienen un significado en la disminución de señales de corriente y tensión a la forma de onda fundamental, las interrupciones frecuentes llevan a parar procesos que provocan daños a equipos, que pueden afectar significativamente la producción de azúcar

De acuerdo con Villalobos (2007), la detección de armónicos en la red eléctrica en tiempo real se utiliza para procesar y evaluar los datos obtenidos en la calidad de energía, mientras que la predicción de la distorsión armónica eléctrica se realiza con modelos estadísticos que pueden ser simulados por medios electrónicos o digitales. Tomando en cuenta lo anterior, al observar los armónicos de una forma estadística, se espera obtener un suministro eléctrico con frecuencia constante, evitar desequilibrios de tensiones y disminución de perturbaciones eléctricas que afecten el suministro eléctrico. Esto quiere decir, contar con un servicio de una calidad óptima, seguro y confiable para los equipos, sin afectar la producción y sí causando una disminución del costo de mantenimiento.

CREG-017 (2005) comenta que para obtener una mejor referencia de la red eléctrica se mide la calidad de la potencia eléctrica con base en la calidad de tensión eléctrica. De acuerdo con la norma descrita, se obtiene un mejor control y de forma más simple se puede controlar la calidad de la potencia eléctrica con base en la calidad de la tensión. La medición de eventos puede modelar los datos estadísticos utilizando la norma IEC61000-4-30 como base, para determinar las fluctuaciones de tensión, con este método es permitido

medir la magnitud y el tiempo en el que ocurren las fluctuaciones de tensión, es un método útil para no almacenar grandes cantidades de datos. La calidad de la tensión va acompañada de la calidad de corriente que es la base para calcular toda la calidad de la potencia eléctrica.

Según la Comisión Nacional De Energía Eléctrica (2016), como se muestra en el compendio estadístico 2016, la calidad de la potencia eléctrica entregada se relaciona estrechamente con la calidad de la forma de onda de tensión de un sistema eléctrico, la forma de onda no tiene que mostrar perturbaciones o valores que estén fuera de los límites tolerables señalados en el normativo, y la calidad de la potencia eléctrica está estrechamente relacionada con medidas que afectan el funcionamiento de los equipos eléctricos que pueden provocar perturbaciones y efectos que perjudican el servicio de las redes eléctricas. Ciertamente, con la descripción anterior, es importante mantener un parámetro de regularización de las mediciones de tensión y del control de la calidad de servicio en una red eléctrica, sobre todo al no contar con un plan de mantenimiento que involucre indicadores eléctricos que pueden ser medibles, pues no se puede garantizar la continuidad del servicio eléctrico, puesto que se quiere mantener una producción de azúcar con las mínimas fallas posibles, ya que estas pueden producir paros innecesarios.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Descripción

Los ingenios azucareros de la costa sur de Guatemala tienen un crecimiento significativo sin ninguna planificación de las instalaciones a mediano o largo plazo, y a la vez sin ningún plan de mantenimiento predictivo aplicado a sus equipos, esto es la causa visible de la inestabilidad de su sistema eléctrico.

En los ingenios azucareros, así como en gran parte de la industria, la continuidad del servicio eléctrico es un factor importante para mantener los estándares de producción. Es por eso que la inestabilidad en el sistema eléctrico puede provocar daños significativos en equipos o maquinaria. Se presentan algunos de daños más comunes que pueden ocurrir:

- Sobrecalentamiento de cables, transformadores, motores
- Cortes inoportunos de energía
- Averías en la iluminación
- Daños en equipo electrónico sensible
- Resonancia

La calidad de la potencia eléctrica se puede afirmar que es un indicador de la disponibilidad del suministro de una red eléctrica, en este sentido cualquier perturbación en el sistema eléctrico de potencia se considera una pérdida de calidad, esto lleva a decir que la disponibilidad del suministro se reduce, por

consiguiente, la posibilidad de fallas o daños en equipos conectados a un sistema eléctrico de potencia es más elevada.

Es necesario crear condiciones para suministrar un sistema eléctrico de potencia eficiente, con el objeto de minimizar fallas y prolongar la vida útil de componentes y equipos, los cuales son de suma importancia para mantener una producción eficiente y de calidad.

Los ingenios azucareros no aplican un plan de mantenimiento predictivo que esté enfocado a la aplicación de técnicas de medición de calidad de potencia con analizador de redes. Tampoco se realizan mantenimientos predictivos en la subestación, solo se realizan mantenimientos correctivos, pero esto conlleva a paros prolongados, lo cual hace deficiente la red de suministro.

No existe un método para medir y analizar la calidad de la potencia eléctrica, por lo que no hay una forma de revisión y control, hasta ahora solo se encuentran registros de datos obtenidos de la experiencia práctica de los ingenieros, todo esto por no haber un plan de mantenimiento predictivo.

Para los ingenios azucareros es de suma importancia disminuir los paros en la producción por fallas, que provocan pérdidas económicas significativas. A este respecto se ha considerado la implementación de nuevas técnicas para la predicción de fallas, con el objetivo de incluirlas en un plan de mantenimiento predictivo.

3.2. Formulación de preguntas

3.2.1. General

¿Cómo se puede diseñar un plan de mantenimiento predictivo en cumplimiento con la norma IEC 61000-4-30, para reducir fallas en el sistema eléctrico de potencia de la subestación 69 KV en un ingenio azucarero?

Para proceder con el planteamiento del problema, se expresan las siguientes preguntas:

3.2.2. Específica 1

¿Cuáles son las causas principales de fallas del sistema eléctrico de potencia en la subestación de 69 kv?

3.2.3. Específica 2

¿Cuáles son los parámetros eléctricos que se deben considerar según la norma IEC 61000-4-30 para la medición de calidad de potencia eléctrica, con el objetivo de diseñar un plan de mantenimiento predictivo para reducir fallas?

3.2.4. Específica 3

¿Qué equipo se debe usar para implementar un mantenimiento predictivo en el sistema eléctrico de potencia, basado en la norma IEC 61000-4-30?

4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación se centra en la línea de investigación de normas internacionales de mantenimiento, de la Maestría en Ingeniería de Mantenimiento de la Escuela de Postgrado. La investigación incluye la línea de investigación acerca de normas técnicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, ambas de la Facultad de Ingeniería

Los ingenios azucareros de la costa sur de Guatemala están en crecimiento constante, pero crecen de una manera desordenada y sin ninguna planificación. Esto se refleja en la inestabilidad de su sistema eléctrico de potencia, que ha ocasionado paros totales en la producción de azúcar de caña, provocando pérdidas económicas, debido a ello se tiene la necesidad de implementar un mantenimiento predictivo con base en una norma que garantice el buen funcionamiento del sistema eléctrico.

En los ingenios azucareros de la costa sur de Guatemala no existe un estudio anterior donde se implemente un plan de mantenimiento predictivo basado en medición de calidad de potencia. La importancia de realizar esta investigación es poder especificar las causas que provocan los cortes de energía eléctrica que son provocados por fallas y el elevado costo del mantenimiento que a su vez provoca pérdidas de producción de azúcar.

La investigación contribuirá al funcionamiento de los equipos de una manera eficiente, considerando la detección de anomalías antes de que se conviertan en posibles fallas y antes incluso de que aparezcan, pues teniendo el conocimiento de las causas de las fallas encontradas se pueden resolver

metódicamente y a su vez disminuir la cantidad de paros de los equipos y de producción de azúcar.

La mayoría de sistemas eléctricos de potencia presentan una cierta cantidad de perturbaciones en sus equipos, estas perturbaciones son un indicativo de que se presentan una o más fallas eléctricas que acontecen en el tiempo, por consiguiente es necesario realizar la investigación, ya que existen normas internacionales como la IEC 61000-4-30, que es una base para determinar límites en la medición de calidad de potencia eléctrica, por otra parte se añaden los conocimientos de mantenimiento predictivo, se tiene el respaldo de implementar una nueva técnica para obtener datos, con la motivación de disminuir el riesgo de fallas.

La importancia de la investigación se centra en una nueva técnica para la predicción de detección de fallas en un sistema eléctrico industrial de gran magnitud.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Diseñar un plan de mantenimiento predictivo para el sistema de potencia de la subestación de 69kv en un ingenio azucarero, empleando el estudio de calidad de potencia, según la norma IEC 61000-4-30.

5.2. Objetivos específicos

- Identificar las causas que provocan las fallas del sistema eléctrico de potencia desde la subestación de 69 kv en un ingenio azucarero.
- Determinar los parámetros eléctricos de la medición de la calidad de potencia eléctrica según la norma IEC 61000-4-30, para establecer un plan de mantenimiento predictivo y reducir fallas.
- Emplear un analizador de calidad de potencia Dranetz Power Visa, clase A, para implementar un plan de mantenimiento predictivo basado en la norma IEC61000-4-30.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

En el ingenio azucarero se tienen fallos por inestabilidad del sistema, los cuales generan a su vez costos innecesarios por paros en la producción. La inestabilidad en el sistema es un término que se emplea para hacer referencia a una causa de origen desconocido, lo que hace necesario analizar el sistema eléctrico para saber si en realidad tiene componentes que lo hacen inestable.

Se requiere reducir fallas en el sistema eléctrico para evitar paros que afectan la producción, lo cuales tienen un costo económico alto. A su vez se busca mejorar la eficiencia de los equipos y de las líneas de producción.

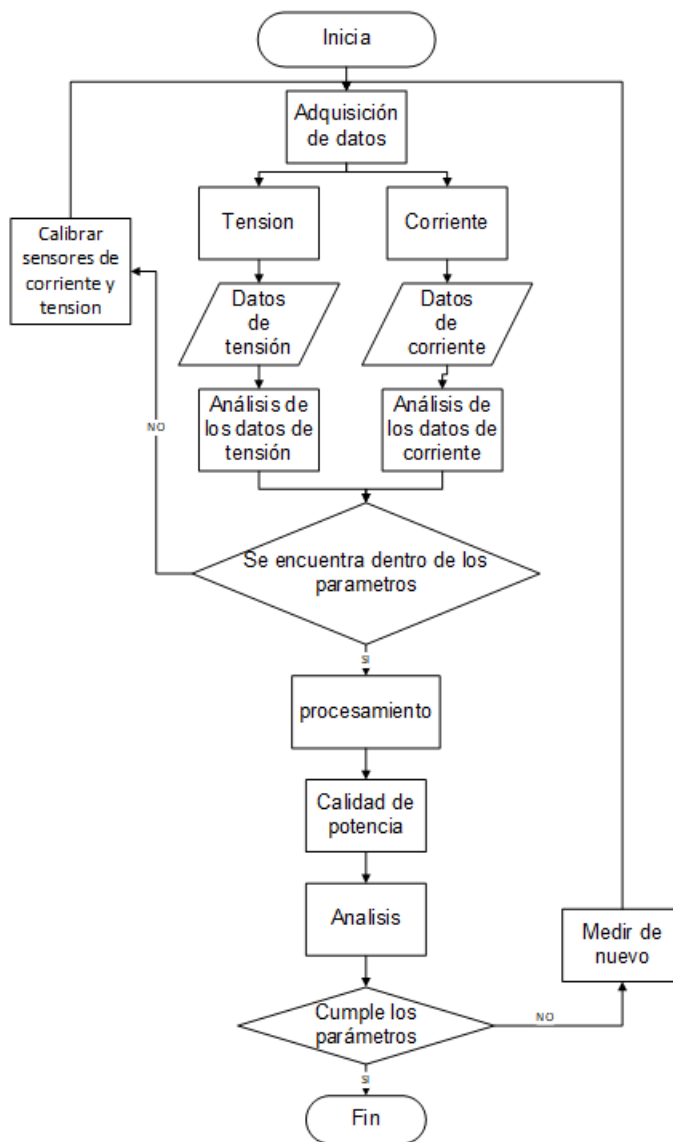
El estudio de calidad de la potencia eléctrica se realizará por medio del analizador de redes Dranetz Power Visa, clase A, empleando como base la norma IEC 61000-4-30, que presentará datos numéricos de los distintos indicadores que se analizan, con el fin de establecer si el sistema es inestable y las causas que generan dicha inestabilidad.

Conociendo los valores de los indicadores que se encuentren fuera del rango que da como referencia la norma IEC 61000-4-30, se propone un cambio que repercutirá en la estabilidad del sistema eléctrico, dando como resultado un sistema confiable, haciendo que los equipos trabajen de una forma correcta y continua.

Es necesario plantear mejoras con base en los resultados de los datos obtenidos con el analizador de redes Dranetz Power Visa, clase A, y compararlas con los parámetros aceptables que indica la norma IEC61000-4-

30, la cual tiene como propósito establecer los límites admisibles para el análisis de la inestabilidad del sistema de potencia. Estas mejoras pueden ser medibles implementando un mantenimiento predictivo periódico en el ingenio.

Figura 1. Diagrama de flujo para medición de calidad de energía



Fuente: elaboración propia.

El primer paso es la adquisición de datos de la calidad de potencia eléctrica, este procedimiento se realizará desde la subestación de 69 KV, donde se ajustarán los sensores y la conexión interna del instrumento de medición. Para la toma de datos se tendrá como base la tensión y la corriente, ya que estas son las magnitudes principales en un sistema eléctrico. Luego el analizador de calidad de potencia mostrará los parámetros según la norma IEC61000-4-30 para la medición y se verificará si se encuentra dentro de los parámetros.

