



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Artes Ingeniería en Mantenimiento

**DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO  
PREDICTIVO UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE GESTIÓN ISO 50001 PARA  
REDUCIR LAS FALLAS POR MALA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**Ing. Raúl Enrique Girón Matta**

Asesorado por la Mtra. Inga. Ismelda Isabel López Tohom

Guatemala, junio de 2019



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO  
PREDICTIVO UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE GESTIÓN ISO 50001 PARA  
REDUCIR LAS FALLAS POR MALA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ING. RAÚL ENRIQUE GIRÓN MATTA**

ASESORADO POR LA MTRA. INGA. ISMELDA ISABEL LÓPEZ TOHOM

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO**

GUATEMALA, JUNIO DE 2019



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Mtro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Mtra. Ing. Lesbia Magalí Herrera López

**JURADO EVALUADOR QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA**

DECANO	Mtro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR(A)	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR(A)	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez
EXAMINADOR(A)	Mtra. Inga. Sandra Ninneth Ramírez Flores
SECRETARIO	Mtra. Inga. Lesbia Magalí Herrera López

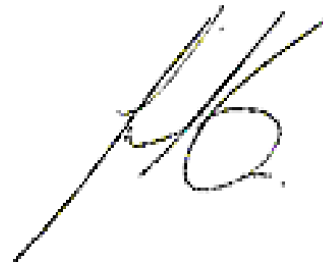


## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE GESTIÓN ISO 50001 PARA REDUCIR LAS FALLAS POR MALA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 6 de junio de 2018.

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'R' followed by 'E. G. M.' and a long horizontal stroke extending to the right.

**Ing. Raúl Enrique Girón Matta**

Ref.APT-2019-020

En mi calidad como 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 Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento titulado: **"DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE GESTIÓN ISO 50001 PARA REDUCIR LAS FALLAS POR MALA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA "** presentado por el Ingeniero Electricista Raúl Enrique Girón Matta quien se identifica con Carné 200611139, procedo a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

*"Id y Enseñad a Todos"*

**Maestro, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco**  
Decano  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, junio de 2019.

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



Ref.APT-2019-020

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado **"DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE GESTIÓN ISO 50001 PARA REDUCIR LAS FALLAS POR MALA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA"** presentado por el Ingeniero Electricista Raúl Enrique Girón Matta quien se identifica con Carné **200611139**, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Maestro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí  
Director

Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, junio de 2019.


Cc: archivo/LZ.LA.

Ref.APT-2019-020

Como Coordinadora de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado "DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE GESTIÓN ISO 50001 PARA REDUCIR LAS FALLAS POR MALA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA" presentado por el Ingeniero Electricista Raúl Enrique Girón Matta quien se identifica con Carné 200611139.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Maestra. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores  
Coordinador(a) de Maestría  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, junio de 2019.

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

Ref.APT-2019-020

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Electricista **Raúl Enrique Girón Matta** quien se identifica con carné No. **200611139** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado **"DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE GESTIÓN ISO 50001 PARA REDUCIR LAS FALLAS POR MALA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA"** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Maestra **Inga. Ismelda Isabel López Tohom**  
Asesor(a)

Inga. **Isabel López Tohom**  
Col. 5843

Guatemala, junio de 2019.

Cc: archivo/LZLA.

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por darme vida y sabiduría para continuar con las metas propuestas.
<b>Mi madre</b>	Roselia Etelvina Matta Franco, por su apoyo incondicional, sus enseñanzas y por su carisma.
<b>Mi esposa</b>	María José Leiva por su apoyo incondicional.
<b>Mis hermanas</b>	Olga y Julia Girón, por su apoyo incondicional.
<b>Mis sobrinos</b>	Alessia Gómez Girón y Joaquín Zamora Girón, por inspirarme a finalizar este trabajo.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por brindarme la oportunidad de desarrollar mi carrera profesional en tan prestigiosa institución. Por todos los recuerdos y momentos vividos.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme la oportunidad de desarrollar mi carrera profesional en tan prestigiosa Facultad.
<b>Escuela de Postgrado</b>	A todos los profesionales que conforman esta Escuela, por transmitir sus conocimientos y sabiduría dentro de las aulas.
<b>Mi asesora</b>	Msc. Ingal smelda Isabel López Tohom, por sus consejos y tiempo invertido.
<b>Mis amigos</b>	Lubin Solares, Carlos Alegre, Fernando Segura, Marco Citalán.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN.....	XXIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS....	XXV
OBJETIVOS.....	XXIX
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO .....	XXXI
INTRODUCCIÓN.....	XXXVI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Generalidades sobre calidad de energía .....	1
1.1.1. Perturbaciones electromagnéticas conducidas de baja frecuencia .....	4
1.1.2. Definiciones de calidad de energía según la norma UNE-EN 50160.....	7
1.2. Compatibilidad electromagnética.....	14
1.2.1. Generador de perturbaciones o fuente .....	16
1.2.2. Acoplamiento .....	17
1.2.3. Víctima.....	18
1.3. Normas Técnicas –Comisión Nacional de Energía Eléctrica...	18
1.3.1. Normas Técnicas del Servicio de Distribución – NTSD–.....	19
1.3.2. Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones –NTCSTS–.....	20



1.4.	Calidad de la onda de tensión y características de los fenómenos electromagnéticos .....	22
1.4.1.	Variaciones de frecuencia .....	23
1.4.2.	Variaciones lentas de tensión.....	26
1.4.3.	Micro cortes y huecos de tensión .....	27
1.4.4.	Fluctuaciones de tensión y <i>flicker</i> .....	29
1.4.5.	Sobretensiones transitorias .....	32
1.4.6.	Sobretensiones temporales.....	34
1.4.7.	Caídas momentáneas de tensión ( <i>Sags</i> de voltaje).....	36
1.4.8.	Elevaciones momentáneas de tensión ( <i>Swell</i> de voltaje).....	37
1.4.9.	Desequilibrios.....	37
1.4.10.	Armónicos .....	42
1.4.11.	Factor de potencia.....	51
1.5.	Mantenimiento y confiabilidad .....	54
1.5.1.	Mantenimiento basado en condición .....	56
1.5.2.	Mantenimiento correctivo .....	56
1.5.3.	Mantenimiento preventivo .....	57
1.5.4.	Mantenimiento funcional.....	58
1.5.5.	Mantenimiento predictivo.....	58
1.5.6.	Mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC).....	60
1.5.7.	Herramientas calve del MCC.....	60
1.5.8.	Análisis de causa raíz .....	61
1.5.9.	Mantenimiento productivo total (MPT).....	62
1.6.	Técnicas de monitoreo de condición .....	62
1.6.1.	Termografía.....	63
1.6.2.	Registrador de parámetros eléctricos o analizador de redes .....	67

1.7.	Evaluación económica.....	68
1.7.1.	Valor presente neto (VPN).....	69
1.7.2.	Período de recuperación de inversión (PRI).....	69
1.8.	Sistemas de gestión de la energía y la calidad, Norma ISO 50001 e ISO 9001 .....	69
1.8.1.	Términos y definiciones Norma ISO 50001 .....	70
1.8.2.	Política energética .....	72
1.8.3.	Revisión energética .....	73
1.8.4.	Planificación energética .....	74
1.8.5.	Línea base energética .....	76
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	77
2.1.	Configuración del analizador de calidad de energía.....	77
2.2.	Auditoría PQ .....	79
2.2.1.	Planificación de la auditoría PQ.....	80
2.2.2.	Preparación de la auditoría.....	82
2.2.3.	Inspección del sitio .....	86
2.2.4.	Monitoreo de la potencia .....	88
2.2.5.	Análisis de datos y monitoreo .....	90
2.2.6.	Aplicación de medidas correctivas.....	92
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	93
3.1.	Distribución de cargas .....	94
3.2.	Regulación de voltaje –auditoría PQ .....	97
3.3.	Desequilibrio de fases –auditoría PQ .....	99
3.4.	Armónicos de voltaje –auditoría PQ .....	103
3.5.	Armónicos de corriente –auditoría PQ.....	105
3.6.	<i>Flicker</i> –auditoría PQ.....	107
3.7.	Informe PQ según la Norma EN50160 .....	109

3.7.1.	Medición 1 .....	109
3.7.2.	Medición 2 .....	113
3.7.3.	Medición 3 .....	116
3.8.	Informe de termografía .....	120
3.8.1.	Transformador .....	120
3.8.2.	Variador de frecuencia .....	130
3.8.3.	Motores .....	131
3.9.	Análisis modal de fallas y efectos .....	136
3.9.1.	Listado de equipos .....	138
3.9.2.	Fallas típicas en la forma de onda.....	140
3.10.	Análisis de modos de falla, efectos y criticidad FMECA.....	146
3.11.	Gestión de mantenimiento y tablero de control de indicadores.....	150
3.11.1.	Año base de indicadores PQ.....	154
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	167
4.1.	Tablero de control de indicadores .....	168
4.1.1.	Tendencia del voltaje .....	169
4.1.2.	Tendencia de la corriente .....	171
4.1.1.	Tendencia del factor de potencia .....	173
4.1.2.	Tendencia de la potencia –perfil de carga.....	175
4.1.3.	Tendencia del índice de regulación de tensión .....	176
4.1.4.	Tendencia del índice de desbalance de voltaje .....	178
4.1.5.	Tendencia del índice de desbalance de corriente .	180
4.1.6.	Tendencia de desbalance de corriente .....	182
4.1.7.	Tendencia del índice de distorsión armónica de voltaje .....	182
4.1.8.	Tendencia del índice de distorsión armónica de corriente .....	184

4.1.9.	Tendencia del índice de <i>flicker</i> .....	186
4.2.	Análisis de soluciones PQ y equipos de mitigación .....	188
4.3.	Plan de implementación de acciones de mejora .....	191
4.4.	Líneas base .....	195
4.5.	Desarrollo del modelo de gestión de mantenimiento utilizando un sistema de medición de calidad de energía .....	204
4.6.	Análisis del tablero de control de indicadores.....	208
4.7.	Plan de eficiencia energética.....	216
4.8.	Línea base del plan de eficiencia energética.....	220
CONCLUSIONES .....		227
RECOMENDACIONES .....		229
BIBLIOGRAFÍA .....		231
APÉNDICES .....		237
ANEXOS.....		245



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Triángulo de potencias.....	52
2.	Proceso de planificación energética.....	75
3.	Configuración del analizador de calidad de energía.....	78
4.	Perfil de carga de las líneas de producción uno y dos.....	83
5.	Perfil de carga de la operación en simultáneo.....	84
6.	Curva monótona de potencia aparente.....	87
7.	Síntomas de equipos y problemas de calidad de energía.....	91
8.	Soluciones a problemas de calidad de energía.....	92
9.	Regulación de voltaje tablero principal –medición 1.....	98
10.	Regulación de voltaje tablero principal –medición 2.....	98
11.	Regulación de voltaje tablero principal –medición 3.....	99
12.	Desequilibrio de fases v, i –medición 2.....	101
13.	Desequilibrio de fases v, i –medición 3.....	102
14.	Distorsión armónica total de voltaje –medición 2.....	104
15.	Distorsión armónica total de voltaje –medición 3.....	104
16.	Distorsión armónica total de corriente –medición 1.....	105
17.	Distorsión armónica total de corriente –medición 2.....	106
18.	Distorsión armónica total de corriente –medición 3.....	106
19.	<i>Flicker</i> –medición 1.....	107
20.	<i>Flicker</i> –medición 2.....	108
21.	<i>Flicker</i> –medición 3.....	109
22.	Año base de regulación de voltaje.....	154
23.	Año base de desbalance de voltaje.....	155

24.	Año base desbalance de corriente.....	156
25.	Año base de distorsión armónica de voltaje.....	157
26.	Año base de distorsión armónica de corriente .....	158
27.	Año base de tercer armónico de corriente .....	159
28.	Año base de noveno armónico de corriente.....	160
29.	Año base de quinto armónico de corriente.....	161
30.	Año base de séptimo armónico de corriente.....	162
31.	Año base de onceavo armónico de corriente.....	163
32.	Año base de <i>flicker</i> .....	164
33.	Año base de temperatura de transformador .....	165
34.	Histogramas de tendencia de voltaje .....	170
35.	Histogramas de tendencia de corriente.....	172
36.	Histogramas de tendencia de corriente.....	174
37.	Tendencia de la potencia .....	176
38.	Tendencia de regulación de voltaje .....	178
39.	Tendencia de desbalance de voltaje.....	180
40.	Tendencia de distorsión armónica de voltaje.....	184
41.	Tendencia de distorsión armónica de corriente .....	186
42.	Tendencia de <i>flicker</i> .....	188
43.	Gráfico de inversión versus ahorro del plan de implementación.....	195
44.	Línea base de regulación de voltaje .....	196
45.	Línea base de desbalance de voltaje.....	197
46.	Línea base de desbalance de corriente .....	198
47.	Línea base de distorsión armónica de voltaje .....	199
48.	Línea base de distorsión armónica de corriente .....	200
49.	Línea base de <i>flicker</i> .....	201
50.	Línea base de pérdidas por armónicos .....	202
51.	Plan de gestión de potencia en motores.....	205
52.	Regulación de voltaje fase c m1, m2 y m3.....	208