Si la corriente y tensión se encuentran dentro de los parámetros permitidos por la norma IEC61000-4-30, se procesarán los datos para medir: factor de potencia transitorio, sobretensiones, interrupciones de tensión y armónicos. De estos resultados dependerá si se toma medidas para hacer mejoras en la calidad de la potencia eléctrica o hacer una nueva medición calibrando los sensores de voltaje y corriente.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Importancia de calidad de potencia eléctrica

Cano Plata (2006), indica en cuanto a la calidad de la potencia que esta aparece como resultado de la producción de cargas no lineales, las cuales a su vez inducen distorsiones de forma de onda, con equipos que requieren de un sistema que provea un nivel recomendable para su funcionamiento. Las cargas no lineales no se pueden evitar en un sistema eléctrico de potencia, pero se pueden disminuir los efectos que provoca a la forma de onda de la frecuencia eléctrica.

Sánchez (2009) comenta que la calidad de la potencia eléctrica es una gran diversidad de eventos electromagnéticos que se caracterizan principalmente por el voltaje y la corriente en un tiempo determinado, en algún lugar del sistema eléctrico de potencia. Esto quiere decir que, a pesar de la gran cantidad de eventos eléctricos que suceden en un período de tiempo, la corriente y el voltaje tienen que mantener la constante en cualquier punto del sistema eléctrico, con el objetivo de mantener una buena calidad del servicio.

Sin embargo, De Battista (2000) considera que la calidad de potencia eléctrica óptima, es decir el voltaje en cualquier punto de un sistema eléctrico, debe ser sinusoidal, por lo tanto la amplitud, frecuencia y valores nominales tienen que ser constantes. En definitiva, en un sistema eléctrico de potencia es importante mantener los niveles óptimos de las magnitudes que mantienen estable un sistema eléctrico, debido a que de esta forma se puede mantener la eficiencia de los equipos conectados a la red eléctrica.

La calidad de potencia eléctrica depende de los fenómenos que provocan perturbaciones en un sistema, esto es consecuencia de la forma de onda de tensión, corriente y frecuencia. Para llegar a un funcionamiento óptimo de equipos o sistema deben monitorearse estas perturbaciones para entregar un suministro eléctrico eficiente y de calidad.

El crecimiento de equipos de control y automatización como variadores de velocidad y otros dispositivos electrónicos distorsionan la frecuencia de tensión y corriente, al mismo tiempo hay equipos más sensibles a esta distorsión, esto provoca fallas e inestabilidad en el sistema eléctrico. Cuando ocurren estas fallas también provocan paros no programados, así como pérdida de tiempo y costos.

7.2. Definición de calidad de potencia eléctrica

La norma GREG-024 (2005) define la calidad de potencia como un grupo de indicadores de fenómenos eléctricos añadidos a la forma de onda del voltaje, debido a esto se puede evaluar las desviaciones del voltaje instantáneo y comparar su forma de onda y frecuencia estándar, de igual forma el efecto que provocan las desviaciones en los sistemas o equipos eléctricos. La calidad de potencia eléctrica básicamente consiste en la energía suministrada en condiciones normales de operación, las cuales idealmente no deben producir interrupciones en la red eléctrica, una vez se cumplan los parámetros determinados en la norma de servicio eléctrico.

Para garantizar un suministro eléctrico continuo y eficiente se deben tomar en cuenta las características técnicas y administrativas de la calidad de potencia eléctrica, las cuales relacionan la generación, transporte y distribución de la energía eléctrica para satisfacer las necesidades de los usuarios.

7.3. Tipos de componentes eléctricos

De acuerdo con Giménez De Guzmán (1996), un componente eléctrico es un elemento físico necesario para formar un circuito eléctrico. No obstante, todo componente eléctrico tiene una serie de características eléctricas como: capacitancia, resistencia, inductancia, entre otras.

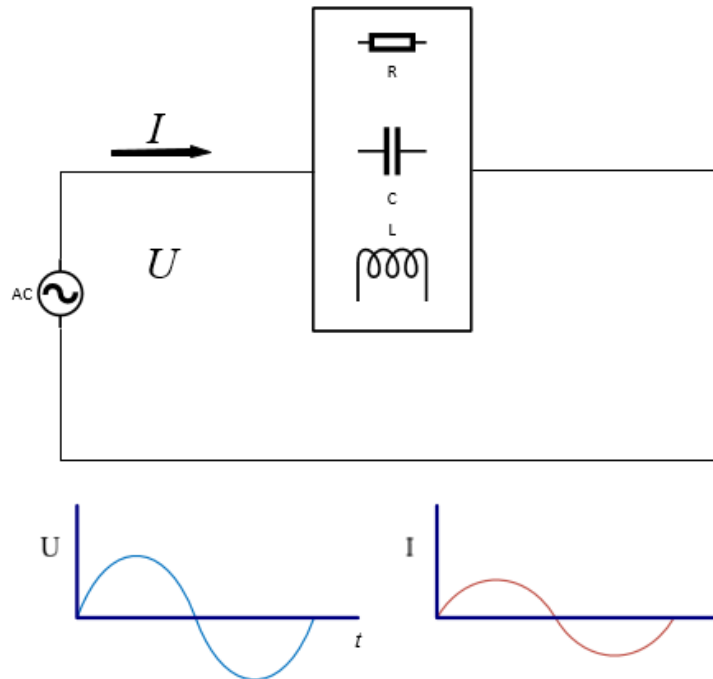
Las componentes de un sistema eléctrico pueden ser de tipo lineal o no lineal. A continuación se detallan los tipos de elementos que pueden existir en un circuito eléctrico:

7.3.1. Cargas lineales

Según Ramírez y Cano (2003), se le llama carga lineal a la relación de la corriente y el voltaje en el tiempo, tomando en cuenta que la carga tiene una impedancia relativamente constante. Un voltaje sinusoidal provoca un desfase de la corriente a una misma frecuencia en el sistema eléctrico. Se pueden considerar las resistencias, capacitores e inductancias como cargas lineales, porque sus valores de corriente y voltaje en una onda sinusoidal siempre se encuentran desfasados unos de otros.

Algunos ejemplos de cargas lineales pueden ser lámparas incandescentes, calefacción, horno tostador, refrigeradoras, motores, entre otros. En estos dispositivos eléctricos se pueden observar resistencia, inductores, capacitores, en los cuales se puede observar el desfase del voltaje respecto a la corriente.

Figura 2. **Cargas lineales en un circuito eléctrico**



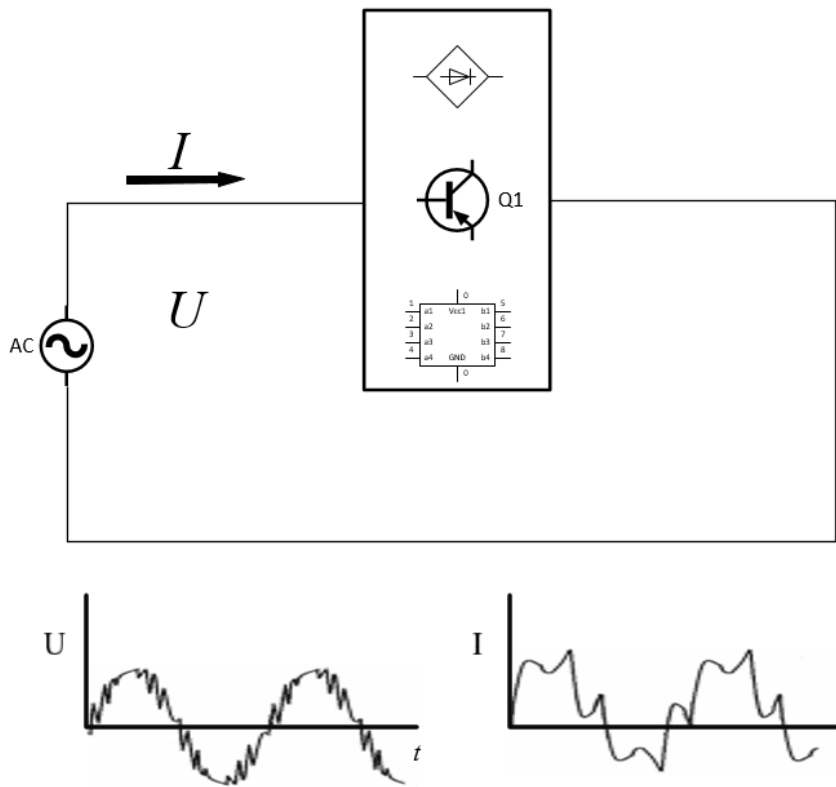
Fuente: elaboración propia.

7.3.2. **Cargas no lineales**

Sánchez (2009) describe que las cargas no lineales son las que consumen corriente de una forma que no es continua o en el caso que su impedancia varíe en el tiempo entre cada ciclo en la forma de onda de entrada de voltaje. La corriente eléctrica que se obtiene de una carga no lineal es un múltiplo de la corriente con respecto a la forma de onda fundamental, esto quiere decir que es una fuente de distorsión eléctrica.

Algunos dispositivos eléctricos pueden producir distorsiones en la forma de onda en la red eléctrica, algunos dispositivos pueden ser balastos de lámparas fluorescentes, variadores de velocidad u hornos de arco.

Figura 3. **Representación de cargas no lineales en un circuito eléctrico**



Fuente elaboración propia.

7.4. **Parámetros de calidad de suministro**

La cantidad de perturbaciones que están presentes en una red eléctrica están íntimamente asociadas a la confiabilidad del servicio, a continuación se describen aspectos que pueden causar problemas en la calidad de suministro.

7.4.1. Transitorios

En la forma de onda de corriente alterna se generan perturbaciones eléctricas subcíclicas mostrando una discontinuidad en la forma de onda instantánea y muy rápida. Estas pueden presentarse en secuencia negativa o positiva, a la forma de onda fundamental. Los transitorios son provocados cuando se tienen variaciones repentinas en el voltaje o corriente en una red eléctrica. Los transitorios se clasifican en dos clases: transitorios oscilatorios y transitorios impulsivos.

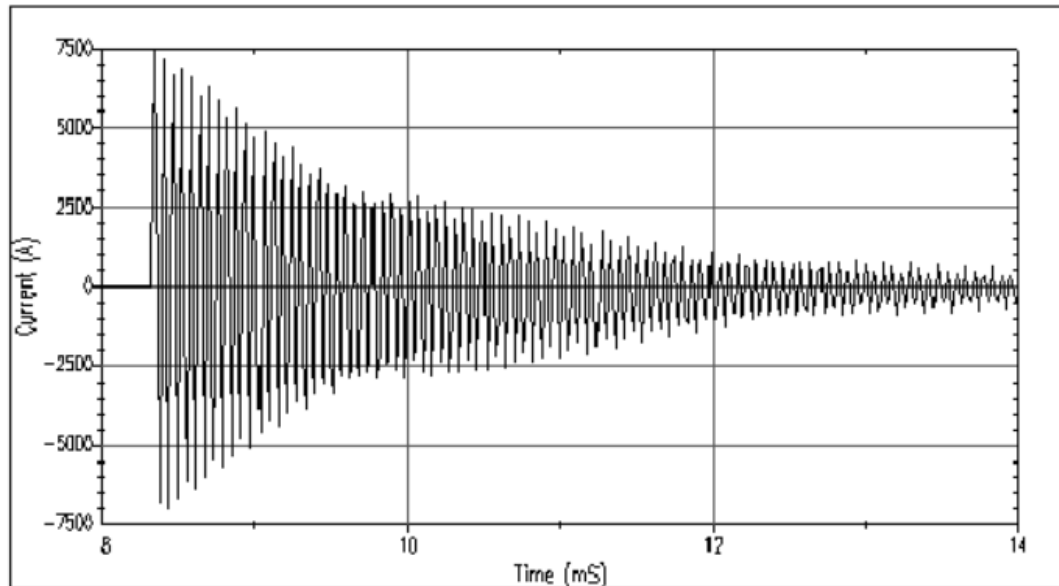
Se define por transitorio de sistema eléctrico al lapso de tiempo que ocurre entre la conexión y la desconexión de algún dispositivo hasta conseguir la estabilidad de corrientes y tensión

7.4.1.1. Transitorios oscilatorios

Cajas (2008) establece que las sobretensiones oscilatorias radican en cambios instantáneos del valor de voltaje, debido a que la polaridad cambia muy rápido, a su vez son originados por conexiones mal hechas y desconexiones fuertes. Viéndolo de una forma amplia las oscilaciones transitorias afectan todos los componentes eléctricos de un sistema y dependerán de su magnitud.

Un transitorio oscilatorio es un cambio rápido del voltaje y corriente, contiene valores de polaridad negativa y positiva. Un transitorio oscilatorio en sí radica en un cambio de polaridad, de forma instantánea en el voltaje o en la corriente. La oscilación del transitorio se representa por su duración y espectro de frecuencia.

Figura 4. **Transitorio oscilatorio**



Fuente: Norma IEEE Estándar 1159 (1995). *Práctica recomendada por IEEE para controlar la calidad de la energía eléctrica.*

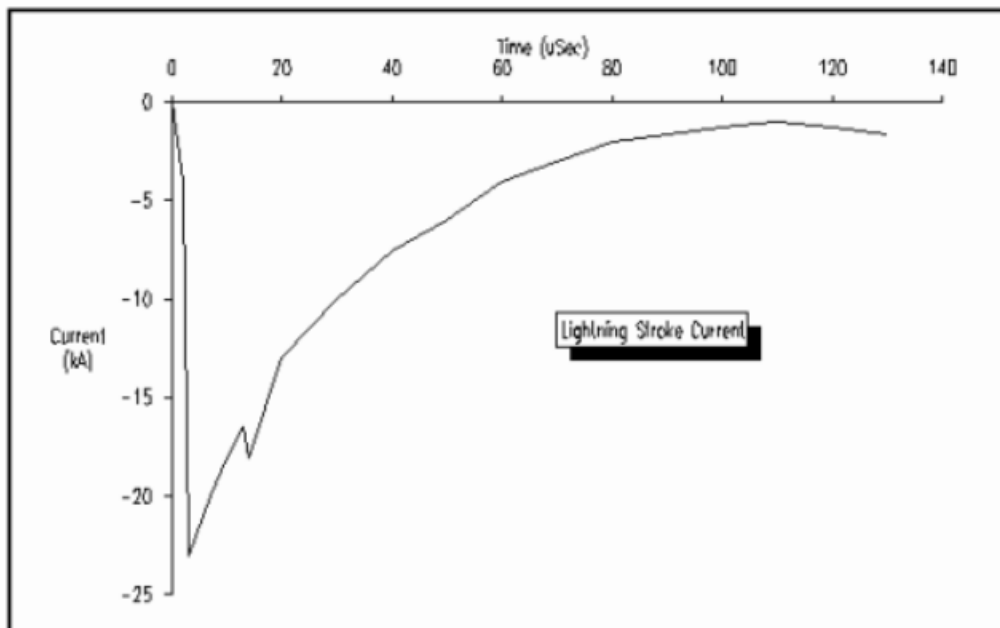
7.4.1.2. **Transitorios impulsivos**

De acuerdo con Cervantes (2014), las perturbaciones impulsivas son aquellas causadas por fenómenos eléctricos producidas por descargas unidireccionales, es decir que poseen una magnitud mayor pero baja energía. A su vez se caracteriza por su período de tiempo de elevación y abatimiento, lo que nos da a conocer su contenido en el espectro transitorio.

Los transitorios impulsivos son cambios repentinos de la frecuencia a baja potencia en condiciones estables de corriente y voltaje o ambos, y de forma unidireccional a su polaridad.

Los transitorios impulsivos se caracterizan normalmente por la cantidad de aumento y descenso de la corriente y el voltaje o ambas, las cuales pueden ser observadas por su espectro de frecuencia. Por ejemplo, un transitorio impulsivo puede aumentar en 1,5 del voltaje nominal en 50 microsegundos, a su vez puede decaer la mitad del valor de voltaje nominal en 50 microsegundos. La causa más común de los transitorios impulsivos es la iluminación.

Figura 5. **Transitorio impulsivo**



Fuente: Norma IEEE Estándar 1159 (1995). *Práctica recomendada por IEEE para controlar la calidad de la energía eléctrica.*

7.4.2. **Desbalance de voltaje**

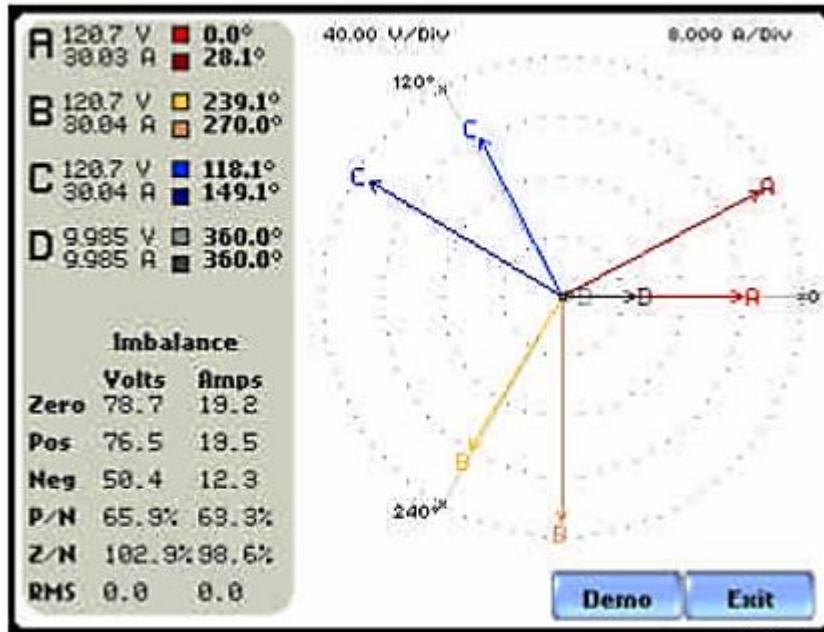
De acuerdo con Puello y Moreno (2012), en un sistema eléctrico trifásico o polifásico las magnitudes de voltaje de cada fase deben ser iguales, por lo cual

tiene que haber un desfase entre sí, por consiguiente, el ángulo que corresponde a cada fase debe tener una relación entre 360 grados y la cantidad de fases que tiene el sistema. Si cualquiera de las magnitudes de voltaje no es igual con las demás magnitudes, o si el ángulo que desfasa dos voltajes contiguos no es igual, se establece que hay un desbalance de voltaje. Esto puede ser considerado como un problema en la magnitud del voltaje, o como una oscilación de voltaje si fuese transitoria.

El desbalance de voltaje es la desviación máxima del valor de voltaje trifásico o polifásico entre el valor del voltaje trifásico o polifásico, lo cual se expresa en porcentaje.

El desbalance de voltaje también se puede especificar utilizando componentes simétricos, esto quiere decir que la relación que existe entre el componente de secuencia positiva y el de secuencia negativa puede establecer si existe un porcentaje de desbalance.

Figura 6. **Desbalance de voltaje**



Fuente: Dranetz Power Visa. (2005). *Powervisa user's guide*.

7.4.3. **Variaciones de voltaje de corta duración**

Como expresa Castañeda (2009), las variaciones de voltaje de corta duración en general son ocasionadas por fallas existentes en un sistema eléctrico, así como por energizar grandes unidades de carga. El voltaje de corta duración depende frecuentemente de dónde se localice la falla, así como de las circunstancias de operación del sistema eléctrico, por consiguiente la falla puede causar depresión de voltaje (*sag*), elevación de voltaje (*swell*) y pérdidas completas de voltaje (interrupciones).

Se define las variaciones de voltaje de corta duración como el cambio del valor eficaz del voltaje entre dos niveles próximos, manteniéndolos en intervalos

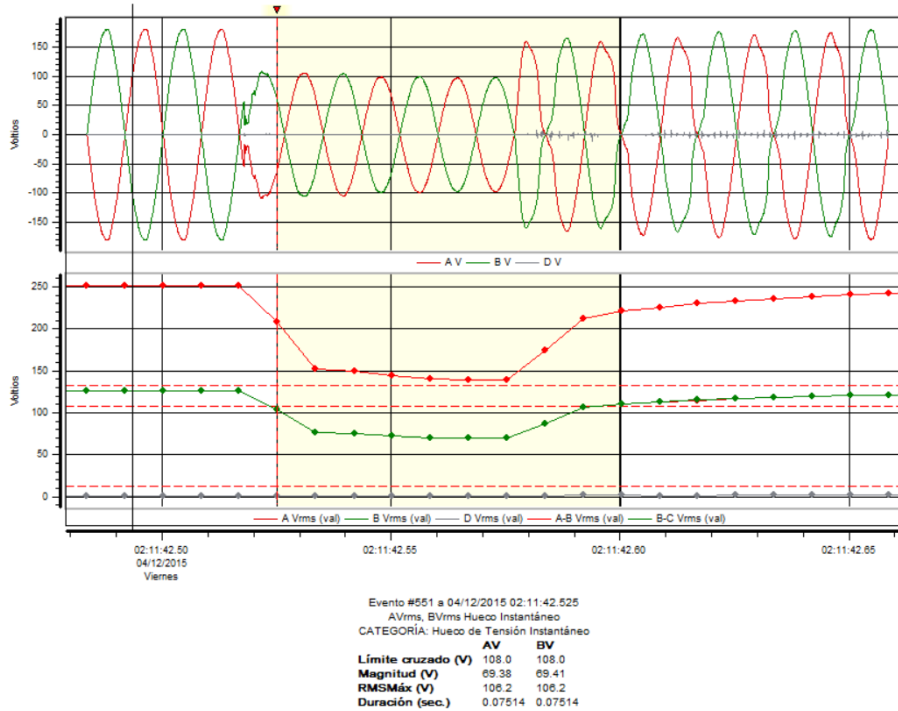
de tiempo específicos, pero a su vez sin que se repitan en un número de eventos determinados.

7.4.3.1. Depresión de voltaje (*sag*)

Roa Barragán y Caicedo Ulloa (2016) se refieren a la depresión de voltaje (*sag*) como la causa más frecuente de fallas en la red eléctrica y la que tiene más repercusiones en la calidad de potencia eléctrica, la cual provoca serios problemas en equipos de telecomunicaciones, variadores de velocidad para motores y procesos de control. Este tipo de fenómeno afecta en gran medida a sistemas sensibles a cambios mínimos de voltaje, sobre todo equipos de automatización industrial.

Se define como depresión de voltaje a la disminución temporal del voltaje en un punto del sistema eléctrico que se encuentre fuera del límite establecido. Una depresión de voltaje (*sag*) es una caída entre 0,1 pu y 0,9 pu del voltaje o corriente RMS, con referencia a la frecuencia de la red eléctrica, la cual tiene una duración de 0,5 ciclos a un minuto.

Figura 7. Depresión de voltaje (*sag*)



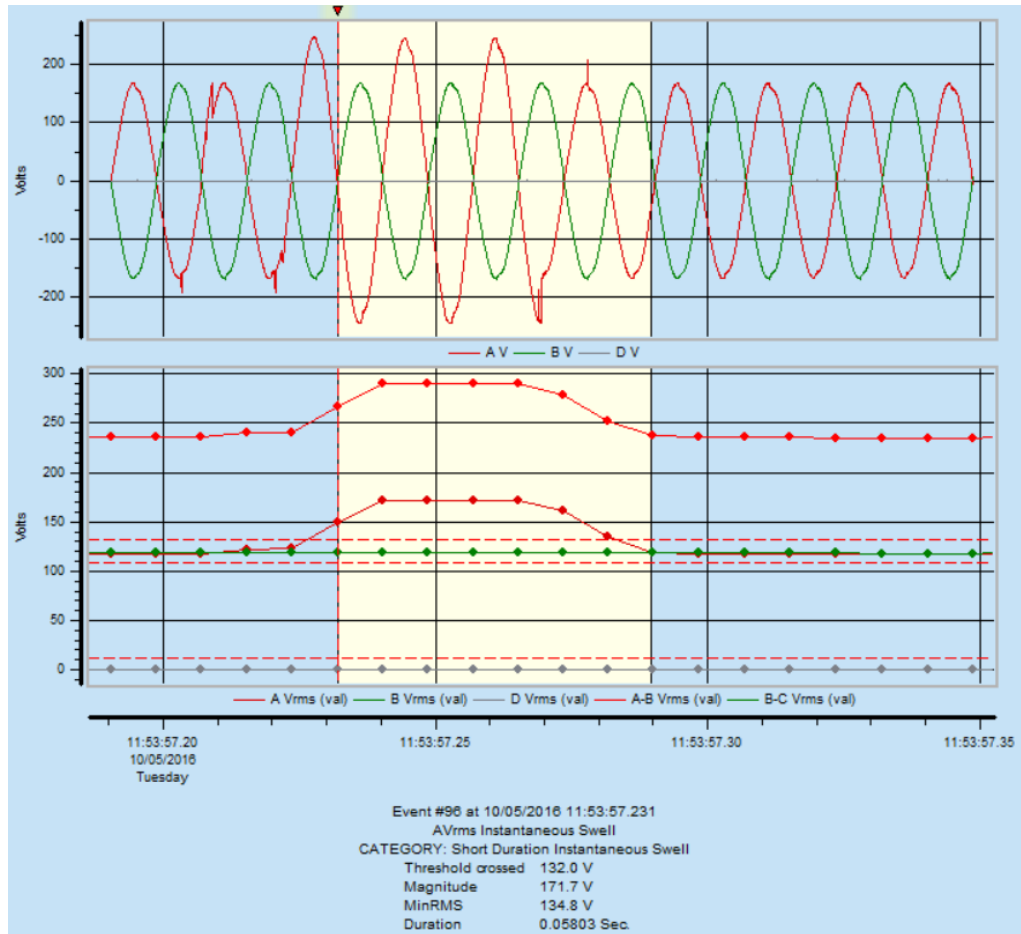
Fuente: elaboracion propia.

7.4.3.2. Elevación de voltaje (*swell*)

Una elevación de voltaje (*swells*) es un crecimiento entre 1,1 y 1,8 pu en voltaje o corriente RMS, con referencia a la frecuencia de la red eléctrica, la cual tiene una duración de 0,5 ciclos a un minuto.

Los *swells* son asociados con las fallas del sistema eléctrico, pero en relación con los *sags* estos no son comunes. Por tanto, para que los *swells* ocurran es necesario que suba el voltaje de forma temporal durante una falla de línea a tierra. Los *swells* tienen como característica su magnitud RMS y duración.

Figura 8. **Elevación de voltaje en dos fases (swell)**



Fuente: elaboracion propia.