53.	Espectro de armónicos de voltaje y corriente medición 1 .....	209
54.	Espectro de armónicos de voltaje y corriente medición 2 .....	210
55.	Espectro de armónicos de voltaje y corriente medición 3 .....	211
56.	Quinto armónico de corriente .....	213
57.	Línea base de consumos del plan de eficiencia energética .....	220
58.	Línea base de costos del plan de eficiencia energética .....	221
59.	Flujo neto al implementar el sistema mrv y plan de eficiencia energética .....	224

## TABLAS

I.	Clasificación y características típicas de los fenómenos electromagnéticos. ....	6
II.	Perturbaciones eléctricas más comunes .....	15
III.	Tolerancia para la regulación de tensión.....	27
IV.	Tolerancia para el desbalance de tensión .....	40
V.	Límite de armónicos de tensión.....	43
VI.	Tolerancias para distorsión armónica de tensión .....	45
VII.	Tolerancias para la distorsión armónica de la corriente de carga .....	47
VIII.	Registro de mediciones .....	85
IX.	Distorsión armónica de corriente .....	105
X.	Listado de cargas significativas .....	139
XI.	Cuadro de análisis cualitativo fmeca .....	146
XII.	Cuadro de análisis cuantitativo fmeca .....	147
XIII.	Cuadro de análisis de criticidad fmeca .....	149
XIV.	Resumen del análisis de criticidad .....	150
XV.	Acciones de mejora priorizadas .....	194
XVI.	Costo del sistema de monitoreo, verificación y reporte mrv .....	207
XVII.	Priorización de medidas de mejora .....	216



XVIII.	Plan de eficiencia energética .....	219
XIX.	Costo total de falla por mala calidad de energía .....	223
XX.	Valor presente, TIR y tiempo de retorno del sistema MRV .....	225

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Amperio, intensidad de corriente
<b>ACR</b>	Análisis causa raíz
<b>AMFE</b>	Análisis modal de fallas y efectos
<b>CEM</b>	Compatibilidad electromagnética
<b>PLC</b>	Controlador lógico rogramable, <i>Programmable Logic Controller</i>
<b>Cos</b>	Coseno
$\Delta$	Delta, incremento de una variable
<b>DIP</b>	Desbalance de corriente del participante
<b>DTD</b>	Desbalance de tensión del distribuidor
<b>DAII</b>	Distorsión armónica individual de corriente
<b>DAIT</b>	Distorsión armónica individual de tensión

<b>DATI</b>	Distorsión armónica total de corriente
<b>DATT</b>	Distorsión armónica total de tensión
<b>GIM</b>	Gestión integral de mantenimiento
<b>FP</b>	Factor de potencia
<b>ϑ</b>	Fi, ángulo
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>°</b>	Grados eléctricos
<b>Hz</b>	Hertz, unidad de frecuencia
<b>IDEn</b>	Indicadores de desempeño energético
<b>kV</b>	Kilovoltio, medida de potencial eléctrico
<b>kVA</b>	Kilo volt ampere, potencia aparente
<b>KVAR</b>	Kilo volt ampere reactivo, potencia reactiva
<b>kW</b>	Kilo vatio, potencia activa
<b>kΩ</b>	Kilo ohmio, resistencia

<b><math>\Omega</math></b>	Ohmios
<b>P</b>	Potencia eléctrica
<b>Q</b>	Quetzales, moneda de Guatemala
<b>U</b>	Tensión, unidad de voltaje
<b>V</b>	Voltaje
<b>V/s</b>	Voltios por segundo
<b>RMS</b>	Raíz media cuadrática, <i>Root Mean Square</i>
<b>SGEn</b>	Sistema de gestión energético
<b>THD</b>	Distorsión armónica total, <i>Total Harmonic Distortion</i>
<b>PRI</b>	Periodo de recuperación de la inversión
<b>dV/dt</b>	Tasa de cambio del voltaje en el tiempo



## GLOSARIO

<b>Alta tensión</b>	Nivel de tensión superior a 60 kV
<b>Auditoría PQ</b>	Auditoría de calidad de potencia y energía
<b>Baja tensión</b>	Nivel de tensión igual o inferior a 1 kV
<b>Bancos de capacitores</b>	Conjunto de capacitores utilizados para corregir el factor de potencia de una instalación eléctrica. Los capacitores consisten en un dispositivo con dos elementos conductores separados por un dieléctrico.
<b>Capacitivo</b>	Carga que se manifiesta cuando la reactancia capacitiva es mayor que la reactancia inductiva, lo que produce una corriente adelantada $90^\circ$ respecto al voltaje.
<b>Carga</b>	Elemento de un sistema eléctrico de potencia que consume energía eléctrica luego de cumplir con el proceso de generación, transformación, transmisión, y distribución.
<b>Carga no lineal</b>	Carga en la que la corriente no tiene relación lineal con el voltaje.
<b>Comercializador</b>	Persona individual o jurídica, cuya actividad consiste en comprar y vender bloques de energía eléctrica con

carácter de intermediación y sin participación en la generación, transporte, distribución y consumo.

**Componentes de Fortescue**

Método que consiste en determinar las componentes simétricas de corrientes de falla. Su aplicación es importante para el cálculo de fallas desbalanceadas en sistemas trifásicos simétricos.

**CNEE**

Comisión Nacional de Energía Eléctrica

**Confiabilidad**

Disponibilidad de un sistema eléctrico de potencia, es la probabilidad de que un equipo o sistema permanezca en funcionamiento por un período de tiempo determinado sin fallas.

**Diac**

Diodo de disparo bidireccional, este dispositivo tiene aplicaciones en electrónica de potencia y puede ser el origen de un problema por calidad de energía.

**Disponibilidad**

Porción de tiempo durante la cual un sistema o equipo estuvo en condiciones de ser usado. La disponibilidad es función de la frecuencia de fallas y el tiempo que demanda reanudar el servicio.

**Distribuidor**

Persona individual o jurídica titular o poseedora de instalaciones destinadas a distribuir comercialmente energía eléctrica.

**EEGSA**

Empresa Eléctrica de Guatemala S. A.

<b>Eficiencia energética</b>	Proporción u otra relación cuantitativa entre el resultado en térmicos de desempeño, servicios, bienes o la energía y su entrada.
<b>Efecto Joule</b>	Fenómeno por el cual, si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan. Depende directamente del cuadrado de la intensidad de corriente, el tiempo y la resistencia.
<b>Emisividad</b>	Capacidad de un material para emitir energía radiante.
<b>Ferroresonancia</b>	Fenómeno oscilatorio estacionario no lineal, se presenta en sistemas eléctricos de corriente alterna debido a la interacción de una carga capacitiva y una inductiva.
<b>Frecuencia</b>	La magnitud que mide el número de ciclos o repeticiones por unidad de tiempo de un fenómeno, para este caso de una onda sinodal.
<b>Generador</b>	Máquina de corriente alterna cuya velocidad en estado estable es proporcional a la corriente en su armadura.
<b>Gran usuario</b>	Consumidor de energía cuya demanda de potencia excede 100 kW. El Gran Usuario no está sujeto a



regulación de precio y las condiciones de suministro son libremente pactadas con el distribuidor u otro suministrador.

**IEC** Comisión electrotécnica internacional, International Electrotechnical Commission

**IEEE** Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, Institute of Electrical and Electronics Engineers

**Impedancia** Resistencia aparente de un circuito eléctrico al paso de corriente alterna. La reactancia consiste en valores de oposición al paso de corriente alterna por condensadores o bobinas.

**INDE** Instituto Nacional de Electrificación

**Inductivo** Carga que se manifiesta cuando la reactancia inductiva es mayor que la reactancia capacitiva, lo que produce un voltaje adelantado  $90^\circ$  respecto a la corriente.

**ISO** Organización internacional de estandarización, International Organization for Standardization.

**MCC** Mantenimiento centrado en confiabilidad

**Media tensión** Nivel de tensión superior 1 kV y menor a 60 kV

**MPT** Mantenimiento productivo total

<b>NEMA</b>	Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos, National Electrical Manufacturers Association.
<b>NTCSTS</b>	Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones.
<b>NTSD</b>	Normas Técnicas del Servicio de Distribución
<b>Potencia activa</b>	Corresponde a un valor medio de potencia en un período de tiempo y representa la capacidad de un circuito de transformar la energía eléctrica en trabajo, se mide en Watt.
<b>Potencia reactiva</b>	La consumida por circuitos de corriente alterna que poseen cargas reactivas, esta no produce trabajo útil, ya que su valor medio es nulo. Las cargas reactivas pueden ser motores, transformadores de voltaje y cualquier otro dispositivo similar que posea bobinas.
<b><i>Prime Web</i></b>	Plataforma de monitoreo de parámetros eléctricos como voltaje, corriente, potencia, energía y factor de potencia en tiempo real.

**Rectificador de diodos** Dispositivo formado por cuatro diodos ensamblados de forma que una corriente alterna (AC) conectada a dos de los diodos produce una corriente continua (DC) de salida en los dos diodos restantes. Es un componente eléctrico utilizado en muchos aparatos, tanto a nivel industrial como a nivel doméstico y puede ser el origen de fallas por calidad de energía.

**Sag** Caídas de voltaje o dips de la tensión de alimentación, causadas, generalmente, por fallas que ocurren dentro de las instalaciones del usuario o en el sistema de distribución pública.

**Sistema monofásico** Sistema de producción, distribución y consumo de energía eléctrica formado por dos hilos conductores de corriente alterna uno de fase u otro de neutro, por lo tanto todo el voltaje varía de la misma forma. La distribución monofásica de la electricidad se suele usar cuando las cargas son principalmente de iluminación, calefacción, pequeños motores eléctricos, etc.

**Sistema MRV** Sistema de monitoreo, reporte y verificación de variables e indicadores.

<b>Sistema trifásico</b>	Sistema de producción, distribución y consumo de energía eléctrica formado por cuatro o cinco hilos, tres conductores de corriente, neutro y tierra. Sistema con tres tensiones y corrientes desfasados $120^\circ$ entre sí.
<b>SNI</b>	Sistema Nacional Interconectado
<b><i>Swell</i></b>	Una cresta o <i>swell</i> se define como el incremento del valor RMS de voltaje o corriente en valores entre 1.1 y 1.8 p.u., algunas veces pueden durar varios segundos, oscilan entre 0.5 a más de 30 ciclos.
<b>Transformada de Fourier</b>	Operación matemática que transforma una señal del dominio de tiempo a dominio de frecuencia y viceversa.
<b>TRELEC</b>	Transportista Eléctrica Centroamericana
<b>VPN</b>	Valor presente neto



## RESUMEN

Las industrias de alimentos deben contar con un sistema de gestión de mantenimiento que tenga la capacidad de realizar el monitoreo de variables e indicadores de calidad de energía eléctrica para reducir las fallas operativas de los equipos. El propósito del presente estudio es desarrollar un sistema MRV con la capacidad de controlar variables e indicadores de calidad de energía, control de demanda y energía, así como registros, gráficos de tendencia, alarmas y rutinas de optimización; lo cual ayudará a cumplir con el ciclo de mejora continua de los sistemas de gestión utilizados por la industria.

El objetivo de las auditorías PQ y de los sistemas MRV es servir como herramientas para ayudar a identificar y resolver problemas de equipos críticos en instalaciones eléctricas industriales. La auditoría consiste en un procedimiento organizado y sistemático para la resolución de problemas y tiene como meta realizar un análisis técnico–económico sobre la rentabilidad de la implementación de acciones de mejora en calidad de energía eléctrica y eficiencia energética.

La implementación de las acciones de mejora, resultado de las auditorías PQ, garantizan que los equipos sensibles y significativos dentro de la planta operaran con valores muy cercanos a sus valores nominales de placa. El resultado de la implementación ayuda a mejorar el desempeño energético de los equipos eléctricos, incrementa su vida útil y cumple con el principio de conservación de la energía en la pirámide de la eficiencia energética.

El problema central en la industria seleccionada para el estudio es que no existe un sistema MRV que permita realizar el monitoreo, control, seguimiento y

medición de variables de calidad de energía eléctrica para dar cumplimiento a los objetivos y metas estratégicas, técnicas y operativas. Cualquier mejora que se realice sin contar con un sistema MRV incrementará el riesgo de inversión, aumenta las pérdidas totales y empeora la eficiencia general de la planta.

En conclusión, la implementación del modelo de gestión de mantenimiento para reducir las fallas por mala calidad de energía eléctrica en una industria de alimentos, incrementa la eficiencia general de los equipos por medio de un sistema para el control y optimización de los indicadores. La implementación de las mejoras resultado de la auditoría PQ, aumentará la confiabilidad y desempeño energético de los equipos de acuerdo a las metas y objetivos planteados por la empresa como parte del ciclo de mejora continua.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS**

En una industria de alimentos se realizó una auditoría PQ para determinar el desempeño de los equipos eléctricos, identificar las fuentes de interferencia, determinar la calidad de potencia y la idoneidad de la potencia disponible en la instalación eléctrica. El resultado de la auditoría refleja la necesidad de implementar un modelo de gestión de mantenimiento enfocado en el análisis de fallas por mala calidad de energía eléctrica para mejorar la confiabilidad y el desempeño energético en equipos críticos.

### **Descripción del problema**

La industria seleccionada para el estudio ha integrado nuevos equipos, sistemas de control y automatización en sus procesos, introduciendo perturbaciones a la red eléctrica. Para que la integración de nuevos equipos en el proceso productivo cuente con un desempeño energético adecuado, es necesario realizar mediciones y levantar información cualitativa para analizar las causas de falla por una calidad de energía deficiente y proponer soluciones de mejora.

Por medio de los resultados de la auditoría de calidad de potencia (auditoría PQ) se determinó que existen problemas relacionados con las variables voltaje, corriente, factor de potencia y potencia en la instalación eléctrica de la industria seleccionada para el estudio. Se considera necesario implementar un sistema de monitoreo y verificación de variables relacionadas con calidad de energía



eléctrica que contribuya al desarrollo de procesos de mejora continua y toma de decisiones de forma inteligente.

La encuesta que se realizó, como parte de la auditoría, refleja la necesidad de la empresa de integrar al sistema de gestión de calidad, un modelo de gestión de mantenimiento basado en confiabilidad que permita la integración de un sistema inteligente para la medición, monitoreo y control de los parámetros relacionados con la calidad de energía eléctrica.

El gerente de la industria indicó que desea incrementar la producción, debido a que ingresarán sus productos a los supermercados de Guatemala, por lo cual es necesario implementar un modelo de gestión de mantenimiento para reducir las fallas por mala calidad de energía eléctrica.

### **Formulación del problema**

Para desarrollar un modelo de gestión de mantenimiento enfocado en el análisis de fallas por mala calidad de energía eléctrica, para mejorar la confiabilidad y el desempeño energético en equipos críticos, es necesario responder las siguientes preguntas:

Pregunta central

¿Cómo se desarrolla un modelo de gestión de mantenimiento enfocado en el análisis de fallas por mala calidad de energía eléctrica, que mejore la confiabilidad y el desempeño energético de los equipos críticos para la producción en una industria de alimentos?

## Preguntas auxiliares

¿Cuáles son los valores permisibles de voltaje, corriente, potencia, factor de potencia y temperatura para que los equipos eléctricos operen de acuerdo a sus datos nominales de placa?

¿Qué indicadores se deben medir para desarrollar una programación y planificación de actividades de mantenimiento relacionadas con la calidad de energía eléctrica?

¿Qué método se debe utilizar para analizar las fallas por mala calidad de energía eléctrica en equipos críticos para la producción de alimentos?

¿Cómo se determina la factibilidad técnico-económica de inversión en equipos que reduzcan las fallas por mala calidad de energía eléctrica?

¿Por qué los sistemas de medición y control permiten tomar decisiones para implementar medidas de ahorro de energía eléctrica?



## **OBJETIVOS**

### **General**

Desarrollar un modelo de gestión de mantenimiento enfocado en el análisis de fallas por mala calidad de energía eléctrica, para mejorar la confiabilidad y el desempeño energético en equipos críticos de una industria de alimentos, utilizando herramientas de gestión ISO 50001.

### **Específicos**

1. Establecer los valores permisibles de voltaje, corriente, potencia, factor de potencia y temperatura de acuerdo a las normas y estándares internacionales.
2. Definir indicadores para el control y optimización del rendimiento eléctrico, rutinas de inspección y monitoreo de condición de equipos críticos.
3. Establecer el método de análisis de fallas por mala calidad de energía eléctrica que afecten la confiabilidad y disponibilidad de equipos críticos para la producción de alimentos.
4. Determinar la factibilidad de inversión en equipos que reduzcan las fallas por mala calidad de energía eléctrica utilizando métodos económico-financieros.

5. Proponer un sistema de monitoreo y verificación de variables relacionadas con calidad de energía eléctrica que contribuya al desarrollo de procesos de mejora continua y toma de decisiones de forma inteligente.

## RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La presente investigación comprende un estudio descriptivo correlacional, el estudio utiliza técnicas de monitoreo de condición para el análisis de variables de calidad de energía y las integra al modelo de gestión. Se utilizan variables cualitativas y cuantitativas para el análisis modal de fallas y efectos combinado con métodos estadísticos para establecer tendencias de falla por mala calidad de energía en equipos críticos para la producción en industria de alimentos.

El diseño de la investigación consiste en un proceso sistemático no experimental, se analizaron las variables de calidad de energía que afectan y tienen relación en el desempeño energético de equipos significativos para la producción. El plan de muestreo incluye la toma de muestras de los parámetros de calidad de energía en equipos significativos o en el punto de conexión que se registren fallas repetitivas. Se utilizaron los formatos presentados en el anexo 1 y 2 para registrar los datos de los equipos críticos y analizar las mediciones realizadas en campo.

El resultado del análisis de la información sirvió para desarrollar un tablero de control de indicadores como herramienta para la gestión del mantenimiento. Se utilizó el método de análisis modal de fallas y efectos para establecer los objetivos; y así cumplir con las necesidades del modelo de gestión de mantenimiento para reducir las fallas por calidad de energía.

Por último, se realiza un análisis de costos, utilizando métodos económico-financieros. Se desarrolla un plan de implementación utilizando como referencia la Norma ISO 50001 y se elabora la propuesta del modelo de gestión de

mantenimiento, considerando la integración de un sistema de monitoreo y verificación de las variables y parámetros asociados a las fallas por mala calidad de energía.

En la fase I se realizó la revisión documental de la información contenida en las normas técnicas emitidas por la CNEE y el AMM. Se realiza una revisión de los estándares IEC, IEEE, NEMA y documentos técnicos de fabricantes de equipos eléctricos. El modelo de gestión toma como referencia la Norma ISO 50001 y se revisa la Norma ISO 9001 para definir los estándares de calidad. Se analizó los tipos de mantenimiento y la filosofía del mantenimiento centrado en confiabilidad y su vinculación con la implementación de sistemas de medición inteligente. Adicionalmente, se realiza una revisión de los manuales y guías de la cámara termográfica y el analizador de redes que se utilizan para realizar las mediciones de campo.

En la fase II se trabajaron las mediciones de calidad de energía en una industria de alimentos , así como, una auditoría de calidad de potencia (auditoria PQ).

En la fase III se presentan los resultados de las mediciones realizadas en campo de los parámetros de regulación de voltaje, desequilibrio de fases, armónicos de voltaje y corriente, *flicker* y el informe termográfico. Se presenta el análisis cualitativo de los modos de fallas y efectos en relación a la severidad, detectabilidad, mantenibilidad y seguridad. Por último, se realizó un análisis de criticidad y se calculó la eficiencia general de los equipos en cada medición para generar los indicadores del año base.

La fase IV consiste en generar las líneas base de tendencia de variables e indicadores para proponer el plan de implementación de acciones de mejora resultado de la auditoría PQ.

La fase V presenta el sistema de monitoreo de variables e indicadores de calidad de energía, el cual sirve como herramienta para implementar las acciones de mejora recomendadas en los primeros tres años resultado de la auditoría PQ y luego se proponen medidas de mejora en eficiencia energética.

El modelo de gestión de mantenimiento presenta una línea base de consumos de energía que reflejan un potencial de ahorro energético de 12,000 kWh al año. Luego se presenta el plan de eficiencia energética que tiene como objetivo reducir un 3 % el consumo anual de energía eléctrica. La implementación de acciones de mejora del año 1 al año 3, resultan en una reducción de pérdidas  $I^2R$  y una reducción de las fallas por mala calidad de energía (conservación de la energía). La implementación de acciones de mejora del año 4 al año 10, resultan en un ahorro energético por el cambio a motores de alta eficiencia (gestión de la energía).





## INTRODUCCIÓN

El presente estudio consiste en el desarrollo de un modelo de gestión de mantenimiento predictivo que ayude a sistematizar el proceso de monitoreo y verificación de variables relacionadas con el consumo de energía eléctrica de una industria que produce alimentos. En el cual se propone una estrategia para reducir los sobrecostos e ineficiencias producidas por mala calidad de energía eléctrica. Asimismo, promueve la utilización de técnicas propias de monitoreo de condición para obtener un diagnóstico eficaz y solucionar las fallas de raíz, eliminando fallas repetitivas y mejorando la confiabilidad.

Se proponen como técnicas de monitoreo de condición el análisis de calidad de energía y la termografía; el estudio se realizó en una industria con demanda máxima de hasta 150 kW. La industria cuenta con dos líneas de producción las cuales se operan en horarios distintos, debido a un incremento en la demanda se realiza un cambio operativo y ambas líneas inician a operar en simultáneo, produciendo efectos adversos en la calidad de energía eléctrica de la instalación.

Los datos obtenidos por medio de diagnósticos energéticos, demuestran la incidencia económica de los problemas relacionados con la calidad de energía eléctrica. Los problemas por mala calidad de potencia, afectan la mayor parte de la instalación eléctrica, y, por ende, a los equipos asociados a la producción.

Existen fabricantes de equipos que miden la calidad de energía eléctrica por medio de las mediciones, se analizan los datos y se cuantifican las pérdidas económicas que se introducen por la presencia de ruido y deformaciones de la onda de voltaje y corriente eléctrica. Este tipo de perturbaciones introducen fallas

que pueden llegar a representar un gasto elevado para la empresa, ya que dificulta la búsqueda de la mejora continua y entorpece la producción (FLUKE, 2011). El funcionamiento continuo de los equipos eléctricos bajo condiciones distintas a las que especifican los fabricantes, reduce el tiempo de vida e incrementa los costos de mantenimiento durante su operación debido a distorsiones y/o desbalances presentes en las ondas de voltaje y corriente que alimentan alguna carga trifásica.

Los estudios de calidad de energía incluyen mediciones en equipos puntuales como motores eléctricos, tableros eléctricos, transformadores, equipo electrónico de control, PLC, extractores y otros equipos eléctricos que tienen la función de suministrar algún servicio (aire, agua, enfriamiento, etc.) directamente relacionado con la producción de alimentos.

La Norma Internacional ISO 50001 (2011): “Es un estándar aplicable en cualquier tipo de organización y tiene como objetivo mantener y mejorar los sistemas de gestión de energía con el propósito de permitir la mejora continua de la eficiencia energética, la seguridad energética, la utilización de energía y el consumo energético con un enfoque sistemático” ( p. 1)

La confiabilidad de los sistemas eléctricos constituye una parte esencial para el departamento de mantenimiento de toda industria. Según Bethel, N. (2017), el personal de mantenimiento ha estado limitado a utilizar herramientas que no proporcionan información suficiente para determinar soluciones a problemas eléctricos. “Sin embargo, las industrias buscan reducir sus costos energéticos integrando en sus sistemas productivos, equipos como variadores de frecuencia, bancos de capacitores y otras cargas no lineales que incrementan los problemas de calidad de energía eléctrica” (p. 2 )

De acuerdo a las observaciones y necesidades identificadas en la industria de alimentos, el presente estudio propone desarrollar un modelo de gestión de mantenimiento con enfoque en la calidad de energía eléctrica. La base para el desarrollo del estudio radica en analizar tendencias de falla, definir indicadores con base en los estándares ISO, proponer un sistema de monitoreo y verificación de parámetros clave y por último determinar la rentabilidad de proyectos enfocados en reducir costos por mala calidad de energía eléctrica en equipos con consumos significativos.

La investigación está compuesta por tres capítulos.

En el primer capítulo se definen los conceptos relacionados con calidad de energía eléctrica. Se especificó la forma de cálculo de los parámetros y variables necesarias para analizar los índices de: Desbalance de corriente, mala regulación de voltaje, armónicos de corriente, armónicos de voltaje y desbalance de voltaje” (CNEE, 1999); según lo que establece la normativa de la CNEE y los estándares IEEE, NEMA e IEC. Se definen conceptos de eficiencia energética de acuerdo a lo que establece el estándar ISO 50001, resaltando los conceptos vinculados al uso de herramientas de gestión en sistemas de energía eléctrica para reducir los consumos de potencia y energía. Se incluyen definiciones relacionadas con el mantenimiento predictivo y las técnicas de monitoreo de condición que serán utilizadas en los diagnósticos de calidad de energía. Por último, se define el método de cálculo del valor presente neto (VPN) y el periodo de recuperación de inversión (PRI).

En el segundo capítulo se realiza el desarrollo de la investigación y se describen las condiciones operativas y método de conexión del analizador de redes trifásicas. Se manejaron datos cualitativos y cuantitativos para la recopilación, organización y procesamiento de las mediciones tomadas en

campo. Se realizó un análisis causa-efecto para registrar las fallas causadas por un mal balance de cargas, efecto de armónicos, factor de potencia y bajo/alto voltaje. El análisis causa-efecto permitió determinar la incidencia de las fallas, producidas por mala calidad de energía eléctrica en la confiabilidad operacional de la planta. Se definen indicadores de calidad de energía que permitan realizar una planificación energética de acuerdo al uso y consumo de energía de equipos significativos, según la Norma ISO 50001 (2011) son: equipos y procesos que representan el mayor uso de energía o que ofrecen un mayor potencial de ahorro energético.