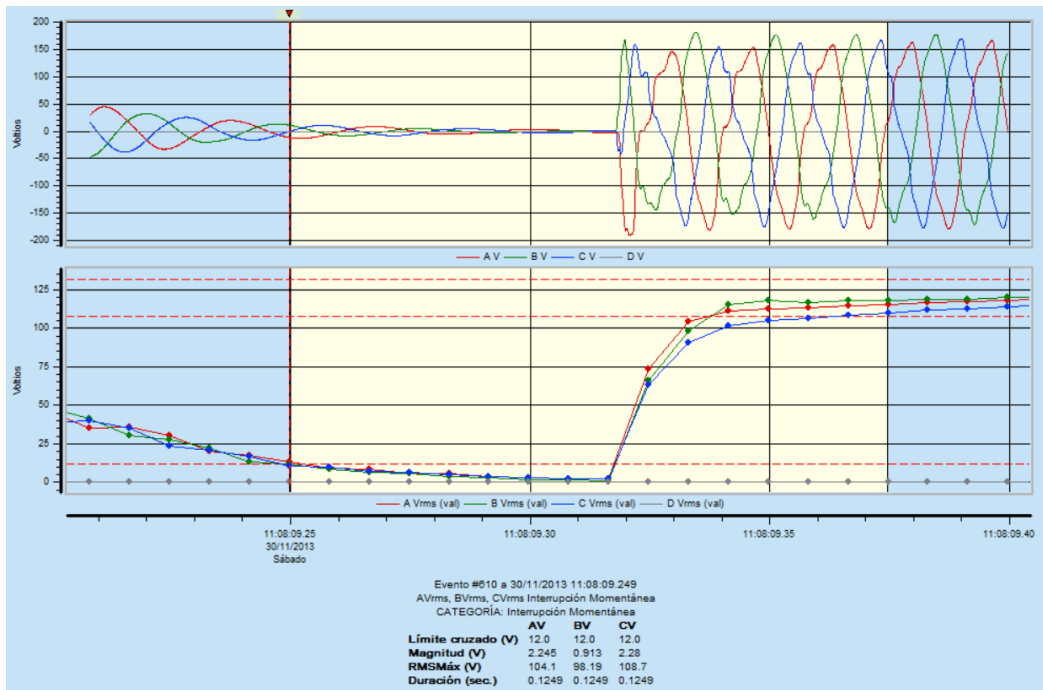
7.4.3.3. Interrupciones de voltaje

Una interrupción de voltaje sucede cuando el voltaje o la corriente decrece por los menos 0,1 pu por un período de tiempo no mayor a un minuto.

Las interrupciones de voltaje en los sistemas eléctricos comúnmente son ocasionadas por fallas en equipos y mal funcionamiento en sistemas de control.

Las interrupciones de voltaje se miden por la duración de la magnitud de voltaje nominal, el cual debe ser menor al 10 %.

Figura 9. Interrupción de voltaje



Fuente: elaboración propia.

7.4.4. Distorsión armónica

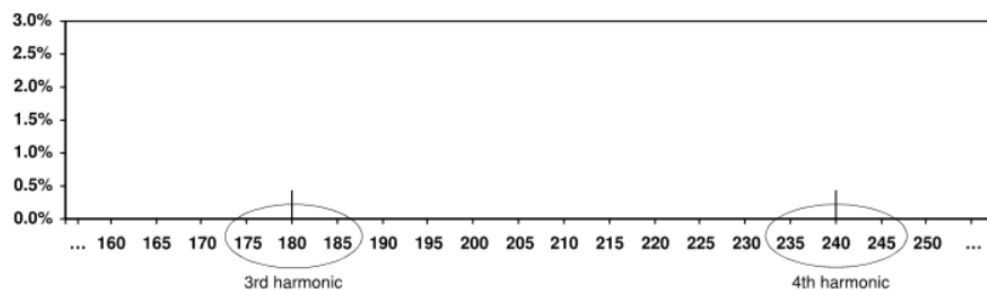
Como define Fink (1996), la distorsión armónica no es más que una especie de ruido eléctrico, la cual provoca señales en múltiplos de las frecuencias fundamentales, las cuales se sobrepone en la onda sinodal existente. En un sistema eléctrico se llama armónicos a las ondas de corriente y de voltaje cuya frecuencia tiende a ser mayor que a la frecuencia fundamental que se encuentra en la red eléctrica, que en este caso sería mayor a 60 Hz.

Por lo general los armónicos se presentan en diferente orden y dependen de su forma de onda, en la cual se representa un espectro y esto da como resultado una onda distorsionada. Los armónicos se especifican normalmente con dos datos importantes:

- La amplitud: se refiere al valor del armónico de voltaje o de la corriente, por lo general representa un pequeño porcentaje de la armónica con respecto a la forma de onda fundamental.
- Su orden: hace referencia al valor de su frecuencia con respecto a la forma de onda fundamental, puesto que un armónico de orden 3 tiene una frecuencia tres veces superior a la forma de onda fundamental.

Los espectros de la amplitud de varias armónicas se representan como una función del número de la armónica. Comúnmente se ilustra en forma de un histograma.

Figura 10. **Espectro de la distorsión armónica**



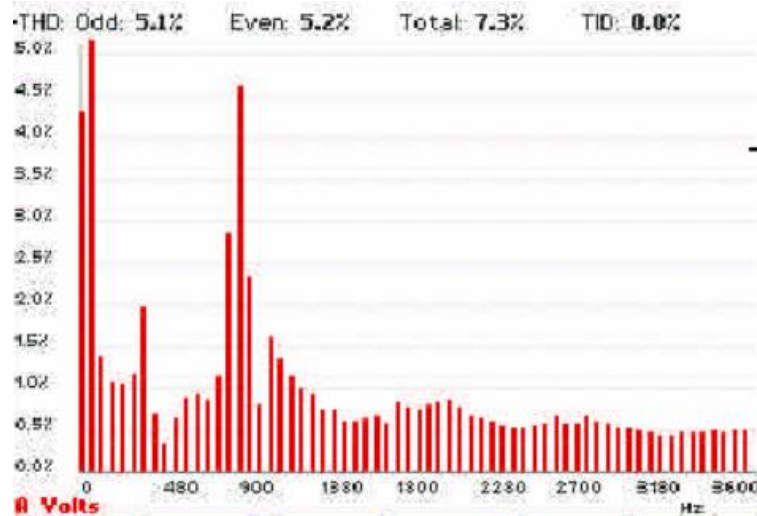
Fuente: Dranetz Power Visa. (2005). *Powervisa user's guide*.

7.4.4.1. Distorsión armónica total (THD)

De acuerdo con Muhammad (2004), la distorsión armónica total (THD) describe el espectro armónico mediante la magnitud y el ángulo de fase para cada componente individual. Se puede usar el criterio de distorsión armónica total (THD) como la superposición de todas las componentes armónicas que se presentan en el sistema eléctrico.

La Distorsión Armónica Total (THD) es un cambio de la forma de onda de corriente o de voltaje con respecto a la onda sinusoidal fundamental. En detalle se dice que la red suministra energía al sistema eléctrico y, a medida que pasan diferentes tipos de cargas, la corriente y voltaje provocan que la forma de onda se distorsione desde la carga hacia el sistema.

Figura 11. Espectro de la distorsión armónica total



Fuente: Dranetz Power Visa. (2005). *Powervisa user's guide*.

7.4.5. Parpadeo (*flicker*)

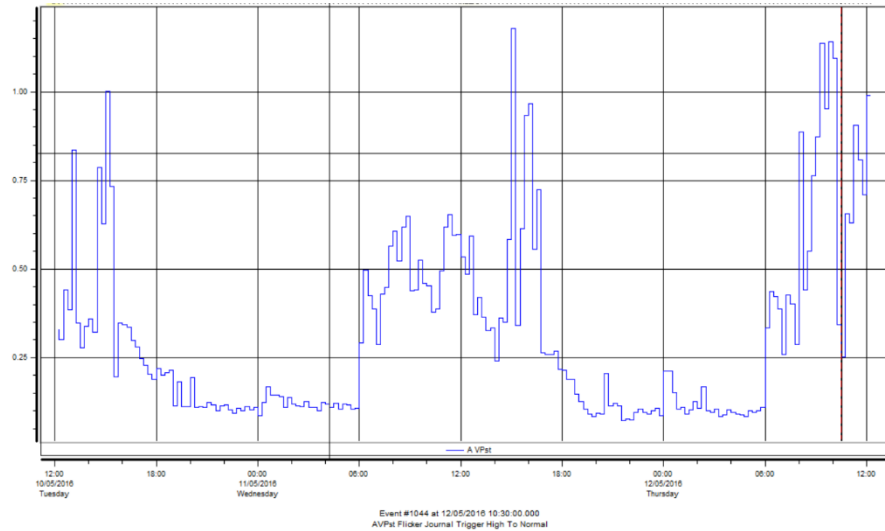
Ferreyra, Gudiño y Sada (2013) explican que el parpadeo (*flicker*) es ocasionado por disturbios interpuestos por la generación, distribución o transmisión de energía eléctrica, por lo general estos parpadeos son provocados por la fluctuación de grandes cargas, lo que quiere decir que la fluctuación de las cargas de la demanda de potencia reactiva o activa varían rápidamente en el tiempo.

Los generadores más comunes de parpadeos (*flickers*) son cargas que causan variaciones temporales de voltaje, por ejemplo, en la industria los arranques de motores, los hornos de arco, las soldadoras de arco y las herramientas de corte.

El fenómeno del parpadeo (*flicker*) es la fluctuación de voltaje más notable en el sistema eléctrico, con el fin de encontrar niveles para la compatibilidad para este fenómeno se utilizan las siguientes definiciones:

- Índice de severidad de corta duración (Pst): es un indicador de la percepción de un sistema o equipo, para fluctuaciones de voltaje de corta duración normalmente dura 10 minutos, esto se obtiene de forma estadística a partir del estudio de la señal de voltaje.

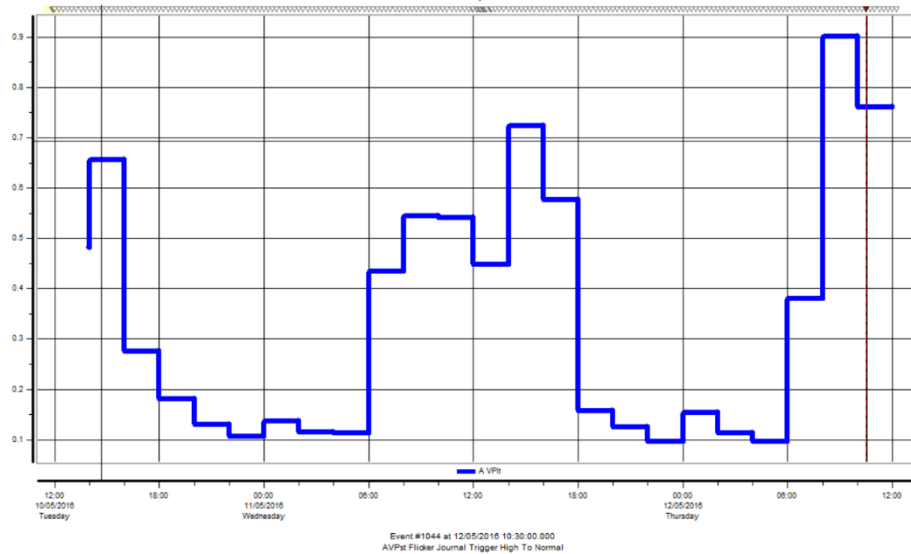
Figura 12. Índice de severidad de corta duración (Pst)



Fuente: elaboración propia.

- Índice de severidad de larga duración (Plt): es un indicador que calcula la severidad en largos intervalos de tiempo de observación, normalmente de 2 horas, tomando en cuenta valores del índice de severidad de corta duración Pst.

Figura 13. Índice de severidad de larga duración (PIt)



Fuente: elaboración propia.

7.5. Normas

ABB (2007), en el *Manual técnico de instalaciones eléctricas*, indica que las normas son un conjunto de reglas que deben cumplirse para diseñar, fabricar y probar los equipos, maquinaria, materiales e instalaciones, con el objetivo de garantizar su correcto funcionamiento y condiciones seguras. El empleo de las normas es fundamental para solucionar los aspectos de una instalación eléctrica, con el objetivo de obtener un nivel de seguridad significativo, ya que una seguridad total o absoluta es muy poco probable de conseguir.

Tabla I. **Campo de aplicación de normas**

	Campo de aplicación		
	Electrotécnica y electrónica	Telecomunicaciones	Mecánica, ergonomía y seguridad
Organismo internacional	IEC	ITU	ISO
Organismo europeo	CENELEC	ETSI	CEN

Fuente: ABB. (2007). *Manual técnico de instalaciones eléctricas. Aparatos de protección y maniobra. La instalación eléctrica.*

7.5.1. Normas para la medición de calidad de potencia eléctrica

ISO/IEC (2007), en la publicación *Uso y referencia a normas ISO e IEC en la reglamentación técnica*, señala que existen varias normas que describen métodos para la medición, ensayos y análisis, las cuales son normas muy importantes para garantizar que los datos de las mediciones y ensayos puedan ser comparados a nivel mundial.

Para efectuar una medición de calidad de potencia eléctrica es importante tomar en cuenta las normas nacionales e internacionales, ya que se pueden establecer límites y técnicas para las mediciones tomando en cuenta las necesidades y las condiciones del lugar. Las normas como IEEE e IEC son asociaciones reconocidas por su estandarización e implementación de técnicas para la medición de la calidad de potencia eléctrica.