Luego se presentan los resultados en forma gráfica y del análisis de fallas en tablas. El modelo propuesto consiste en planificar las actividades de mantenimiento utilizando herramientas de gestión de la energía. Para establecer una línea base, se utilizará la información de la revisión energética realizada en la industria de alimentos, con una muestra representativa de datos se elaborarán proyecciones y tendencias a futuro de las pérdidas energéticas y fallas asociadas a la mala calidad de energía eléctrica. Se considera en el modelo una variable dependiente, la calidad de la onda de voltaje y corriente, y se toman como variables independientes, las fallas producidas por calentamientos en los equipos y los costos asociadas a la mala calidad de energía eléctrica.

En el tercer capítulo, se realizó la discusión de los resultados y el análisis de costos por mala calidad de energía eléctrica para la industria de alimentos. Se desarrolló un análisis económico comparativo para dos escenarios: reemplazo por fallas y proyectos de mejora e implementación del monitoreo de condición. Se utilizaron métodos económico-financieros para definir las propuestas de mejora que resultan luego de realizar el diagnóstico energético. Se utilizó el método de análisis modal de fallas y efectos (AMFE) como herramienta para desarrollar un plan de mantenimiento predictivo. Su objetivo es reducir los fallos

potenciales por mala calidad de energía en equipos puntuales como motores eléctricos, tableros eléctricos, transformadores, equipo electrónico de control, PLC y extractores. Se utiliza la herramienta *Solve* de Microsoft Excel® para optimizar los indicadores relacionados con las variables de calidad de energía eléctrica.

Por último, se presenta la propuesta del modelo de gestión de mantenimiento basada en confiabilidad, utilizando como técnicas de monitoreo de condición, la termografía y el análisis de calidad de energía para estimar tendencias de falla. Se desarrollará un plan de mantenimiento, utilizando los indicadores de gestión establecidos en los estándares ISO 50001 e ISO 9001. Se realizó el seguimiento y monitoreo del desempeño energético de las variables de calidad de energía que afectan la confiabilidad operacional de los equipos significativos. Se realizó la evaluación técnico-económica para la instalación de un equipo de submedición que permita realizar el monitoreo y verificación de las medidas de mejora recomendadas en el estudio.



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Generalidades sobre calidad de energía

“Los estándares internacionales empleados para describir el método de medición e interpretación de resultados de los parámetros de calidad que deben ser monitoreados en los puntos de conexión de una red de energía eléctrica”, corresponde a la Norma IEC 61000-4-30 e IEEE 1559. Leal, G. (2008, p. 5 ), menciona que: “la Norma UN-EN 50160 se enfoca únicamente en definir los parámetros de calidad de energía eléctrica que deben ser medidos en los puntos de intercambio de energía”.

El estándar IEC 61000-4-30 define la calidad de energía eléctrica como: las características de electricidad en un punto dado de la red eléctrica, evaluadas con relación a un conjunto de parámetros técnicos de referencia”. El estándar IEEE 1159/1995 define el término calidad de energía eléctrica como: “la gran variedad de fenomenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un instante dado y en un punto determinado de la red eléctrica” (IECOR, 2016, p.6)

La calidad de energía eléctrica se puede clasificar de la siguiente forma:

- “La calidad de servicio de energía eléctrica, el cual está relacionado con la frecuencia y el tiempo de interrupciones, es decir con la continuidad del servicio y la confiabilidad de la red eléctrica” (UNE-EN 50160, 2011, p. 1).



- “La calidad de la potencia eléctrica, la cual se refiere a las variaciones en la forma de onda, frecuencia y amplitud de las señales de corriente y voltaje presentes en la red eléctrica” (UNE-EN 50160, 2011, p. 1).

La calidad de energía eléctrica se ha convertido en un objetivo estratégico para las compañías de electricidad, para el personal de mantenimiento, personal de gestión de instalaciones terciarias o industriales y para los fabricantes de equipos por tres motivos” (Ferracci, P., 2004, p. 5).

- Necesidad económica de aumentar la competitividad entre empresas.
- Generalización de equipos sensibles a perturbaciones de la tensión, siendo a su vez perturbadores de la onda de tensión.
- Liberalización del mercado de electricidad” (Ferracci, P., 2004, p. 5).

“Las perturbaciones electromagnéticas que pueden llegar a afectar el funcionamiento y el desempeño energético de los equipos y procesos industriales, requieren de un proceso integral que permita diseñar, seleccionar, operar y mantener todos los equipos que funcionan con energía eléctrica” (Bethel, N., 2017, p. 23).

Para implementar acciones que reduzcan los problemas por mala calidad de energía, es necesario definir una carga crítica como: “Aquella que al dejar de funcionar o funcionar de forma inapropiada pone en peligro la seguridad del personal y produce pérdidas económicas de gran magnitud. Por el contrario, se define como carga sensible aquellas cargas que requieren de altos estándares de calidad para su funcionamiento, es decir, un suministro eléctrico libre de ruido y perturbaciones” (Villagrán, L.; Martínez, A.,; Carrera, C., 2008, p. 34).

Según Ferracci, P. (2004): “El monitoreo de la calidad de energía eléctrica puede tener diversos fines, por lo cual debemos tomar en cuenta que los parámetros a medir y la precisión de la medición difieren respecto a la aplicación” (p. 5).

Las principales aplicaciones pueden ser:

- Contractual: en un mercado liberalizado pueden establecerse contratos de potencia y energía entre un comercializador/proveedor y el usuario final, entre el productor y el transportista o incluso entre un transportista y un distribuidor de energía eléctrica. Debido a que los términos contractuales requieren que los parámetros de calidad de energía eléctrica sean comparables con valores límites predefinidos en estándares internacionales, es necesario contar con mediciones que registren estos valores.
- Mantenimiento: a pesar de cumplir con todas las reglamentaciones del arte de una instalación eléctrica (diseño, coordinación de protecciones, esquema de conexión a tierra, régimen de neutro, etc.), las perturbaciones pueden ser olvidadas o subestimadas. Las instalaciones industriales generalmente tienden a evolucionar conectando nuevas cargas o realizan modificaciones que desde la fase de diseño pueden presentar desviaciones. Es por ello que es necesario contar con sistemas de medida de los parámetros de calidad de la energía eléctrica que faciliten el diagnóstico, detección y registro de las perturbaciones y alarmas de las instalaciones eléctricas por este tipo de eventos.
- Optimización del funcionamiento de las instalaciones eléctricas: mejora de la productividad y aumento de la confiabilidad de los equipos eléctricos. Para conseguir estos objetivos es necesario contar con un funcionamiento óptimo de los procesos y una buena gestión de la energía, ambos factores dependen de la calidad de la energía eléctrica. Las áreas de explotación, mantenimiento y gestión de una empresa necesitan contar con un software que asegure el mando, control y

supervisión constante de estos parámetros y así disponer de energía eléctrica de calidad adaptada a las necesidades de la industria. Ferracci, P. (2004, p. 5).

- Estudios estadísticos: el análisis de datos permite planificar y definir acciones preventivas utilizando los registros de perturbaciones en una red eléctrica. La identificación de estos datos ayudará a reducir los costos de explotación de la maquinaria y equipo, mejorando al mismo tiempo el control de perturbaciones por mala calidad de energía eléctrica. El hecho de poder determinar por medio de un modelo estadístico el entorno electromagnético al cual estará sometida una instalación eléctrica industrial futura o que instalará nuevos equipos, permite llevar a cabo acciones preventivas que mejoren el desempeño energético y la competitividad de una empresa. (Ferracci, P. (2004, p. 6).

### **1.1.1. Perturbaciones electromagnéticas conducidas de baja frecuencia**

“Las perturbaciones electromagnéticas que pueden afectar el funcionamiento de los equipos y procesos industriales se clasifican en perturbaciones conducidas y radiadas: 1) de baja frecuencia ( $< 9\text{kHz}$ ), 2) de alta frecuencia ( $\geq 9\text{ kHz}$ ) y 3) descargas electrostáticas” .(Leal, G., 2008, p. 3).

“Generalmente, las mediciones de calidad de energía eléctrica consisten particularmente en determinar las perturbaciones electromagnéticas conducidas de baja frecuencia, esta gama incluye las sobretensiones transitorias y transmisión de señales en la red”. (Ferracci, P., 2004, p. 6) .

Esta clase de perturbaciones se clasifican de la siguiente forma:

- “Huecos de tensión y cortes

- Armónicos e inter armónicos
- Sobretensiones temporales
- Sobretensiones (*swell*)
- Sobretensiones transitorias
- Fluctuaciones de tensión
- Desequilibrios de tensión
- Variaciones de frecuencia de alimentación
- Componentes de corriente continua (cc) en las redes de corriente alterna (ca)
- Tensiones de señalización” (Ferracci, P., 2004, p. 8).

En general, todo el conjunto de perturbaciones puede agruparse en cuatro categorías: “las que afectan la amplitud de la onda, la forma de la onda, la frecuencia y la simetría de la tensión”. (Ferracci, P., 2004, p. 8).

De acuerdo a lo que establece el estándar IEEE Estándar 1559, los fenómenos electromagnéticos pueden ser de tres tipos:

- “Variación en el valor RMS del voltaje o la corriente

- Perturbaciones de carácter transitorio
- Deformaciones en la forma de onda”. (Avella, 2004, p. 4)

Tabla I. **Clasificación y características típicas de los fenómenos electromagnéticos**

CATEGORÍA	CONTENIDO TÍPICO ESPECTRAL	DURACIÓN TÍPICA	MAGNITUD TÍPICA DE LA TENSIÓN
1. Transitorios			
1.1. Impulsos			
1.1.1. Nanosegundos	“5 ns de elevación”	“<50 ns”	
1.1.2. Microsegundos	“1 ms de elevación”	“50 ns – 1 ms”	
1.1.3. Milisegundos	“0.1 ms de elevación”	“>1 ms”	
1.2. Oscilatorios			
1.2.1. Baja frecuencia	“<5 kHz”	“0.3 – 50 ms”	0 – 4 p.u.
1.2.2. Frecuencia media	“5 – 500 kHz”	“20 ms”	0 – 8 p.u.
1.2.3. Alta Frecuencia	“0.5 – 5 MHz”	“5 ms”	0 – 4 p.u.
2. Variaciones de corta duración			
2.1. Instantáneas			
2.1.1. <i>Sag</i>		“0.5 – 30 ciclos”	0.1 – 0.9 p.u.
2.1.2. <i>Swel</i>		“0.5 – 30 ciclos”	1.1 – 1.8 p.u.
2.2. Momentáneas			
2.2.1. Interrupción		“0.5 ciclos – 3 s”	<0.1 p.u.
2.2.2. <i>Sag</i>		“30 ciclos – 3 s”	0.1 – 0.9 p.u.
2.2.3. <i>Swel</i>		“30 ciclos – 3 s”	1.1 – 1.4 p.u.
2.3. Temporal			

2.3.1. Interrupción		“3 s – 1 min”	<0.1 p.u.
2.3.2. Sag		“3 s – 1 min”	0.1 – 0.9 p.u.
2.3.3. Swell		“3 s – 1 min”	1.1 – 1.2 p.u.
3. Variaciones de larga duración			
3.1. Interrupción sostenida		>1 min	0
3.2. Baja tensión		>1 min	0.8 – 0.9 p.u.
3.3. “Sobretensión”		>1 min	1.1 – 1.2 p.u.
4. Desbalance de tensión		Estado estable	0.5 – 2 %
5. Distorsión de forma de onda			
5.1. Componente directa		Estado estable	0 – 0.1 %
5.2. Contenido armónico		Estado estable	0 – 20 %
5.3. Interarmónicas		Estado estable	0 – 2 %
5.4. Muecas en la tensión		Estado estable	
5.5. Ruido		Estado estable	0 – 1 %
6. Fluctuaciones de tensión		Intermitente	0.1 – 7 %
7. Variación en la frecuencia		<10 s	

Fuente: Norma IEEE Estándar 1559 de 1995. p. 4.

### 1.1.2. Definiciones de calidad de energía según la norma UNE-EN 50160

- Punto de conexión: “es en punto de conexión eléctrica entre la instalación del usuario al sistema eléctrico público”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 1).

Nota: “este punto puede diferir, por ejemplo, en el punto de medición de

electricidad o el punto de acoplamiento común (UNE-EN 50160, 2011, p. 1).

- “Voltaje de alimentación: el valor RMS de voltaje en un momento dado en los terminales de alimentación, el cual se mide en un intervalo determinado”. (UNE-EN 50160, 2011, p.1).
- “Voltaje nominal del sistema ( $U_n$ ): voltaje para el cual esta designado el sistema y al que se refieren ciertas características operativas del mismo”. (UNE-EN 50160, 2011, p.1).
- Voltaje de alimentación declarada ( $U_c$ ): “la tensión de alimentación declarada  $U_c$  es normalmente la tensión nominal de un sistema  $U_n$ . Si existe un acuerdo entre el proveedor y el usuario se aplica una tensión diferente a la nominal, entonces, este valor pasa a ser la tensión de alimentación declarada  $U_c$ ”. (UNE-EN 50160, 2011, p.1).
- Baja tensión (BT): de acuerdo a la Norma UNE-EN 50160, p. 1, un voltaje usado para el suministro de electricidad, cuyo límite superior de valor nominal RMS es de 1 kV.
- Media tensión (MT): de acuerdo a la Norma UNE-EN 50160, p. 1, un voltaje usado para el suministro de electricidad, cuyo valor nominal RMS oscila entre 1 kV y 35 kV.
- “Condiciones normales de operación: para un sistema de distribución de energía eléctrica la condición de abastecimiento de la demanda de una carga, cuenta con un sistema de conmutación y despeje de fallas que funciona por medio de sistemas de protección automáticos, los cuales en ausencia de

condiciones anormales o eventos de fuerza mayor no necesitan operar”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 1).

- “Perturbación conducida: fenómeno electromagnético propagado a lo largo de los conductores de línea de un sistema de distribución. En algunos casos, un fenómeno electromagnético se propaga a través de los devanados del transformador y por tanto, entre las redes eléctricas a diferentes niveles de voltaje. Estas perturbaciones pueden degradar el rendimiento de un dispositivo, equipo o sistema o incluso causar daños”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 1).
- “Frecuencia del voltaje de alimentación: frecuencia de repetición de la onda fundamental del voltaje de alimentación medida en un intervalo de tiempo dado”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 2).
- “Variación de voltaje: aumento o disminución de voltaje, normalmente se debe a una variación total o parcial de la carga en un sistema de distribución eléctrica”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 2).
- Cambio rápido de voltaje: una simple variación del valor RMS de voltaje entre dos niveles consecutivos, los cuales son sostenidos pero de duración indefinida.
- *Flicker* (parpadeo): “impresión de la inestabilidad de la sensación visual inducida por un estímulo luminoso cuya luminancia o distribución espectral fluctúa con el tiempo”. (IEV 1161-08-13, p. 2).

“Nota: la fluctuación del voltaje provoca cambios en la luminancia de las lámparas que pueden crear el fenómeno visual llamado parpadeo. Por



encima de un cierto umbral de parpadeo se convierte en una fluctuación molesta. A ciertas tasas de repetición incluso las amplitudes muy pequeñas pueden ser molestas”. (IEV 1161-08-13, p. 2).

- “Gravedad del *flicker* (parpadeo): intensidad de la molestia del parpadeo definida por el método de medición del parpadeo UIE-IEC y evaluada por las siguientes cantidades”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 2):
  - “La gravedad a corto plazo ( $P_{st}$ ) medida durante un período de diez minutos”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 2).
  - “La gravedad a largo plazo ( $P_{lt}$ ) calculada a partir de una secuencia de valores de 12  $P_t$  – valores en un intervalo de dos horas, de acuerdo a la siguiente expresión”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 2):

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st,i}^3}{12}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$P_{lt}$ : *flicker* de largo plazo

$P_{st}$ : *flicker* de corto plazo

- Caída del voltaje de alimentación (dip): una reducción repentina del voltaje de alimentación a un valor entre 90 y 1 % de la tensión declarada  $U_c$ , seguida de una recuperación del voltaje después de un corto período de tiempo. Convencionalmente, la duración de una caída de tensión está comprendida entre 10 ms y 1 minuto. La profundidad de una caída de voltaje se define como la diferencia entre el voltaje RMS mínimo. Los cambios de voltaje que no reducen el voltaje de alimentación a menos del 90 % de la tensión declarada  $U_c$ , no se consideran como caídas (UNE-EN 50160, 2011, p. 3).

- “Interrupción de suministro: condición en la que el voltaje en los bornes de alimentación es inferior a 1 % de la tensión declarada  $U_c$ ”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 3). Una interrupción de suministro se puede clasificar como:
  - Aviso o acordado: “Cuando los consumidores son informados con antelación, para permitir la ejecución de los trabajos programados en el sistema de distribución”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 3).
  - Accidental: causados por fallos permanentes o transitorios, principalmente relacionado con eventos externos, fallos de equipos o interferencias. Una interrupción accidental se clasifica como:
    - De larga duración: mayor a tres minutos, causada por un fallo permanente.
    - De corta duración: hasta tres minutos, causada por un fallo transitorio.

Nota: “El efecto de una interrupción preestablecida puede ser minimizado por los clientes tomando las medidas apropiadas. Las interrupciones accidentales de suministro son eventos impredecibles, en gran parte aleatorios”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 3).

- Sobretensión de frecuencia temporal: “Una sobretensión en una ubicación determinada, de duración relativamente larga”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 3).

Nota: “Las sobretensiones temporales suelen originarse en operaciones de conmutación o fallas (por ejemplo, reducción súbita de la carga, fallas monofásicas, no linealidades)”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 3).

- Sobretensión transitoria: “Una sobretensión oscilatoria o no oscilante de corta duración, usualmente muy amortiguada con una duración de unos pocos milisegundos o menos”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 3).

Nota: Las sobretensiones transitorias suelen ser causadas por un rayo, la conmutación o el funcionamiento de fusibles. El tiempo de subida de una sobretensión transitoria puede variar desde menos de un microsegundo hasta unos pocos milisegundos”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 3).

- Tensión armónica: “Una tensión sinusoidal con una frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 3). La tensión armónica puede ser evaluada de la siguiente forma:

- “Individual: por su amplitud relativa ( $U_h$ ) relacionada con la tensión fundamental  $U_1$ , donde  $h$  es el orden de armónico”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 4).
- “Global: por ejemplo, por el factor de distorsión armónica total (THD), calculado usando la siguiente expresión”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 4):

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} u_h^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

THD: distorsión armónica total

$U_h$ : voltaje con grado de armónica  $h$

Nota: “Los armónicos de la tensión de alimentación son causados principalmente por cargas no lineales de los clientes conectados en todos los niveles de voltaje de la impedancia de suministro y dan lugar a voltajes armónicos. Las corrientes armónicas y las impedancias del sistema y, por lo tanto, las tensiones armónicas en los terminales de alimentación varían en el tiempo”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 4).

- Tensión interarmónica: “Una tensión sinusoidal con una frecuencia entre los armónicos, es decir la frecuencia no es un múltiplo entero de la fundamental”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 4).

Nota: “Las tensiones interarmónicas en las frecuencias adyacentes cercanas pueden aparecer al mismo tiempo formando un espectro de banda ancha”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 4).

- Desequilibrio de voltaje: “En un sistema trifásico, es una condición en la que los valores RMS de los voltajes de fase o los ángulos de fase entre fases consecutivas no son iguales”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 4).
- Voltaje de señalización de red: “Señal superpuesta a la tensión de alimentación para la transmisión de información en el sistema público de distribución y en las instalaciones del cliente. Se pueden clasificar tres tipos de señales en el sistema público de distribución”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 4):
  - Señales de control de ondulación: “Señales de tensión sinusoidal superpuestas en el rango de 110 a 3000 Hz”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 4).

- Señales portadoras de línea de alimentación: “Señales de tensión sinusoidales superpuestas en el rango entre 3 y 148,4 kHz”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 4).
- Señales de señalización de red: “Superposición de transiciones en puntos seleccionados de la forma de onda de tensión”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 4).

La Norma UNE-EN 50160, p. 5: “Puede ser reemplazada total o parcialmente por los términos de un contrato entre el cliente individual y el proveedor de electricidad”.

Las características de tensión que se dan en la norma no están diseñadas para ser utilizadas como niveles de compatibilidad electromagnética (EMC) o límites de emisión de usuario para perturbaciones conducidas en sistemas de distribución pública.

## **1.2. Compatibilidad electromagnética**

La compatibilidad electromagnética CEM (VEI 161-01-07) es: “La capacidad de un aparato o de un sistema para funcionar en su entorno electromagnético de forma satisfactoria y sin producir el mismo perturbaciones electromagnéticas intolerables para todo aquello que se encuentra en este entorno”. (Schneider Electric, 2000). En la tabla II se muestran las perturbaciones más comunes en sistemas eléctricos.

Tabla II. **Perturbaciones eléctricas más comunes**

<b>Clases</b>	<b>Tipos</b>	<b>Origen</b>
Energéticas	Picos de tensión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conmutación de fuentes</li> <li>• Corto circuito</li> <li>• Arranque de motores de gran potencia</li> </ul>
Frecuencias medias	Armónicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas con semiconductores de potencia, Hornos de arco</li> </ul>
Altas frecuencias	Subidas de tensión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caídas de rayo directas o indirectas</li> <li>• Maniobras de aparatos de mando</li> <li>• Corte de corrientes de cortocircuito con aparatos de protección</li> </ul>
	Descargas electrostáticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descargas de electricidad estática acumulada por una persona</li> </ul>

Fuente: Vallant, F., Delaballe, J., 2000. p. 4.

“Las perturbaciones se generan de diversas formas y las principales causas generadoras son variaciones bruscas de magnitudes eléctricas, tensión o corriente. Las perturbaciones pueden propagarse de dos formas: por conducción, a lo largo de los conductores o por radiación, en forma de ondas electromagnéticas”. Vallant, F., Delaballe, J. (2000, p. 4) menciona que para estudiar la CEM es necesario dividir un sistema en tres elementos:

- Generador de perturbaciones o fuente
- La propagación o acoplamiento
- Elemento perturbado o víctima

### **1.2.1. Generador de perturbaciones o fuente**

Se considera como fuente de perturbaciones cualquier equipo o fenómeno físico-eléctrico que emita una perturbación electromagnética por conducción o radiación. Entre las principales causas de perturbaciones se cita la distribución de energía eléctrica, ya que gran parte de las perturbaciones provienen del cierre y apertura de circuitos: a) circuitos en baja tensión inductivos (bobinas, contactores, motores, electroválvulas) producen subidas de tensión de alta frecuencia en los bornes de los arrollamientos, b) circuitos en media y alta tensión, la apertura/cierre de elementos de corte provoca la aparición de ondas de frente muy abrupto (en nanosegundos), este tipo de ondas perturban a sistemas con microprocesadores (Vallant, F., Delaballe, J., 2000, p. 10).

La característica principal de las perturbaciones impulsionales es que cuenta con un espectro muy ancho, que puede llegar hasta 100 MHz. Las fuentes de perturbación, generalmente son por descargas electrostáticas o

funcionamiento de aparata eléctrica como: relé, seccionadores, contactores, interruptores automáticos, etc.

En electrónica de potencia, las fuentes principales de perturbaciones son debido a los transitorios de tensión y con menor probabilidad los de corriente. La tensión puede variar en valores de centenas de voltios en aproximadamente una decena de nanosegundo, lo cual representa una  $dV/dt$  superior a 109 V/s. Estas variaciones bruscas de tensión producen circulación de corriente a través de todas las capacidades parasitas, produciendo corrientes de varias centenas de mili amperios. Este tipo de corrientes perturbadoras circulan por el conductor de referencia de tensión de aparatos electrónicos (circuito 0 V) y puede dañar los datos o incluso los equipos (Vallant, F., Delaballe, J., 2000, p. 9).

### **1.2.2. Acoplamiento**

“Es el enlace, paso o transmisión de perturbaciones electromagnéticas de la fuente a la víctima”. (Vallant, F., Delaballe, J., 2000, p. 7). Los tipos de acoplamiento se dividen en tres tipos:

El acoplamiento campo a cable, en modo común o diferencial: el campo electromagnético puede acoplarse a cualquier estructura filamentososa, y por ende a los cables generando tensiones de tipo común (masa a tierra) o de tipo diferencial (entre hilos o fases). Una tensión conducida en modo común (VMC) es la tensión aplicada a un conjunto de conductores activos, la cual tiene una referencia a tierra y una corriente en modo común (IMC) es una corriente que recorre todos los conductores activos en un mismo sentido. Los acoplamientos en modo diferencial implican tensiones o corrientes entre fases o hilos conductores (Vallant, F., Delaballe, J., 2000, p. 12).

El acoplamiento por impedancia común: es el resultado de una impedancia común a dos o varios circuitos. Se pueden mencionar como impedancia común



al sistema de tierras, la red de distribución, conductor de retorno, entre otros. En baja frecuencia, es normal que el valor de impedancia común sea muy bajo, por ejemplo la impedancia a 60 Hz entre dos puntos de una red de tierra debe ser siempre inferior a 1  $\Omega$ . Sin embargo, esta misma impedancia a las frecuencias características que ocurren las perturbaciones puede llegar a alcanzar valores muy altos en el orden de k $\Omega$ .

El acoplamiento cable a cable en tipo diferencial (diafonía): se denomina diafonía capacitiva o diafonía inductiva según sea el origen de la variación en la tensión o variación de intensidad. Se llama diafonía capacitiva cuando una variación brusca de tensión entre un cable y un plano de masa (tierra) o entre dos cables, genera un campo eléctrico que puede inducirse a otra estructura de hilos paralela. Se le llama diafonía inductiva a una variación de corriente en un hilo o cable que genera un campo electromagnético que puede acoplarse formando un par e inducir una tensión perturbadora (Vallant, F., Delaballe, J., 2000, p. 13).