7.5.2. Normas IEC 61000-4-30

Pérez Fernández (2006) el estándar IEC 61000-4-30 especifica los métodos de medición para el análisis de los parámetros de la calidad del suministro eléctrico para la interpretación de los resultados. En esta norma se presentan los indicadores y se establecen sus límites.

La norma IEC 61000-4-30 define dos clases de medición, diferenciándose una de la otra en el nivel de exactitud. Estas dos formas son llamadas clase A y B. La clase A se refiere a medidas de baja incertidumbre, la clase B está propuesta para análisis estadísticos o para solucionar problemas en sistemas eléctricos que tengan relación con la calidad de potencia.

7.6. Generalidades del mantenimiento

Alarcón García (2004) se refiere al mantenimiento como una disciplina con la finalidad de mantener equipos y máquinas en un grado de estado de operación óptimo, esto a su vez incluye inspección, servicio, ajustes, calibración, reparaciones, reemplazo y reconstrucción.

Monroy Méndez (2012) define las funciones básicas del mantenimiento como el cumplimiento de todas las tareas necesarias para implementar y mantener el equipo o sistema de producción de manera que cumpla los requisitos establecidos en un plan de mantenimiento. En general un mantenimiento debe desempeñarse eficientemente para lograr una producción competitiva.

Olivencia Polo (2015) plantea que el mantenimiento se ha transformado en un elemento importante en la competitividad y productividad de una

empresa. Una vez el valor del mantenimiento es establecido, se siguen diferentes planes estratégicos para mejorar el resultado desde la detección y la reparación de fallas, por medio del personal, por indicadores establecidos o por tecnologías innovadoras

Una idea general de un plan de mantenimiento es que son actividades que se desarrollan con el objetivo de mantener equipo e instalaciones en condiciones eficientes. El mantenimiento necesita de la elaboración de estrategias organizadas, para la reparación de fallas o prevenir las mismas.

Un plan de mantenimiento está diseñado para aumentar la confiabilidad en un sistema, entendiendo como confiabilidad la probabilidad de funcionar sin fallas durante un tiempo determinado en circunstancias de operación dadas.

Otro indicador de mantenimiento es la mantenibilidad, la cual es la probabilidad de ejecutar una operación determinada de mantenimiento en el tiempo de reparación establecido y en circunstancias planeadas, mientras que la soportabilidad es la probabilidad de atender un determinado mantenimiento, en un tiempo de espera definido y en circunstancias planeadas.

Existen varios tipos de mantenimiento, pero los más comunes son tres tipos, y son la base de los diferentes tipos de mantenimiento para áreas más específicas:

- Mantenimiento correctivo
- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento predictivo

7.6.1. Mantenimiento correctivo

Pesántez Huerta (2007) establece que el mantenimiento correctivo es una acción de forma precisa a raíz del uso, desgaste de la vida útil o factores externos, partes de componentes, materiales, piezas de dispositivos que forman parte de la infraestructura, la cual permite su restauración o renovación sin agregar valor a la empresa. Por tanto un mantenimiento correctivo prácticamente no requiere alguna planificación, por tanto solo requiere atender las fallas que necesiten ser reparadas en el momento, dentro de algún proceso de producción. Comúnmente para realizar este tipo de mantenimiento es necesario detener el proceso de producción, lo cual genera pérdidas económicas y de tiempo invertido.

Doniz Magallón (2011) hace referencia a los trabajos de mantenimiento que no son ejecutados hasta que un inconveniente ocurre cuando falla un equipo o maquinaria. El mantenimiento correctivo no evade los altos daños secundarios originados en las fallas de equipos y maquinaria, sin considerar los costos producidos por paradas y mantenimientos no planificados.

Ortiz Useche, Rodríguez Monroy e Izquierdo (2013) definen que el mantenimiento correctivo radica en reparar el equipo o máquinas una vez que la falla sucede, por lo cual no se realiza ninguna tarea predictiva o preventiva para que la fallas no sucedan. El mantenimiento correctivo consiste esencialmente en localizar y corregir fallas o desperfectos que impidan que los equipos y máquinas funcionen de manera óptima.

El mantenimiento correctivo suele ser útil para empresas pequeñas o de baja producción o donde el índice de fallas es muy bajo por el tipo de trabajo que desempeñan, o si el equipo es bastante nuevo. Esto se debe muchas

veces a que mantener planes de mantenimiento es costoso y los beneficios son pocos.

Cualquier empresa que aspire a crecer o esté creciendo, cuyo nivel de producción sea un alto, debe adoptar planes de mantenimiento más adecuados para garantizar la estabilidad en su producción.

Tabla II. **Ventajas y desventajas del mantenimiento correctivo**

Ventajas	Desventajas
No es necesaria una infraestructura técnica grande y se requiere poco análisis.	La vida útil de los equipos tiende a cortarse.
La vida útil de los equipos es aprovechada al máximo.	La baja disposición del mantenimiento tiene consecuencia en el poco tiempo disponible para reparar la falla.
Los costos por las fallas son significativos.	Se asumen riesgos económicos que suelen ser importantes.
No se requiere programar planes que prevean alguna actividad.	Genera inseguridad sobre cuándo ocurrirá alguna falla, lo cual puede suceder en el momento más importuno.

Fuente: elaboracion propia

7.6.2. Mantenimiento preventivo

Doniz Magallón (2011) establece que un mantenimiento preventivo consiste basicamente en la elaboracion de órdenes que describan las operaciones que se deben realizar y con la regularidad con la que se deben efectuar. El mantenimiento preventivo en sí es un grupo de tareas que son planeadas anticipadamente y que tienen como principal objetivo conservar las instalaciones en estado óptimo, con lo cual se deben anticipar las fallas.

García Garrido (2003) también dice que el mantenimiento preventivo tiene por objetivo conservar un nivel de servicio establecido en los equipos, en los

cuales se programan correcciones de sus lugares vulnerables en el momento oportuno. El mantenimiento preventivo en general intenta reducir la reparación por medio de una práctica de inspecciones periódicas y el cambio de piezas o elementos dañados.

Gento y Redondo (2005) señalan que el mantenimiento preventivo es un conjunto de tareas enfocadas a la inspección periódica de maquinaria para sustituir piezas desgastadas o que tengan la posibilidad de fallar. Es un mantenimiento planificado asociado a costos altos: lo que no se produzca en el momento del mantenimiento, mano de obra especializada, y las piezas que se cambian incluso antes de que fallen.

El mantenimiento preventivo es de carácter sistemático, lo que quiere decir que se realiza por horas de funcionamiento de la producción o en lapsos de tiempos. Se registran los datos de los equipos para saber en cuánto tiempo se presentan las fallas.

El objetivo principal del mantenimiento preventivo es garantizar la disponibilidad de los equipos, maquinaria, sistemas e infraestructura en la industria, empresas o instituciones, para lo cual se pretende evitar el máximo de paros, los cuales a su vez provocan interrupciones en los procesos y actividades en la empresa o institución.

Tabla III. **Ventajas y desventajas del mantenimiento preventivo**

Ventajas	Desventajas
Evita reparaciones significativamente costosas.	Se desperdicia vida útil de los quipos o maquinaria.
Aumenta la disponibilidad de los equipos o maquinaria.	Requiere programar modelos para optimizar los procesos.
Permite elaborar planes para coordinar actividades y recursos.	Es necesario invertir entre 2 a 4 años para implementarlo.

Fuente: elaboracion propia.

7.6.3. **Mantenimiento predictivo**

De acuerdo con Olarte, Botero y Cañon (2010), el mantenimiento predictivo constituye una serie de pasos o ensayos no destructivos, los cuales son encaminados a cumplir el seguimiento de los equipos y del funcionamiento de estos, con el fin de detectar indicios o advertencias que muestren que los equipos o máquinas o algunas de sus partes no estén trabajando de manera óptima. El mantenimiento predictivo es un conjunto de técnicas donde se relacionan variables químicas, eléctricas o físicas para establecer el estado del equipo o maquinaria.

Carmona y Ochoa (2008) también lo definen como un mantenimiento basado en predecir la falla antes que suceda. El propósito es anticiparse a la falla o al momento en que el equipo o máquina funcionen en condiciones óptimas. Para alcanzar este propósito se utilizan técnicas de monitoreo en tiempo real de parámetros característicos de los equipos o máquinas considerados.

Alban Martinez y Pantoja Puerta (2011) se refieren al mantenimiento predictivo como un conjunto de actividades que se basan fundamentalmente en

detectar fallas antes de que ocurran, con el propósito de corregirlas sin daños al servicio ni retraso en la producción. Estos registros pueden llevarse de forma periódica o continua, en función de los equipos, sistema de producción, entre otros.

Un plan de mantenimiento predictivo es una programación en la cual se establece una medición base y se da un seguimiento con mediciones constantes y periódicas en las cuales se definen variables en instalaciones, equipos, maquinarias encontradas en la industria. La recopilación e interpretación de datos permite la detección de fallas, esto conlleva elaborar un plan de mantenimiento que ayude a la toma de decisiones para evitar eventos catastróficos en instalaciones, equipos o maquinaria, por lo tanto el mantenimiento predictivo es un procedimiento que permite diagnosticar fallas antes que se presenten y disminuir costos por mantenimiento correctivo o preventivo.

El objetivo principal es predecir cuándo un componente empezará a fallar en algún equipo o maquinaria. Esto pretende conocer los equipos, con el fin de utilizar las técnicas y los instrumentos para realizar el mantenimiento.

Tabla IV. **Ventajas y desventajas del mantenimiento predictivo**

Ventajas	Desventajas
Permite identificar fallas en máquinas y equipos de forma rápida y eficaz.	No permite una planificación tan buena como la utilizada en el mantenimiento preventivo.
Disminuye significativamente los costo de mantenimiento.	Es necesaria instrumentación sofisticada.
La mayoría de veces no se necesita sacar de línea el equipo para realizarle mantenimiento predictivo.	El mantenimiento depende grandemente de la confiabilidad del diagnóstico.
No se aplican planes preventivos innecesarios.	Un monitoreo mal realizado puede ocasionar fallas en la maquinaria o equipo
Reducción de pérdidas de materia prima por paros no planificados y arranques innecesarios.	El personal debe tener una alta cualificación, lo que lleva a que existan muy pocas personas capacitadas.
Mejora de la fiabilidad en la producción en forma global.	Implementar equipos de muy alta tecnología tiene un costo significativo.

Fuente: elaboración propia.

7.7. Plan de mantenimiento predictivo

Castellanos Torres y Sánchez Miranda (2005) comentan sobre los planes de mantenimiento predictivo, considerando a cada equipo o maquinaria por separado, por lo cual reemplazan revisiones periódicas por medidas periódicas, con esto se puede seguir detalladamente el desarrollo del estado y el funcionamiento de cada equipo y maquinaria en específico. La medición de calidad de potencia eléctrica es un excelente indicador para verificar el funcionamiento de un equipo.

Navas Porto (2010) explica que el plan de mantenimiento se compone de las diferentes características de los diferentes tipos de mantenimiento, por lo que se debe tomar en cuenta que los diferentes tipos de mantenimiento se integran alrededor de lo que se considera como el mantenimiento principal para el correcto funcionamiento. Por tanto, el mantenimiento predictivo se basa primordialmente en detectar fallas antes de que sucedan, para corregir sin daños a los equipos.

Prieto Roldán (2014) define como un plan de mantenimiento al conjunto de tareas de mantenimiento programadas, asociadas o no, siguiendo un tipo de criterio que se relaciona a una serie de equipos o maquinaria de la industria. Hay un conjunto de equipos que pueden ser monitoreados desde un punto de vista predictivo y en muchas ocasiones es más económico aplicar una estrategia puramente correctiva.

Al establecer cada tarea corresponde definir otros datos referentes a cada una, como pueden ser el análisis del sistema bajo estudio, los parámetros, la toma de datos, la interpretación de datos, evaluación del equipo, avisos y toma de decisiones y retroalimentación para efectuar dicha tarea.

- Análisis del sistema a estudiar: la descripción de equipos radica en la obtención de una lista de máquinas e instalaciones que se incluyen en el plan de mantenimiento predictivo.
- Selección de parámetros: al obtener la recopilación de la información técnica disponible de cada equipo o máquina se procede a la clasificación de los puntos y parámetros predictivos a medir.
- Adquisición de datos: los datos adquiridos con sensores son de suma importancia en el programa de monitoreo de máquinas o equipos. Se tiene que garantizar que los datos adquiridos tengan la máxima calidad.
- Análisis e implementación de datos: luego de realizar las mediciones es importante generar informes. El propósito de los informes es filtrar la información obtenida en campo, de tal forma que se pueda reducir el número de puntos que se analizarán en profundidad, ya que es inviable estudiar toda la información dato por dato.
- Evaluación del estado del equipo: el análisis frecuente es la técnica más utilizada para establecer el estado de las máquinas o equipos.
- Generación de avisos y toma de decisiones: la información adquirida del sistema debe ser accesible para todo el personal encargado del mantenimiento de la planta. Las decisiones oportunas marcan una gran diferencia para evitar que una falla progrese.
- Órdenes de trabajo y retroalimentación: cuando se realiza el análisis de un problema se emite un orden de trabajo en el que se especifica el

nombre del equipo o máquina, la falla detectada y los procedimientos que deben ejecutarse, así como una alerta de prioridad del proceso.

7.8. Mantenimiento predictivo con medidor de calidad de potencia, empleando norma IEC 61000-4-30

González Riva (2015) establece que un sistema eléctrico de potencia es un conjunto de instalaciones que es capaz de producir, transportar y distribuir energía eléctrica una vez las condiciones sean adecuadas para la tensión, frecuencia y disponibilidad. La continuidad del servicio va a depender de la estabilidad de los valores de las variables, estos son reflejados en el mantenimiento que se ejecuta en cada etapa del sistema, es decir en la generación, transporte y distribución. Por eso el mantenimiento predictivo tiene un papel importante cada día en los sistemas eléctricos de potencia, pero se hace difícil su implementación debido a que el nivel de experiencia del especialista debe ser alto, para que realice este trabajo y use adecuadamente los equipos e instrumentos, los cuales deben estar calibrados y certificados para obtener resultados confiables y garantizados.

García (2016) se refiere a la evaluación de la calidad de potencia eléctrica, la cual puede ser enmarcada en los planes de mantenimiento predictivo en sistemas de potencia industriales, por lo cual mediante esta evaluación es posible obtener alertas anticipadas sobre el deterioro de componentes del sistema, así como los orígenes de tales condiciones, permitiendo tomar acciones para prevenir las fallas. El desarrollo y aplicación de herramientas informáticas permite el uso de equipos de medición y registro de parámetros eléctricos, como también programas de simulación y estudios eléctricos, así como herramientas no invasivas para evaluar la calidad de potencia de sistemas eléctricos, con referencia a índices normalizados. Por eso

es posible predecir, con cierta certeza, el estado y condiciones de falla en equipos.

Canchila Rivera y Nieto Valbuena (2018) explican que se deben realizar estudios de calidad de potencia en tableros de distribución y casetas eléctricas. La actividad de mantenimiento predictivo comprende medición de calidad de potencia eléctrica e inspección visual. Dentro del propósito de la evaluación de los parámetros eléctricos de operación está identificar niveles altos de los armónicos, desbalances de corriente y voltaje de sobretensiones, entre otros, los cuales son indicadores de deterioro de piezas o posibles fallas.

Algunas empresas ejecutan monitoreo de calidad de potencia eléctrica como parte de un mantenimiento predictivo para su maquinaria y equipos, con el objetivo de evitar fallas en su producción. Los datos proporcionados por un analizador de calidad de potencia eléctrica conectado a un sistema eléctrico pueden disminuir o evitar fallas en equipos electrónicos y eléctricos como transformadores de motores, protecciones eléctricas y electrónicas, incluso proteger las cargas no lineales que se encuentren en el sistema eléctrico. Los datos pueden ser desbalances de voltaje, armónicos y variaciones de voltaje que se encuentran presentes en el sistema eléctrico. El proceder predictivamente en los equipos y maquinarias puede significar un ahorro económico, así como confiabilidad y seguridad en el sistema eléctrico.

7.8.1. Progresos del mantenimiento en sistemas eléctricos

González Riva (2015) también indica que debido a que hay siempre una necesidad de aumentar la disponibilidad de maquinaria, equipos y recursos, a su vez también se desarrollan nuevas técnicas de mantenimiento que permiten el uso de los recursos más eficientes, un ejemplo es el mantenimiento centrado

en la confiabilidad, lo cual lo indica la norma nfpa 70b, la cual recomienda prácticas para el mantenimiento de equipos eléctricos, así como el mantenimiento productivo total. Las técnicas de mantenimiento deben estar encaminadas a garantizar el funcionamiento de las acciones que ejecutan los equipos, más que a los equipos mismos. Esto quiere decir que se debe buscar siempre tener los equipos como si estuviesen nuevos, o en condiciones óptimas para realizar bien su trabajo.

Mercado y Bernardo Peña (2016) resaltan la importancia del mantenimiento de sistemas eléctricos, teniendo como base los requerimientos técnicos dirigidos a la observación e inspección, en seguida la realización de mediciones de los diferentes equipos y sistemas que conforman la red eléctrica, para con esto poder detectar las dificultades que pueda generar la disminución de la calidad de potencia eléctrica, la cual disminuye la vida útil de los diferentes equipos. Sin embargo, se deben obtener registros físicos o registros electrónicos, lo cual debe ser fundamental para que la parte técnica y administrativa de la empresa tome medidas para una planificación y control para preservar y optimizar la vida útil de los equipos.

Se debe tener el conocimiento con precisión para las funciones que realizan los equipos, y también conocer precisamente las condiciones que dificultan el desempeño o interrumpen su funcionamiento. Un excelente mantenimiento es posible al tener actualizada la maquinaria y en condiciones óptimas de operación, pero esto será posible solo con la colaboración con los diferentes departamentos, estableciendo un esquema sobre calidad total, pero dirigido a equipos, procesos y sistemas.

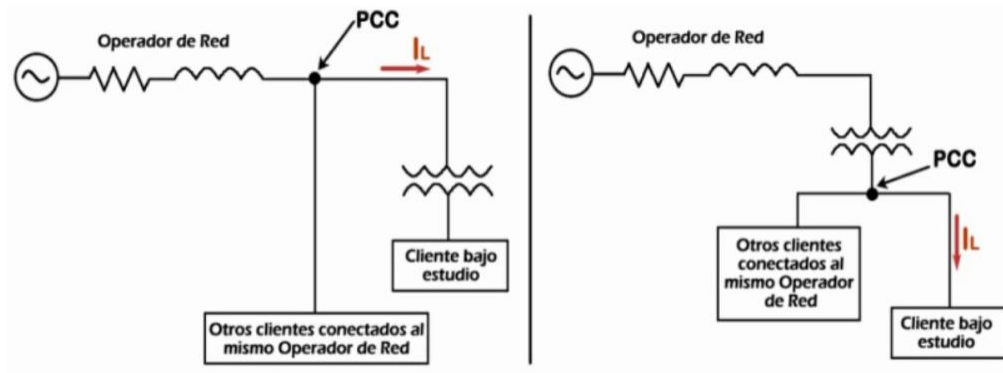
7.8.1.1. Punto de conexión común

La norma NTC 5001 (2008) sugiere puntos de conexión comunes definidos como un punto de conexión entre el usuario final y el sistema que lo alimenta, los cuales pueden ser el sistema eléctrico de distribución local o el sistema eléctrico de transmisión interconectado, con los cuales se puede hacer el análisis de calidad de la potencia eléctrica.

La norma NTC-5001 (2008) también define los límites de los puntos de conexión común. Sin embargo se debe tomar en cuenta que pueden estar en cualquier lado de un transformador y va a depender del devanado en el que se localicen conectados otros usuarios. La norma también establece que cuando el punto de conexión común se encuentra en el lado de alta tensión del transformador las mediciones se pueden realizar en el lado de baja, pero tomando en cuenta que las mediciones posteriormente se tienen que referir al lado de alta con la relación de transformación, sin olvidar el efecto que provocan los armónicos de secuencia cero que tienen los devanados del transformador conectados en delta.

Nieto Gallino y Alvarado Moreno (2018) recomiendan establecer límites que varíen en función del consumo. Esta variación es expresada en función de la relación de la corriente en el punto de conexión común y la corriente de demanda del consumidor. Es importante que los límites de distorsión sean estandarizados con relación a la corriente de demanda.

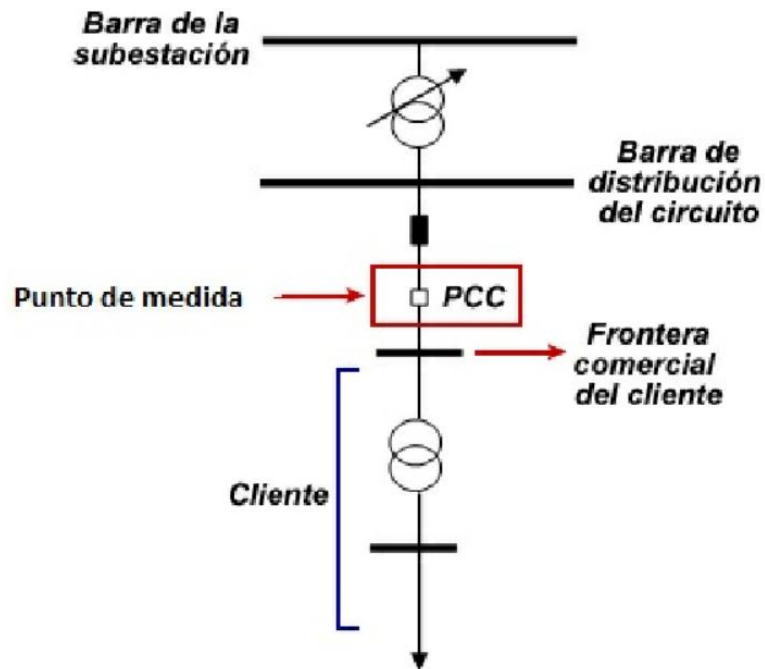
Figura 14. Punto de conexión común



Fuente: Rojas Cubide, H. E.; Rivas Trujillo, E.; Jaramillo Matta, A. A. (2014). *Aspectos técnicos y normativos para el monitoreo y medición de armónicos*.

Rojas Cubide, Rivas Trujillo y Jaramillo Matta (2014) detallan que las mediciones en otros puntos del usuario final no ayudan en el análisis general de los problemas de calidad de potencia, incluso cuando los estudios proveen datos sobre el comportamiento de cargas puntuales. Para varios usuarios el punto de conexión común está establecido en el devanado primario del transformador, pero muchas veces es conveniente tomar las mediciones en los límites más cercanos al usuario.

Figura 15. **Medición en el punto de conexión común**



Fuente: Rojas Cubide, H. E.; Rivas Trujillo, E.; Jaramillo Matta, A. A. (2014). *Aspectos técnicos y normativos para el monitoreo y medición de armónicos*.

7.8.2. **Norma IEC 61000-4-30 sobre métodos de medición de calidad de potencia**

Cervantes (2014) analiza la norma IEC 61000-4-30, en la cual se definen las técnicas para medir y analizar los resultados de la calidad de la potencia eléctrica en un sistema. Se describe para cada parámetro la distorsión para adquirir resultados confiables y precisos del instrumento a utilizar. En la norma IEC61000-4-30 se establecen parámetros como la frecuencia, huecos de tensión, magnitud del voltaje, *flicker*, voltajes transitorios, interrupciones de voltaje, desequilibrio de voltaje, armónicos y cambios rápidos de voltaje, de lo cual va a depender el objetivo de la medición.

Robledo (2008) da detalles sobre la norma IEC-61000-4-30, la cual proporciona los niveles de incertidumbre para un desempeño tipo A en la medición, en la cual los equipos con estas características puedan utilizarse en entrega de energía eléctrica. La referencia de incertidumbre que proporciona la norma es la base para expresar la tolerancia del proceso.

La norma IEC 61000-4-30 también establece dos clases de mediciones para los parámetros de la calidad de potencia eléctrica, los cuales hay que tomar en cuenta para la obtención de datos y su posterior análisis. Las dos clases de mediciones de la norma IEC61000-4-30 son llamadas mediciones clase A y mediciones clase B.

7.8.2.1. Mediciones clase A de la norma IEC 61000-4-30

La medición clase A para la norma IEC 61000-4-30 se efectúa cuando se necesitan mediciones sumamente precisas, como en laboratorios o la verificación de alguna norma. Para realizar estas mediciones de la clase A se deben utilizar aparatos de medición certificados con la norma IEC 61000-4-30, por lo que al realizar mediciones con analizadores de calidad de potencia que cumplan con los requerimientos de la norma IEC se garantiza que no saldrán del margen de la incertidumbre especificada.

Tabla V. **Rango de parámetros para mediciones clase A**

Parámetros de CEL	Rango de variación
frecuencia	51-69 Hz
Voltaje (estado estable)	0 - 200 % Voltaje de entrada
Flicker	0 - 20 parpadeos
Desbalances	0 - 5 %
Armónicos (THD)	Valores IEC 61000-2-4 clase 3
Interarmónicos	Valores IEC 61000-2-4 clase 3
Señales de tensión	0 -9 %de la tensión de entrada
transitorios de tensión	6 kV pico
transitorios rápidos	4 kV pico

Fuente: Robledo. (2008). *Norma IEC 61000-4-30*.

7.8.2.2. Mediciones clase B de la norma IEC 61000-4-30

Las mediciones clase B para la norma IEC 61000-4-30 suelen ser utilizadas en análisis estadísticos y comúnmente en aplicaciones en que el nivel de incertidumbre tiene un requerimiento bajo. Con este tipo de medición se hace necesario que cada instrumento incluya los rangos de incertidumbre para que no afecte la medición.

Tabla VI. **Rango de parámetros para mediciones clase B**

Parámetros de CEL	Rango de variación
frecuencia	51-69 Hz
Voltaje (estado estable)	0 - 150 % Voltaje de entrada
Desbalances	0 - 5 %
Armónicos (THD)	Valores IEC 61000-2-4 clase 3
Interarmónicos	Valores IEC 61000-2-4 clase 3
Señales de tensión	0 -9 %de la tensión de entrada

Fuente: Robledo. (2008). *Norma IEC 61000-4-30*.