### **1.2.3. Víctima**

Luego de definir la fuente y el acoplamiento, la víctima es cualquier material eléctrico susceptible a ser perturbado. Generalmente está conformado por equipos electrónicos que presentan disfunción debido a la presencia de perturbaciones electromagnéticas de origen externo. Los fallos de funcionamiento se clasifican en: a) permanente y medible, b) aleatorio y no repetitivo que persiste luego de las perturbaciones, c) aleatorio y no repetitivo que aparece al mismo tiempo que las perturbaciones y d) defecto permanente del equipo (Vallant, F., Delaballe, J., 2000, p. 16).

## **1.3. Normas técnicas –Comisión Nacional de Energía Eléctrica**

A continuación se describe el objeto de las normas técnicas publicadas por la CNEE para los sistemas de distribución y transmisión en Guatemala. Se

definen los parámetros de calidad de producto y calidad de servicio contenidos en las Normas NTSD y NTCSTS” (CNEE, 1999, p. 6).

### **1.3.1. Normas técnicas del servicio de distribución –NTSD–**

El objeto de las normas es: “Establecer derechos y obligaciones que los prestatarios y usuarios del servicio eléctrico de distribución, índices o indicadores de referencia para calificar la calidad con que se proveen los servicios de energía eléctrica, tanto en el punto de entrega como en el punto de utilización de tales servicios, tolerancias permisibles, métodos de control, Indemnizaciones, sanciones y/o multas, respecto a los siguientes parámetros”. (CNEE, 1999, p. 6).

a) “Calidad del producto suministrado por el distribuidor:

- Regulación de tensión
- Desbalance de tensión en servicios trifásicos
- Distorsión armónica
- *Flicker*

b) Incidencia del usuario en la calidad del producto

- Distorsión armónica
- *Flicker*
- Factor de potencia

c) Calidad del servicio técnico

- Interrupciones” (CNEE, 1999, p. 6).

En el artículo 13 de la resolución CNEE No. 09-99 Normas Técnicas del Servicio de Distribución establece entre las obligaciones de los usuarios:

Realizar todas las instalaciones internas, incluyendo reparaciones o modificaciones, que sean necesarias para evitar introducir perturbaciones a la red del distribuidor y que pueda afectar la calidad del servicio eléctrico de distribución. El presente estudio se enfoca en analizar las fallas derivadas de las perturbaciones que se presentan por mala calidad de energía eléctrica en una industria de alimentos y bebidas. Las NTSD servirán para establecer los parámetros a evaluar en una industria pequeña conectada a la red de distribución de Empresa Eléctrica de Guatemala EEGSA (CNEE, 1999, p. 12).

### **1.3.2. Normas técnicas de calidad del servicio de transporte y sanciones –NTCSTS–**

El objeto de las normas es: “Establecer los índices de referencia para calificar la calidad con que se proveen los servicios de energía eléctrica en el sistema de transporte en el punto de entrega, las tolerancias permisibles, los métodos de control, las indemnizaciones y las sanciones respecto a los siguientes parámetros”. (CNEE, 1999, p. 5).

a) “Calidad del producto por parte del transportista

- Regulación de tensión
- Distorsión armónica

- *Flicker*

b) Incidencia de los participantes en la calidad del producto

- Desbalance de corriente
- Distorsión armónica
- *Flicker*
- Factor de potencia

c) Calidad del servicio técnico

- Indisponibilidad forzada de líneas
- Indisponibilidad de equipo de compensación
- Indisponibilidad programada
- Desconexiones automáticas
- Reducción a la capacidad de transporte” (CNEE, 1999, p. 5)

En el artículo 13 de la resolución CNEE No. 50-99 Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones establece entre las obligaciones de los participantes.

Realizar todas las reparaciones o modificaciones de sus instalaciones, que sean necesarias, para evitar introducir afectar la calidad del servicio del transportista. El presente estudio se enfoca en analizar las fallas derivadas de las perturbaciones que se presentan por mala calidad de energía eléctrica en una industria de alimentos y bebidas. Las NTCSTS servirán para establecer los parámetros a evaluar en una industria grande conectada a la red de transmisión de la Transportista Eléctrica Centroamericana TRELEC (CNEE, 1999, p. 8).

#### **1.4. Calidad de la onda de tensión y características de los fenómenos electromagnéticos**

“Los factores que implican una buena calidad de energía eléctrica entregada a un usuario en un sistema trifásico de tensiones son: permanencia en el tiempo, equilibrio, onda perfectamente sinusoidal, amplitudes iguales al valor nominal y frecuencia de 50/60 Hz. Cualquier alteración a una de estas características se considera como una perturbación que disminuye la calidad del producto” (Calidad de la energía. s.f.).

La calidad de la onda de tensión depende de cuatro parámetros fundamentales: 1) amplitud, 2) frecuencia, 3) forma y 4) simetría. En el caso de Guatemala, las centrales eléctricas producen una onda sinusoidal a 60 Hz que se considera prácticamente perfecta, es decir la calidad de suministro desde este punto se considera que es buena. Sin embargo, en el proceso de transporte y distribución de energía eléctrica desde las centrales eléctricas de generación hasta el punto de consumo de los usuarios, se realiza a través de redes eléctricas en las que estas magnitudes sufren alteraciones que pueden afectar a diversos equipos (Calidad de la energía. s.f.).

Adicionalmente: “La operación de ciertos equipos presentes en las industrias como el caso de arranque/paro de motores, máquinas eléctricas, balastos electrónicos, variadores de velocidad y otras cargas no lineales afectan

los parámetros de onda de tensión y corriente de las redes eléctricas”. (Calidad de la energía. s.f.).

#### **1.4.1. Variaciones de frecuencia**

Según la UNE-EN 50160 (2011) La frecuencia del voltaje de alimentación debe ser de 60 Hz (América y algunos países asiáticos) y 50 Hz (Europa y África). El administrador del mercado mayorista AMM establece en la Norma de Coordinación Operativa No. 4 (NCO4), literal 4.4 regulación de frecuencia, la frecuencia nominal del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala –SNI– es de 60 Hz y permanecerá constante mientras exista un balance entre la generación y la demanda más las pérdidas.

Las variaciones de frecuencia en un sistema eléctrico de potencia interconectado se producen cuando se altera el equilibrio entre la carga y la generación. El parámetro de frecuencia está directamente relacionado con la velocidad de giro, es decir, el número de revoluciones por minuto de los generadores. La rotación del eje de los generadores está sincronizada con la frecuencia de la red y su velocidad angular eléctrica debe ser la misma (UNE-EN 50160, 2011, p. 5).

La NCO4 define los valores límites de frecuencia para el SNI, operando bajo condiciones normales 59.9 Hz y 60.1 Hz; en condiciones de emergencia 59.8 Hz y 60.2 Hz.

De acuerdo a lo que establece la Norma UNE-EN 50160 (2011): “Para frecuencia nominal de 50 Hz, en condiciones normales de operación el valor medio de frecuencia fundamental medida durante 10 segundos”.

- Para los sistemas con conexión síncrona a un sistema interconectado deberá estar dentro de un rango de:

- 0 Hz +/- 1 % (49.5 - 50,5 Hz) durante el 95 % de la semana
- 50 Hz +4 % / -6 % (47 - 52 Hz) durante el 100 % de la semana
- Para sistemas sin conexión síncrona a un sistema interconectado (por ejemplo, sistemas de suministro en isla) deberá estar dentro de un rango de (AMM, 2013):
  - 50 Hz +/- 2 % (49 - 51 Hz) durante el 95 % de la semana
  - 50 Hz +/-15 % (42,5 - 57,5 Hz) durante 100 % de la semana” (AMM, 2013, p. 5).

“En condiciones normales de operación, un sistema de potencia interconectado debe contar con mayor capacidad de generación que el consumo. Para cumplir con este requisito, el AMM, define reservas operativas (literal 4.3 de la NCO 4) que permiten compensar variaciones bruscas de carga y así mantener el valor de frecuencia dentro de los márgenes de reserva establecidos en el literal 4.3.2 de la NCO 4”. (AMM, 2013, p. 3).

- Reserva rodante: se define como la suma de la capacidad de generación sincronizada disponible en el SNI, que sirve para cubrir incrementos imprevistos de demanda y contingencias de generación o transporte de energía.
- Reserva rodante: la reserva rodante no deberá ser menor a 30 MW y se define como la suma de la reserva rodante regulante más la reserva rodante operativa.
- Reserva rodante regulante: la magnitud de esta reserva será el 3 % de la generación en cada hora.
- Reserva rodante operativa: de 00:01 a 06:00 4 % de la potencia generada en el SNI, 06:01 a 18:00 3 % de la potencia generada en el SNI, 18:01 a 22:00 2 % de la

potencia generada en el SIN y de 22:01 a 24:00 4 % de la potencia generada en el SIN.

- Reserva rápida: generación que puede ser arrancada y conectada al SIN en un plazo no superior a una (1) hora.
- Reserva fría: generación que puede ser arrancada y conectada al SIN en un plazo comprendido entre una (1) hora y cuarenta y ocho (48) horas. (AMM, 2013).

Sin embargo, existen condiciones excepcionales en las que se producen desequilibrios entre la generación y la carga, dando lugar a variaciones de frecuencia. Existen dos casos para esta situación:

- (AMM, 2013, p. 4) La carga es superior a la generación, en este escenario la frecuencia disminuye. Si la frecuencia sobrepasa los márgenes de tolerancia y los sistemas de generación no son capaces de responder de forma rápida, se puede producir un colapso del sistema. (La NCO 4 en los literales 4.4.4 y 4.4.5 define los límites para este tipo de casos:
  - Reducción de tensión: si el AMM detecta que la frecuencia está por debajo de 59.7 Hz y no dispone de reservas de generación suficientes para restablecer a valores normales, se declara condición de emergencia y se ordena una reducción en los niveles de tensión del SIN, sin riesgo de caer en un colapso de tensión.
  - Reducción manual de carga: si durante una condición de emergencia el AMM detecta que la frecuencia del SIN cayera por debajo de 59.5 Hz y no dispone de reservas de generación suficientes para restablecer a valores normales, se ordena a Distribuidores y Grandes Usuarios la desconexión manual de carga.



El principal efecto de las variaciones de frecuencia son cambios en la velocidad de máquinas rotativas. Las condiciones citadas anteriormente, tienen incidencia directa en algunos equipos y se producen (Calidad de la energía, s.f.).

- “Efectos distorsionados en filtros de armónicos.
- Alteración de equipos electrónicos que utilizan la frecuencia como referencia de tiempo.
- Esfuerzo y fatiga de turbogeneradores por estar sometidos a altas vibraciones”. (AMM, 2013).

#### **1.4.2. Variaciones lentas de tensión**

Una variación lenta de tensión ocurre cuando hay una alteración en la amplitud de la onda sinusoidal y por ende en el valor eficaz de tensión”. (UNE-EN 50160, 2011). Según la UNE-EN 50160 (2011): “Las variaciones de la tensión de alimentación bajo condiciones normales de operación, para un período de una semana el 95 % de los valores medidos en intervalos de 10 minutos deberá ser  $\pm 10$  % de la tensión nominal”. “Se considera como una variación lenta de tensión aquella cuya duración supera los 10 segundos”. (Calidad de la energía, s.f.).

Las Normas Técnicas del Servicio de Distribución establecen en el artículo 24 las tolerancias admisibles en la desviación porcentual, respecto a la tensión nominal en los puntos de entrega de energía eléctrica a distintos niveles de tensión (CNEE, 1999).

Tabla III. **Tolerancia para la regulación de tensión**

<b>Tensión</b>	<b>Tolerancia respecto al voltaje nominal (%)</b>	
	<b>Servicio urbano</b>	<b>Servicio rural</b>
Baja	8	10
Media	6	7
Alta	5	5

Fuente: CNEE, 1999, p. 16.

En el caso de motores, los efectos debido a valores de tensión inferiores al valor nominal producen reducciones del par mecánico que requiere el eje, produciendo una desaceleración de la máquina. Al volver a la tensión nominal, el incremento rápido puede producir calentamientos excesivos y otros daños en los ejes y rodamientos de los motores. Una tensión alta puede producir efectos de sobrecalentamiento en los receptores y en caso que se supere el límite térmico que toleran los equipos eléctricos conectados en ese instante, se puede ocasionar una avería o daño irreparable (Calidad de la energía, s.f.).

### **1.4.3. Microcortes y huecos de tensión**

Son faltas de tensión con una duración muy corta, generalmente en el orden de milisegundos y menores a 10 segundos, cuyos efectos inciden en las cargas sensibles que tienen equipo electrónico asociado. Los microcortes son los principales causantes de producir mal funcionamiento o paralización total de procesos productivos.

“Los huecos de tensión son caídas repentinas de la tensión del sistema por debajo del 90 % del valor nominal y se recupera en un tiempo determinado,

generalmente oscila entre 10 milisegundos y 60 segundos”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 7).

La Norma UNE-EN 50160 (2011), indica que: Los cambios rápidos en el voltaje de alimentación se deben a cambios de carga en las instalaciones de los usuarios o por conmutaciones en el sistema eléctrico. Bajo condiciones normales de operación un cambio rápido de voltaje generalmente no excede 5 % del voltaje nominal, pero pueden ocurrir variaciones de hasta 10 % del voltaje nominal de corta duración durante un día de forma repetida. Un cambio de voltaje que resulte en un valor menor al 90 % del voltaje nominal es considerado como una caída del voltaje de suministro.

Las Normas Técnicas del Servicio de Distribución establecen en el artículo 54 que: “No se consideran interrupciones menores a 3 minutos”. Las Normas Técnicas de Calidad de la CNEE no definen los límites o tolerancias para el caso de microcortes y huecos de tensión (CNEE, 1999).

“El microcorte y los huecos de tensión tienen su origen principalmente, en reenganches automáticos lentos de interruptores, produciendo fenómenos conducidos con corrientes elevadas que provocan caídas de tensión a través de las impedancias de la red. Cuando los dispositivos de protección actúan para aislar un defecto en la red, se producen cortes en el voltaje de alimentación de los usuarios cercanos a la zona afectada”. (Ferracci, P., 2004 p. 15).

Los huecos de tensión y micro cortes se pueden clasificar como un mismo fenómeno en función del tipo, profundidad y duración:

- Tipo

- Monofásicos: se produce una reducción de la tensión únicamente en una de las fases.
- Polifásicos: existe más de una fase afectada por la reducción de tensión:
- Profundidad
  - Poca: reducción de tensión inferior al 20 %
  - Media: reducción de tensión entre 20 y 50 %
  - Alta: reducción de tensión superior al 50 %
- Duración
  - Corta: tiempo inferior a 100 milisegundos
  - Media: tiempo entre 100 y 500 milisegundos
  - Larga: tiempo superior a 500 milisegundos e inferior a 1 minuto (Calidad de la energía, s.f.)

#### **1.4.4. Fluctuaciones de tensión y flicker**

“Las fluctuaciones de tensión se producen cuando existen series de variaciones periódicas o series de cambios aleatorios en la tensión de la red eléctrica. Las variaciones periódicas del valor eficaz o valor pico de tensión que se mantienen durante un tiempo finito no especificado, producen un efecto de parpadeo que es perceptible al ojo humano por la variación en la luminosidad de las lámparas”. (Calidad de la energía, s.f.).

La Norma UNE-EN 50160 (2011) establece: que en condiciones normales de operación, en cualquier período de una semana, la severidad de parpadeo a largo plazo causada por la fluctuación de voltaje debe ser  $P = 1$  durante el 95 % del tiempo. La reacción al parpadeo es subjetiva y puede variar dependiendo de la causa percibida del parpadeo y del período durante el cual persiste. En algunos casos  $P = 1$  da lugar a la molestia, mientras que en otros casos los niveles más altos de  $P$  se encuentran sin molestia”.

Las normas técnicas del servicio de distribución establecen en los artículos 36 y 37 que “el *flicker* deberá ser medido por el índice de severidad de corto plazo ( $P_{st}$ ) según la Norma IEC 1000-3-7”. “El índice de tolerancia máxima para *flicker* es de  $P_{st} \leq 1$ , durante el 95 % del tiempo del período de medición que es de 7 días continuos. El índice de severidad de corto plazo se evalúa en intervalos de medición de 10 minutos”. (CNEE, 1999, p. 24).

“Existe otro índice para evaluar el *flicker*, el índice de severidad de largo plazo  $P_{lt}$ , el cual cuenta con intervalos de medición de 2 horas. Se calcula a partir de doce valores consecutivos del  $P_{lt}$ , utilizando la siguiente fórmula”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 7):

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{sti}}{N}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$P_{lt}$ : índice de severidad de largo plazo

$P_{st}$ : índice de severidad de corto plazo

$N$ : registros

“Las fluctuaciones de tensión se producen por variaciones rápidas de cargas industriales como soldadoras, hornos de arco, laminadoras y otras cargas

con altos picos de consumo. Las fluctuaciones producidas por cargas industriales pueden afectar a un gran número de usuarios conectados al mismo circuito y que se encuentren alimentados por la misma fuente". (Ferracci, P., 2004, p. 19). Las fluctuaciones de tensión originadas por los usuarios conectados a la red cuya demanda no es constante y experimenta variaciones rápidas en su funcionamiento en el tiempo, pueden dar origen al *flicker*.

Los principales dispositivos o equipos perturbadores de tipo industrial pueden ser, según Calidad de la energía (s.f.):

- Máquinas de soldadura por resistencia
- Arranque de motores
- Molinos trituradores
- Ventiladores de minas
- Hornos de arco
- Compresores
- Laminadoras
- Horno de microondas
- Lámparas de descarga
- Electrodomésticos con regulación automática

#### **1.4.5. Sobretensiones transitorias**

“Las sobretensiones transitorias son variaciones bruscas del valor instantáneo de la amplitud de tensión, en algunas ocasiones puede llegar a ser varias veces superior al valor nominal del voltaje. Los valores de sobretensión oscilan en periodos de microsegundos hasta 10 milisegundos, equivale a medio ciclo de la onda sinusoidal”. (Calidad de la energía, s.f.).

La Norma UNE-EN 50160 (2011) define: “Como una sobretensión oscilante o no oscilatoria de corta duración y usualmente muy amortiguada, tiene una duración de unos pocos milisegundos o menos. Generalmente, las sobretensiones transitorias suelen ser causadas por rayo, conmutación u operación de fusibles. El tiempo de subida de una sobretensión transitoria varía desde menos de un microsegundo hasta unos pocos milisegundos”.

“Las sobretensiones transitorias deben ser analizadas con valores instantáneos y no utilizando valores promedio. En general, son consideradas como fenómenos aleatorios producidos por maniobras en la red que se auto amortiguan luego de algunos ciclos”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 8).

Las sobretensiones son de tres tipos según Ferracci, P. (2004):

- “Temporales a frecuencia industrial
- De maniobra
- De origen atmosférico (rayo)”

De acuerdo a Ferracci, P. (2004, p. 29): “Las sobretensiones transitorias pueden presentarse de dos formas”

- En modo diferencial, entre conductores activos fase-fase o fase-neutro.
- En modo común, entre conductores activos y masa o tierra”.

“Las sobretensiones transitorias entre conductores activos y tierra en baja tensión, generalmente no exceden el pico de 6 kV, pero pueden presentarse calores más altos ocasionalmente. El tiempo de subida está comprendida en un rango de algunos milisegundos hasta menos de un microsegundo”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 8).

El contenido energético de una sobretensión transitoria varía considerablemente respecto a su origen. Una sobretensión inducida por rayo generalmente, tiene mayor amplitud pero su contenido energético es menor comparada con una sobretensión transitoria producida por una conmutación, la cual tiene una duración más larga. Los dispositivos de protección contra sobretensión en las instalaciones industriales, deben seleccionarse tomando en cuenta la necesidad de energía más severa para las fallas producidas por sobretensiones por conmutación (UNE-EN 50160, 2011, p. 8).

“Las sobretensiones transitorias entre conductores activos y tierra en media tensión, son causadas por conmutación, directamente por inducción y por rayos. Generalmente, las sobretensiones de conmutación tienen una amplitud menor que las sobretensiones por rayo, pero tienen un tiempo de subida más corto y/o una duración más prolongada. El esquema de coordinación del aislamiento del cliente debe ser compatible con el que utiliza el proveedor”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 8).



Sin embargo, hay que tomar en cuenta que “los niveles de aislamiento dieléctrico con el que se diseñan los cables, aisladores, capacitores, transformadores, interruptores, etc., cuentan con cierta inmunidad a los impulsos de tensión. Existen dispositivos electrónicos contruidos a base de semiconductores que no cuentan con la inmunidad necesaria ante una sobretensión transitoria. Entre los dispositivos más comunes podemos mencionar rectificadores con diodos, controladores de velocidad mediante tiristores y triacs, sistemas digitales de control, instrumentación, alarmas, sistemas de disparo, etc.”. (Calidad de la energía, s.f.).

#### **1.4.6. Sobretensiones temporales**

La sobretensión temporal: “Un aumento de la tensión de alimentación con una duración relativamente larga. La duración de una sobretensión temporal es el tiempo durante el cual la tensión es superior al límite de tensión de referencia. Este tipo de eventos se caracteriza por su duración y por la tensión máxima alcanzada durante el aumento del voltaje de alimentación, generalmente se representa como un porcentaje sobre la tensión de referencia” (Calvo, V., 2017, p. 35).

La Norma UNE-EN 50160 (2011) clasifica las sobretensiones temporales de potencia entre conductores activos y tierra para sistemas eléctricos en baja y media tensión.

“En baja tensión una sobretensión temporal, generalmente aparece durante un defecto o falla en un sistema de distribución público o dentro de la instalación de un usuario y desaparece al eliminarse la falla. Por lo general, la sobretensión puede alcanzar el valor de tensión de fase a fase, debido al desplazamiento del punto neutro de un sistema trifásico”. (Ferracci, P., 2004, p. 30).

- “Valores indicativos en baja tensión: bajo ciertas circunstancias, una avería que ocurre aguas arriba de un transformador producirá sobre voltajes temporales en el lado secundario, durante el tiempo que fluya la corriente de falla. Las sobretensiones de este tipo generalmente no exceden 1.5 kV RMS”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 8).

“En media tensión una sobretensión temporal, generalmente aparece durante las una fallas fase a tierra en el sistema de distribución público o dentro de la instalación de un usuario y desaparece al eliminarse la falla”. (Ferracci, P., 2004, p. 31).

“El valor esperado de una sobretensión dependerá del tipo de puesta a tierra del sistema. En los sistemas eléctricos que cuentan con neutro sólidamente aterrizado o con neutro aterrizado por impedancia, la sobretensión no deberá exceder 1.7 veces el voltaje nominal. En sistemas eléctricos aislados o resonantes, generalmente la sobretensión no debe exceder 2 veces el voltaje nominal”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 8).

El tipo de sistema de puesta a tierra deberá ser indicado por el distribuidor.

Las sobretensiones por ferorresonancia consisten en un fenómeno extraño oscilatorio no lineal, frecuentemente muy dañino para los equipos y se produce en un circuito con un capacitor y una inductancia saturable. Las sobretensiones temporales también pueden producirse por defectos del regulador de voltaje de un generador, por mal ajustes del TAP en un transformador, condensadores shunt compensando a baja carga provocan una sobrecompensación de energía reactiva y elevan el voltaje (Ferracci, P., 2004, p. 31).

#### **1.4.7. Caídas momentáneas de tensión (sags de voltaje)**

Las caídas de voltaje o *dips* de la tensión de alimentación son causadas, generalmente por fallas que ocurren dentro de las instalaciones del usuario o en el sistema de distribución pública. Son eventos impredecibles y en gran parte aleatorios.

Según la Norma UNE-EN 50160 (2011) En condiciones normales de operación, el número esperado de caídas de tensión en un año puede ser de hasta unas pocas decenas hasta un máximo de mil. La mayoría de las caídas de tensión tienen una duración inferior a 1 segundo y una profundidad inferior al 60 %. Sin embargo, las bajadas de tensión con mayor profundidad y duración pueden ocurrir aunque con menos frecuencia. En algunas zonas se pueden producir frecuentemente caídas de tensión con profundidades entre el 10 % y el 15% de  $U_n$ , como consecuencia de la conmutación de cargas en las instalaciones de los clientes.

“Los *sags* son disminuciones de corta duración en la tensión de estado estable y algunas veces pueden durar varios segundos, oscilan entre 0.5 a más de 30 ciclos”. (Ramírez, S., Cano, E., 2003, p. 41).

Las caídas momentáneas de tensión pueden tener bajo efecto en cargas sensibles si la caída de tensión no es mayor de 10 a 20 % del valor nominal y pueden tener alto efecto si la caída de tensión supera el 50 % del valor nominal”. (Ramírez, S., Cano, E., 2003, p. 41).

En instalaciones industriales las caídas momentáneas de tensión generalmente son causadas por el arranque o encendido de cargas grandes.

“Las disminuciones momentáneas de tensión y las interrupciones de potencia son los problemas más importantes de calidad de potencia que afectan

a los grandes consumidores industriales y comerciales, siendo más frecuentes las caídas momentáneas de tensión”. (Ramírez, S., Cano, E., 2003, p. 41).

#### **1.4.8. Elevaciones momentáneas de tensión (*swell* de voltaje)**

Una cresta o *swell* se define como el incremento del valor RMS de voltaje o corriente en valores entre 1.1 y 1.8 p.u., algunas veces pueden durar varios segundos, oscilan entre 0.5 a más de 30 ciclos. “La ocurrencia de fallas a tierra en sistemas trifásicos causa que las tensiones de las fases no falladas se eleven de forma temporal con respecto a tierra”. (Avella, J., 2004, p. 10).

“Los incrementos de voltaje de varios ciclos de duración pueden ser ocasionados por la desconexión de cargas grandes o por energizar grandes bancos de capacitores; sin embargo, no llegan a ser consideradas como una sobretensión. Los incrementos de tensión pueden ser aproximadamente de 30 % para sistemas de 4 hilos con múltiples aterrizajes y sobre el 70 % para sistemas de 3 hilos. La duración de las elevaciones momentáneas dependerá en gran parte de la protección del sistema”. (Ramírez, S., Cano, E., 2003, p. 48).