7.8.3. Analizador de calidad de potencia

Manzanares Araica y Torres Bermúdez (2017) explican sobre el analizador de calidad de potencia que es un instrumento en el cual es posible la visualización de parámetros eléctricos de un sistema eléctrico, tanto trifásico como monofásico. Este instrumento de medición permite monitorear y analizar una variedad de parámetros en un sistema eléctrico.

Fernández Cabanas (1998) expone que los analizadores de calidad de potencia se utilizan para obtener el comportamiento de la frecuencia de un determinado equipo o sistema eléctrico. Esto se debe a que este tipo de analizador permite comprobar la curva característica de la red eléctrica, por lo cual es preciso efectuar mediciones de la señal de entrada y de salida de la red. El resultado del análisis radica en la relación de ángulos de desfase y amplitudes de la señal de entrada y salida de cada frecuencia.

Acevedo Vásquez, Chacón Pedraza y Santamaría Piedrahita (2016) explican que estos medidores funcionan con sensores de tensión y corriente que están conectados de acuerdo con el estudio del sistema y las necesidades de medición. Estos equipos pueden registrar parámetros como: THDV, frecuencia, armónicos, desbalances, entre otros. Para la obtención de estos parámetros el equipo registra ondas completas de tensión y de corriente, con esto se hacen los cálculos de potencia, energía y armónicos.

Figura 16. **Medidor de calidad de potencia**



Fuente: Dranetz Power Visa. (2005). *Powervisa user's guide*.

El analizador de calidad de potencia suele ser un equipo portátil, de gran utilidad para determinar la calidad de potencia eléctrica, por ejemplo, algunos parámetros que se pueden analizar son la distorsión armónica total de la corriente y el voltaje, potencia aparente, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia. El analizador de calidad de energía guarda los datos recabados, los cuales pueden ser analizados por programas de computadora o directamente desde el mismo analizador, y también se puede visualizar la gráfica de la forma de onda de los diferentes parámetros en estudio.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

- 1.1. Importancia de calidad de potencia eléctrica
- 1.2. Definición de calidad de potencia eléctrica
- 1.3. Tipos de componentes eléctricos
 - 1.3.1. Cargas lineales
 - 1.3.2. Cargas no lineales
- 1.4. Parámetros de calidad de suministro
 - 1.4.1. Transitorios
 - 1.4.1.1. Transitorios impulsivos
 - 1.4.2. Desbalance de voltaje
 - 1.4.3. Variaciones de voltaje de corta duración
 - 1.4.3.1. Depresión de voltaje (*sag*)
 - 1.4.3.2. Elevación de voltaje (*swell*)
 - 1.4.3.3. Interrupciones de voltaje
 - 1.4.4. Distorsión armónica

- 1.4.4.1. Distorsión armónica total (THD)
 - 1.4.5. Parpadeo (*flicker*)
 - 1.5. Normas
 - 1.5.1. Normas para la medición de calidad de potencia eléctrica
 - 1.5.2. Normas IEC 61000-4-30
 - 1.6. Generalidades del mantenimiento
 - 1.6.1. Mantenimiento correctivo
 - 1.6.2. Mantenimiento preventivo
 - 1.6.3. Mantenimiento predictivo
 - 1.7. Plan de mantenimiento predictivo
 - 1.8. Mantenimiento predictivo con medidor de calidad de potencia, empleando norma IEC 61000-4-30
 - 1.8.1. Progresos del mantenimiento en sistemas eléctricos
 - 1.8.1.1. Punto de conexión común. Norma IEC 61000-4-30 sobre métodos de medición de calidad de potencia
 - 1.8.1.2. Mediciones clase A de la norma IEC 61000-4-30
 - 1.8.1.3. Mediciones clase B de la norma IEC 61000-4-30
 - 1.8.2. Analizador de calidad de potencia
- 2. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS APLICADO A LA CALIDAD DE POTENCIA EN INGENIO AZUCARERO DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA
- 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
- 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

9. METODOLOGÍA

9.1. Tipo de investigación

La investigación será de tipo cuantitativo descriptivo, con el objetivo de analizar las variables que permitan predecir diferentes fallas, por lo que se llevarán a cabo mediciones al sistema eléctrico para determinar la calidad de potencia eléctrica en motores eléctricos.

9.2. Alcances de la investigación

Se eligió el método cuantitativo descriptivo, debido a que mide y recolecta datos de los indicadores en estudio y se comparan los valores de los indicadores base dados por la norma IEC 61000-4-30, para con ello concluir sobre el comportamiento de las variables eléctricas, a su vez se recomiendan cambios en las instalaciones para la mejora del comportamiento de dichas variables.

La presente investigación estudiará de una manera sencilla, práctica y eficiente las causas de las fallas eléctricas que provocan paros en el ingenio azucarero, utilizando la medición de la calidad de la potencia eléctrica como un nuevo método para detectar y predecir fallas, que a su vez tiene la posibilidad de reducir costos por mantenimiento y prolongar la vida útil de maquinaria y equipo.

9.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación no será experimental, ya que no se refiere a un estudio en el que se manipulen intencionalmente una o más variables. Por el contrario, solo se estudiará la evolución del voltaje, *flicker*, armónicos THD, transitorios de tensión y desbalances, ya que varían en el tiempo.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la investigación será longitudinal, debido a que se obtienen los datos en diferentes puntos del tiempo, esto es para determinar las condiciones de operación del instrumento de medición.

Las muestras se tomarán una vez a la semana durante aproximadamente un mes, lo que lleva a hacer cuatro mediciones para 4 diferentes puntos de la subestación. Esto es necesario para que se pueda escoger los puntos más críticos del sistema.

9.4. Variables cuantitativas

Las variables cuantitativas empleadas son las mediciones de calidad de potencia, voltaje, armónicos THD, transitorios de tensión, desbalances y *flicker*, según la norma IEC 61000-4-30 que establece los límites de las perturbaciones del suministro de energía eléctrica.

9.4.1. Voltaje

Se medirá por el porcentaje de sobrevoltaje según la norma IEC 61000-4-30 para comparar y determinar la estabilidad, la cual debe estar en los límites entre 0-200 % del voltaje de entrada.

9.4.2. Armónicos THD

Los armónicos se miden con base en el porcentaje de la distorsión armónica total (THD), la norma IEC 61000-4-30 refiere a la norma EN50160 para establecer los porcentajes aceptables de THD, porque se toma en cuenta el nivel de voltaje en que se realice la medición.

9.4.3. Transitorios

Se medirán conforme las recomendaciones de la norma IEC 61000-4-30, que son de 6 Kv pico, estas perturbaciones son de corta duración y de poca amplitud respecto a la onda fundamental de la frecuencia eléctrica, con esto es posible diagnosticar el nivel de interrupciones y qué las genera.

9.4.4. Desbalances

Los desbalances entre voltajes en un sistema trifásico según la norma IEC 61000-4-30 tienen que ser un 0 % de forma ideal, pero considerando que hasta un 5 % es aceptable, para evitar calentamientos y reducir la vida útil de los equipos, y también poder disminuir la probabilidad de que aparezcan otro tipo de perturbaciones.

9.4.5. *Flicker*

La medición se efectuará con el medidor de calidad de potencia eléctrica Dranetz Power Visa, clase A, en intervalos de 10 minutos y con el procedimiento que establece la norma IEC 61000-4-30.

9.5. Indicadores

Para garantizar la continuidad del servicio eléctrico es necesario medir la calidad de la potencia eléctrica, para esto hay que adoptar índices que se basen en las perturbaciones que provoquen fallas en un suministro de un sistema eléctrico.

El objetivo es simplificar el informe de los datos obtenidos en la medición de calidad de potencia, por esta razón los indicadores buscan evaluar la calidad del servicio con base en continuidad.

Los indicadores permiten evaluar el servicio eléctrico, logrando ser capaz de influir en la calidad y rendimiento de la producción, y por lo tanto obedeciendo a los valores de calidad de potencia. Se utilizan las tablas de valores mínimos para el criterio de pasa o no pasa la medición.

Tabla VII. **Indicadores de calidad de potencia**

Parámetros	Rango de variación
Voltaje (estado estable)	0-200 % Voltaje de entrada
Desbalances	0-5 %
Armónicos THD	Valores EN50160
Transitorios de tensión	6 kV pico
<i>Flicker</i>	0-20 parpadeos

Fuente: Robledo. (2008). *Norma IEC 61000-4-30*.

9.6. Fases de estudios

El diseño de investigación está comprendido por tres fases, en cada una de ellas se describen detalladamente los pasos a seguir de una forma ordenada y clara, para cumplir con los objetivos planteados.

9.6.1. Selección de la muestra

La primera fase describe el procedimiento adecuado para obtener la muestra de parámetros eléctricos de forma adecuada para que los datos sean representativos y seguros para las condiciones actuales del ingenio azucarero.

9.6.2. Recolección de datos cuantitativos

En la segunda fase la recolección de datos se realizará con el analizador de calidad de potencia Dranetz Power Visa, clase A, que dará los indicadores para posteriormente analizarlos, a su vez se identificarán fallos más frecuentes para comprender lo que provocan dichas fallas y así poder analizar las causas que las provocan.

9.6.3. Análisis de datos cuantitativos

En la última fase, con la selección y recolección de datos cuantitativos, es posible analizar e interpretar los datos con exactitud y precisión. Es importante mencionar que la medición es de forma directa para que los datos presenten una mayor objetividad.

La manera a realizarse se describirá en el siguiente capítulo de técnicas de análisis.

9.7. Resultados esperados

Se espera realizar un informe con los datos obtenidos en los análisis, sobre la tendencia de la calidad de potencia eléctrica para poder reducir los paros provocados por fallas, e implementar un plan de mantenimiento predictivo que permita reducir costos y mejorar el sistema eléctrico, con base en la norma IEC 61000-4-30. También se busca adquirir habilidades para el uso de mediciones de calidad de la potencia eléctrica, para establecer acciones que permitan mejoras en los equipos.

Esta investigación permitirá comparar y analizar los resultados obtenidos en la medición realizada, establecer conclusiones y soluciones para problemas que se pueden encontrar en el sistema eléctrico.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

La obtención de datos está basada en recolectar la información con el analizador de calidad de potencia Dranetz Power Visa, clase A. Este proporciona información sobre voltaje, *flicker*, armónicos THD, transitorios de tensión y desbalances sobre el sistema eléctrico, y así se puede crear una línea de tendencia y predecir el comportamiento de la calidad de potencia del sistema eléctrico. Con estos datos se puede tomar la decisión de qué aspectos se puede mejorar o la necesidad de reemplazar algún equipo eléctrico.

De la magnitud y el número de perturbaciones de voltaje, *flicker*, armónicos THD, transitorios de tensión y desbalances van a depender los aspectos que se debe considerar cambiar. Si alguno de ellos está fuera de los parámetros se debe reducir, para así poder mantenerlo dentro del rango que indica la norma IEC 61000-4-30.

Las técnicas de análisis a utilizar en la investigación para determinar la calidad de potencia eléctrica tienen su base en la norma IEC 61000-4-30 y serán los siguientes.

10.1. Gráfico circular

Será utilizado el analizador de calidad de potencia eléctrica de la marca Dranetz, debido a que tiene las lecturas más importantes para la medición de calidad de potencia.

Se tomará el dato de la calidad de potencia desde la subestación de 69KV y desde diferentes lugares, a su vez se graficarán todos los ramales analizados para observar cuál es el porcentaje de voltaje, *flicker*, armónicos THD, transitorios de tensión y desbalances que cumplen con la norma IEC 61000-4-30. Esto dará un análisis comparativo de qué porcentaje existe entre varios puntos.

10.2. Gráfico de barras

Se crearán cinco tipos de gráficos de barra, para tipo de perturbación, para voltaje, *flicker*, armónicos THD, transitorios de tensión y desbalances eléctricos, todos ellos según los límites que establece la norma IEC 61000-4-30. Su función es hacer un estudio comparativo para cada magnitud de las perturbaciones en cada punto de muestreo. De esta manera se puede comparar en función del tiempo la magnitud de cada perturbación en cada punto de medición

10.3. Línea de tendencia

La norma IEC 61000-4-30 evalúa cada perturbación individualmente. Se debe crear una línea de tendencia para cada tamaño de perturbación: voltaje, *flicker*, armónicos THD, transitorios de tensión y desbalances. Esto es importante porque ayuda a predecir el comportamiento de cada una de los disturbios eléctricos, el tipo de falla que puede ocurrir y qué posiblemente la provocó.

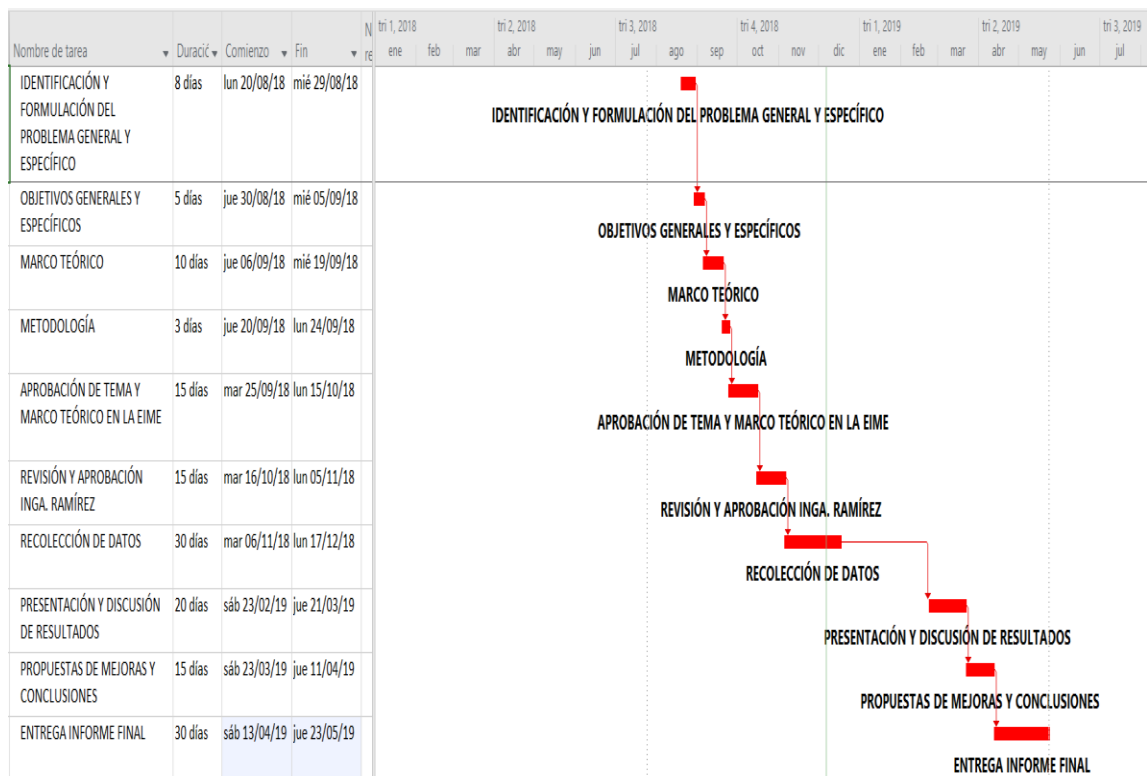
La calidad de la potencia se evaluará en función del tiempo, por lo que se tomarán muestras en segundos, minutos y horas, dependiendo el tipo de

perturbación establecido, y se realizará un gráfico de tendencia del grado de contaminación en función del tiempo.

11. CRONOGRAMA

La ejecución del proyecto tendrá como inicio el día 1 de octubre de 2017, y como fecha de finalización el 4 de marzo de 2018.

Figura 17. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

12. RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

12.1. Recursos

Los recursos utilizados en el trabajo de investigación son descritos a continuación:

12.1.1. Recurso humano

- Investigador: persona encargada de realizar el estudio para la implementación del mantenimiento predictivo.
- Asesor: persona encargada de brindar el apoyo y asesoría profesional para la elaboración del trabajo de graduación.
- Ingeniero especialista: persona contratada para utilizar el equipo de medición de calidad de potencia.
- Supervisor de mantenimiento: persona encargada de supervisar los trabajos de mantenimiento el ingenio azucarero.

12.1.2. Recurso material y equipo

- Analizador de calidad de potencia Dranetz Power Visa, clase A
- Equipo de protección de media tensión

- Computadora
- Calculadora Texas Instrument Voyage
- Agenda
- Cuaderno de notas
- Impresora

Tabla VIII. **Recurso financiero**

Descripción	Valor
Asesor de la investigación	Q 2 500.00
Investigador	Q 8 500.00
Papelería	Q 1 700.00
Trasporte	Q 2 500.00
Medidor Dranetz	Q 30 000.00
Días trabajados en medición	Q 12 000.00
Gastos varios	Q 3 200.00
Total estimado	Q 60 400.00

Fuente: elaboración propia.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABB. (2007). *Manual técnico de instalaciones eléctricas, aparatos de protección y maniobra la instalación eléctrica*. Bergamo, Italia: ABB SACE.
2. Acevedo Vásquez, D.; Chacón Pedraza, G.; Santamaría Piedrahita, F. (2016). *Metodología para la medición de parámetros de sobretensiones transitorias en redes de distribución de 11.4 Kv*. Barranquilla, Colombia: Universidad de la Costa.
3. Alarcón García, J. M. (2004). *Implementación de un sistema de mantenimiento preventivo, auxiliado por un software, para una línea de pintura electroforética*. Cholula, Puebla, México: Universidad de las Américas.
4. Alban Martínez, W.; Pantoja Puerta, G. (2011). *Programa de mantenimiento para la subestacion de la torre de cali*. Santiago de Cali, Colombia: Universidad Autónoma de Occidente.
5. American Psychological Association. (2010). *Manual de publicaciones de la American Psychological Association*. 3a ed. (S. Viveros Fuentes, Ed.; M. Guerra Frías, Trad.) México: El Manual Moderno.
6. Arellano, A.; Mireles, D.; Samayoa, R. (2011). *Mejora de la confiabilidad en el edificio Valdés Vallejo de la UNAM*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

7. Augusto, A. (2005). *Manual de calidad de potencia eléctrica en redes de distribución*. Venezuela: Energía Eléctrica de Venezuela.
8. Balcells, J. (2011). *Eficiencia en el uso de la energía eléctrica*. Barcelona, España: Marcombo.
9. Cajas, L. (2008). *Laboratorio para la investigación de la calidad de la energía eléctrica*. Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército. Sangolquí.
10. Campos, J. C. (s.f.). *Calidad de la energía eléctrica. Unidad de planeación minero energética de Colombia*. Colombia: Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología.
11. Canchila Rivera, J. A.; Nieto Valbuena, Y. A. (2018). *Diseño de la estrategia de mantenimiento predictivo eléctrico y actualización de los procedimientos de diagnóstico para el contrato de operación y mantenimiento de confipetrol en campo rubiales*. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
12. Cano Plata, E. A. (2006). *Aplicaciones de la transformada ondita y de la teoría de la potencia instantánea a la detección y clasificación de problemas de calidad de la potencia*. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires.
13. Carmona, F.; Ochoa, J. (2008). *Procedimiento para el mantenimiento predictivo en subestaciones de 115 / 34,5 / 13,8 kV, utilizando técnicas de termografía y ultrasonido. Caso de estudio. Empresa Electricidad de Valencia*. Venezuela: Universidad de Carabobo.

14. Carvajal, W.; et al. (2011). *Simulación de sistemas eléctricos con cargas no lineales y variantes en el tiempo*. Chile: Ingeniare.
15. Castañeda, O. (2009). *Análisis de calidad de energía, acerca de la calidad del producto de la zona urbana de milagro del área de concesión de la empresa eléctrica milagro usando la regulación del CONELEC No. -004/01*. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
16. Castellanos Torres, M. E.; Sánchez Miranda, M. F. (2005). *Programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipos críticos de la industria azucarera*. San Salvador, El Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.
17. Cervantes, O. (2014). *Metodología de medición de calidad de energía eléctrica en base a normas nacionales e internacionales para la universidad de la costa - CUC*. Barranquilla, Colombia: Universidad de la Costa.
18. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2016). *Compendio estadístico 2016-Calidad de servicio en distribución y transmisión*. Guatemala: CNEE.
19. De Battista, H. (2000). *Control de la calidad de potencia en sistemas de conversión de energía eólica*. De La Plata, Argentina: Universidad Nacional de La Plata.
20. Doniz Magallón, A. (2011). *Implementación de mantenimiento preventivo/predictivo en equipo biomédico en el Instituto Mexicano*

del Seguro Social. Tula, México: Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji.

21. Dranetz. (2005). *Powervisa user's guide*. Edison, New Jersey, United States of America: Dranetz.
22. Fernández Cabanas, M. (1998). *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona, España: Marcombo.
23. Ferreyra, D.; Gudiño, A.; Sada, M. (2013). *Calidad de energía: medición de parpadeo (flicker) en una instalación urbana*. Argentina: Universitaria de la Universidad Tecnológica Nacional U.T.N.
24. FINK, D. (1996). *Manual de ingeniería eléctrica. II, 13*. México: Océano de México.
25. García Garrido, S. (2003). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, S. A.
26. García, A. (2016). *Evaluación de calidad de potencia como estrategia de mantenimiento predictivo*. *Predictiva* 21, 2(16), 30-33.
27. Gento, Á.; Redondo, A. (2005). *Fuzzymant: evaluación del mantenimiento utilizando técnicas difusas*. En: I. Fernández Quesada (Ed.), IX Congreso de Ingeniería de Organización (pág. 84). Gijón: Asociación para el Desarrollo de la Ingeniería de Organización.

28. Giménez de Guzmán, M. I. (1996). *Laboratorios de circuitos electrónicos. Guía teórica*. Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
29. González Riva, J. L. (2015). *Mantenimiento predictivo en sistemas eléctricos de potencia (SEP)*. Recuperado de <http://www.microbyte.cl/elec/flipbook/201510/>.
30. GREG-024. (2005). *Normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables a los servicios de distribución de energía eléctrica*.
31. Harper, H. (2004). *El ABC de la calidad de la energía eléctrica*. México: Limusa.
32. Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación*. 6a ed. México: McGraw-Hill.
33. Holguin, M.; Gomezcoello, D. (2010). *Análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana*. Guayaquil, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
34. ISO/IEC. (2007). *Uso y referencia a normas ISO e IEC en la reglamentación técnica*. (ISO/IEC, Ed., & AENOR, Trad.) Madrid, España.
35. Issouribehere, P.; Barbera, G.; Martínez, J.; Galinski, A. (1999). *Experiencias en el control de armónicas y 'flicker' en servicios eléctricos públicos*. Ciudad del Este, Paraguay: VIII Encuentro Regional Latinoamericano de la CIGRE (ERLAC).

36. Manzanares Araica, M. A.; Torres Bermúdez, E. J. (2017). *Estudio de parámetros eléctricos y armónicos de la red eléctrica de la industria textil Validos S.A.* Managua, Nicaragua: Universidad Nacional de Ingeniería.
37. Mercado, V.; Bernardo Peña, J. (2016). *Modelo de gestión de mantenimiento enfocado en la eficiencia y optimización de la energía eléctrica.* SABER, Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente, 28(1), 99-105.
38. Monroy Méndez, L. N. (2012). *Diseño de un plan de mejora del mantenimiento correctivo y actualización del mantenimiento preventivo en Multidimensionales S. A.* Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
39. Muhammad, R. (2004). *Electrónica de potencia.* México: Pearson.
40. Navas Porto, G. (2010). *Desarrollo e implantación de plan de mantenimiento en un edificio de oficinas.* Madrid, España: Universidad Carlos III Madrid.
41. Nieto Gallino, V. G.; Alvarado Moreno, O. (2018). *Calidad de energía eléctrica: análisis armónico de sistemas eléctricos de potencia.* Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
42. NTC 5001. (2008). *Calidad de la potencia eléctrica: límites y metodología de evaluación en punto de conexión común.* Bogotá, Colombia: I. C. Certificación.

43. Olarte, W.; Botero, M.; Cañon, B. (2010). *Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria Scientia Et Technica*. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84917249041>.
44. Olivencia Polo, F. A. (2015). *Modelos y algoritmos para el mantenimiento predictivo en plantas solares*. Córdoba, España: Universidad de Córdoba.
45. Ortiz Useche, A.; Rodríguez Monroy, C.; Izquierdo, H. (2013). *Gestión de mantenimiento en pymes industriales*. Venezuela: Revista Venezolana de Gerencia.
46. Pérez Fernández, E. (2006). *Nuevo método de detección y análisis en tiempo real de eventos en la tensión de suministro de energía eléctrica empleando un modelo combinado wavelets-filtro de Kalman extendido*. España: Universidad de Cantabria, Santander.
47. Pesántez Huerta, A. E. (2007). *Elaboración de un plan de mantenimiento predictivo y preventivo en función de la criticidad de los equipos del proceso productivo de una empresa empaquera de camarón*. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
48. Prieto Roldán, D. (2014). *Guía para la implantación de un plan de mantenimiento preventivo en los equipos e instalaciones de un almacén de naranjas*. Castellón de la Plana, España: Universitat Jaume I.

49. Puello, J.; Moreno, D. (2012). *Aspectos regulatorios sobre la calidad de la energía eléctrica en Colombia*. Cartagena de Indias, Colombia: Universidad Tecnológica de Bolívar.
50. Ramírez, S.; Cano, E. A. (2003). *Calidad del servicio de energía eléctrica*. Manizales, Colombia: Comisión Nacional de Energía Eléctrica, CNEE.
51. Roa Barragán, J. E.; Caicedo Ulloa, J. C. (2016). *Mitigación de sags y swells de una red de distribución IEEE de 30 nodos mediante la ubicación de facts (SVC y DSTATCOM)*. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
52. Robledo, G. M. (2008). *Calidad de la energía eléctrica: camino a la normalización*. Santiago de Querétaro, México: Comisión Federal de Electricidad.
53. Rojas Cubide, H. E.; Rivas Trujillo, E.; Jaramillo Matta, A. A. (2014). *Aspectos técnicos y normativos para el monitoreo y medición de armónicos*. *Ingeniería*, 19 (2), 129-146.
54. Ruggero, B. (2014). *Incidencias de cargas no lineales en transformadores de distribución*. *Revista Científica de la UCSA*, 1(1), 33-51.
55. Sánchez, M. A. (2009). *Calidad de la energía eléctrica*. Puebla, México: Instituto Tecnológico de Puebla.

56. Villalobos, J. G. (2007). *Impacto de cargas con alto contenido armónico sobre el sistema eléctrico del Ipp Turboven Cagua Company Inc.* Caracas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar.