#### **1.4.9. Desequilibrios**

“El desequilibrio en un sistema monofásico se establece como la diferencia en la magnitud de la parte positiva y la parte negativa de una señal eléctrica alterna. Se suele presentar en grandes cargas monofásicas y su principal efecto es la disipación excesiva de calor, sobre todo en máquinas rotativas. El desequilibrio es medido como el cociente entre la parte negativa y positiva de la onda y se expresa en porcentaje”. (Calidad de la energía, s.f.).

“Los desequilibrios trifásicos se deben a un reparto desigual de las cargas en las líneas de un sistema de distribución trifásico, los desequilibrios pueden ser en la tensión o en la corriente. Los sistemas sinusoidales trifásicos están representados por tres vectores de igual módulo y desfasados 120°, cuando la magnitud de los vectores o los ángulos entre fases difieren se produce un desequilibrio”. (Calidad de la energía, s.f.).

La Norma UNE-EN 50160 (2011), establece que: “un desbalance de tensión de alimentación en condiciones normales de operación, durante un periodo de una semana el 95 % de los valores medidos en intervalos de 10 minutos, la componente de secuencia negativa del voltaje de alimentación estará dentro del intervalo de 0 a 2 % de la componente de secuencia positiva. En algunas áreas con instalaciones de usuarios parte monofásicas o bifásicas, se producen desequilibrios de hasta 3 % en el suministro trifásico”.

“En la norma solo se definen valores para el componente de secuencia negativa del voltaje de alimentación, debido a que este componente es el más relevante ante la posible incidencia en los equipos conectados”. (Ferracci, P., 2004, p. 14).

“El grado de desequilibrio se define utilizando el método de las componentes de Fortescue, calculando la razón de la componente inversa  $U_{1i}$  de la fundamental respecto a la componente directa  $U_{1d}$  (o la componente homopolar  $U_{10}$ ) de la fundamental”. según Ferracci, P. (2004):

$$\Delta U_i = \frac{|U_{1i}|}{|U_{1d}|} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

$U_i$ : componente fundamental

$U_{1i}$ : componente inversa

$U_{1d}$ : componente directa

También se puede utilizar la fórmula aproximada:

$$\Delta U_i = \max_i \frac{V_i - V_{med}}{V_{med}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

$U_i$ : componente fundamental

$V_i$ : tensión de la fase  $i$

$V_{med}$ : voltaje promedio

$$V_{med} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

$V_1$ : voltaje fase 1

$V_2$ : voltaje fase 2

$V_3$ : voltaje fase 3

Las normas técnicas del servicio de distribución establecen en el artículo 27 “el índice para evaluar el desbalance de tensión en servicios trifásicos y está determinado sobre la base de comparación de los valores eficaces RMS de tensión de cada fase, medidos en el punto de entrega y registrado en intervalos de medición de 15 minutos”. (CNEE, 1999, p. 19).

$$\Delta DTD(\%) = \frac{3 \cdot (V_{max} - V_{min})}{V_a + V_b + V_c} * 100 \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

DTD: porcentaje de desbalance de tensión

$V_{max}$ : voltaje máximo

$V_{min}$ : voltaje mínimo

$V_a$ : voltaje fase a

$V_b$ : voltaje fase b

$V_c$ : voltaje fase c

“En el artículo 28 de las normas técnicas del servicio de distribución se establecen las tolerancias para el desbalance de tensión. La tabla 4 indica que la tolerancia es 3 % para servicios en baja y media tensión y 1 % para alta tensión”. (CNEE, 1999, p. 19).

Tabla IV. **Tolerancia para el desbalance de tensión**

<b>NIVEL DE TENSIÓN</b>	<b>DESBALANCE DE TENSIÓN <math>\Delta DTD</math> (%)</b>
BAJA Y MEDIA	3
ALTA	1

Fuente: CNEE, 1999, p. 19.

“Los desequilibrios en la tensión se originan por un reparto desbalanceado de las cargas en las fases de alimentación de la instalación eléctrica. En las instalaciones con presencia de armónicas, a pesar que el sistema trifásico se encuentre equilibrado puede circular corriente por el neutro”. (Calidad de la energía, s.f.).

“Las normas técnicas de calidad del servicio de transporte y sanciones establecen en el artículo 31 el índice para evaluar el desbalance de corriente y está determinado sobre la base de comparación de los valores de corriente en cada fase, medidos en el punto de entrega y registrado en intervalos de medición de 15 minutos”. (CNEE, 1999, p. 20).

$$\Delta DIP(\%) = \frac{3 \cdot (I_{mp})}{I_a + I_b + I_c} * 100 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

DIP: porcentaje de desbalance de corriente

$I_{mp}$ : máxima desviación de corriente de cualquiera de las fases  
respecto al promedio

$I_a$ : corriente fase a

$I_b$ : corriente fase b

$I_c$ : corriente fase c

“Donde  $I_{mp}$  = máxima desviación de corriente de cualquiera de las fases respecto al promedio”. (CNEE, 1999, p. 12).

“En el artículo 32 de las normas técnicas de calidad del servicio de transporte y sanciones se establece una tolerancia de diez por ciento (10%) para el desbalance de corriente”. (CNEE, 1999, p. 12).

“Los desequilibrios de corriente se producen cuando la intensidad que circula por las tres fases no es igual, produciendo una circulación de corriente por el neutro. El resultado es un sobrecalentamiento de equipos, cables y protecciones. El desequilibrio de corriente no debe superar el 10 %”. (Calidad de la energía, s.f.).

En la práctica es aceptable una tasa de desequilibrio de voltaje de 1 % durante un largo período de tiempo y hasta 1.5 % durante unos minutos. Ante un desequilibrio de tensión un motor asíncrono recibe un par invertido que produce vibraciones y sobrecalentamiento (Ferracci, P., 2004, p. 14).



#### 1.4.10. Armónicos

“Una perturbación armónica es una deformación de la onda respecto a la onda sinusoidal pura. Los armónicos son voltajes o corrientes con frecuencia que es múltiplo entero par o impar de la frecuencia fundamental (50/60 Hz). Se dice que existe distorsión armónica cuando la onda sinusoidal teóricamente pura que proviene de las centrales eléctricas, sufre deformaciones en las redes de alimentación de los usuarios finales”. (Leal, G., 2008, p. 2).

Para cuantificar el grado de deformación de una onda sinusoidal se debe recurrir a un análisis en el dominio de frecuencia. “El análisis de armónicos se realiza utilizando el método de la transformada de Fourier, el cual consiste en un algoritmo de cálculo que proporciona los contenidos de las diferentes ondas sinusoidales puras que componen la onda deformada. La teoría de Fourier describe como una onda periódica puede descomponerse en la suma de señales periódicas de frecuencia que son múltiplos enteros de la fundamental”. (Calidad de la energía, s.f.).

“Los armónicos están designados por un orden, el cual representa un número que resulta de la relación entre su propia frecuencia y el de la componente fundamental. Los contenidos de armónicos de tensión que constituyen una onda deformada se expresan en porcentaje respecto a la componente fundamental de frecuencia y se calcula con la siguiente relación”. (Calidad de la energía, s.f.):

$$U_n(\%) = \frac{U_n}{U_1} * 100 \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

$U_n$ : componente armónica grado n

$U_1$ : componente fundamental

$U_n(\%)$ : porcentaje de distorsión armónica de grado  $n$

“ $U_n$  representa la amplitud del armónico de orden  $n$  y  $U_1$  representa la amplitud de la componente fundamental de la onda de tensión” .(UNE-EN 50160, 2011).

La Norma UNE-EN 50160 (2011) establece que en condiciones normales de operación, durante un periodo de una semana el 95 % de los registros medidos en intervalos de 10 minutos, los valores RMS de cada armónico individual de voltaje, debe ser menor o igual a que los valores indicados en la tabla V.

Tabla V. Límite de armónicos de tensión

Armónicos de orden impar				Armónicos de orden par	
No son múltiplo de 3		Múltiplo de 3			
Orden	$U_h$ [%]	orden	$U_h$ [%]	orden	$U_h$ [%]
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 a 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Fuente: UNE-EN 50160:2011, 2011, p. 9.

No se presentan valores para armónicos de orden superior a 25, ya que usualmente son despreciables, pero son bastante impredecibles debido a efectos de resonancia.

“La distorsión armónica total de tensión THDV es la relación del valor eficaz de la suma de todas las componentes armónicas de tensión ( $U_n$ ) hasta un orden especificado ( $h$ ), respecto al valor eficaz de la componente fundamental  $U_1$ ”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 9).

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^h \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

- THD: distorsión armónica total
- $U_n$ : componente armónica grado  $n$
- $U_1$ : componente fundamental

Según la UNE-EN 50160 (2011), “la tasa de distorsión armónica total de tensión suministrada THD, comprendidos todos los armónicos hasta el orden 40, no debe sobrepasar el 8%”.

“Las normas técnicas del servicio de distribución establecen en el artículo 31 el índice dado por la distorsión armónica de la tensión, expresado en porcentaje, medido en el punto de entrega y registrado en intervalos de medición de 10 minutos”. (CNEE, 1999, p. 21).

$$DATT(\%) = \sqrt{\sum \frac{V_{i2}}{V_{12}} * 100} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

- DATT: distorsión armónica total de tensión
- $V_i$ : componente de tensión de la armónica de orden  $i$
- $V_1$ : componente de tensión de la frecuencia fundamental

$$DAIT(\%) = \frac{V_i}{V_1} * 100 \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

DAIT: distorsión armónica individual de tensión

$V_i$ : componente de tensión de la armónica de orden  $i$

$V_1$ : componente de tensión de la frecuencia fundamental

“En el artículo 32 de las normas técnicas del servicio de distribución se establecen las tolerancias para la distorsión armónica de tensión” (CNEE, 1999, p. 21).

Tabla VI. Tolerancias para distorsión armónica de tensión

Orden de la armónica (n)	Distorsión armónica individual de tensión DAIT (%)	
	Baja y media tensión $\leq 60$ kV	Alta tensión $60$ kV $\leq V \leq 230$ kV
<b>Impares no múltiplos de 3</b>		
5	6	2
7	5	2
11	3.5	1.5
13	3	1.5
17	2	1
19	1.5	1
23	1.5	0.7
25	1.5	0.7
> 25	$0.2 + 1.3*(25/n)$	$0.1 + 0.6*(25/n)$
<b>Impares múltiplos de 3</b>		
3	5	2
9	1.5	1
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
> 21	0.2	0.2
<b>Pares</b>		
2	2	2

4	1	1
6	0.5	0.5
8	0.5	0.4
10	0.5	0.4
12	0.2	0.2
> 12	0.2	0.2
<b>Distorsión armónica total de tensión DATT (%)</b>	<b>8</b>	<b>3</b>

Fuente: CNEE, 1999, p. 22.

“Las normas técnicas del servicio de distribución establecen en el artículo 41 el índice dado por la distorsión armónica de la corriente, expresado en porcentaje, medido en el punto de entrega y registrado en intervalos de medición de 10 minutos”. (CNEE, 1999, p. 26).

$$DATI(\%) = \sqrt{\sum \frac{I_{i2}}{I_{12}} * 100} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

DATI: distorsión armónica total de corriente

$I_i$ : componente de corriente de la armónica de orden  $i$

$I_1$ : componente de corriente de la frecuencia fundamental

$$DAII(\%) = \frac{I_i}{I_1} * 100 \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

DAII: distorsión armónica individual de tensión

$I_i$ : componente de corriente de la armónica de orden  $i$

$I_1$ : componente de corriente de la frecuencia fundamental

“En el artículo 32 de las normas técnicas del servicio de distribución se establecen las tolerancias para la distorsión armónica de corriente”. (CNEE, 1999, p. 26).

Tabla VII. **Tolerancias para la distorsión armónica de la corriente de carga**

Orden de la armónica (n)	$P \leq 10 \text{ kW}$ $V \leq 1 \text{ kV}$	$P > 10 \text{ kW}$ $1 \text{ kV} < V \leq 60 \text{ kV}$	$P > 50 \text{ kW}$ $V > 60 \text{ kV}$
	Intensidad armónica máxima (amperios)	Distorsión armónica individual de corriente DAII (%)	
<b>Impares no múltiplos de 3</b>			
5	2.28	12	6
7	1.54	8.5	5.1
11	0.66	4.3	2.9
13	0.42	3	2.2
17	0.26	2.7	1.8
19	0.24	1.9	1.7
23	0.20	1.6	1.1
25	0.18	1.6	1.1
> 25	4.5/n	$0.2 + 0.8*(25/n)$	0.4
<b>Impares múltiplos de 3</b>			
3	4.60	16.6	7.5
9	0.80	2.2	2.2
15	0.30	0.6	0.8
21	0.21	0.4	0.4
> 21	4.5/n	0.3	0.4
<b>Pares</b>			
2	2.16	10	10
4	0.86	2.5	3.8
6	0.60	1	1.5
8	0.46	0.8	0.5
10	0.37	0.8	0.5
12	0.31	0.4	0.5
> 12	3.68/n	0.3	0.5
<b>Distorsión armónica total</b>	-	<b>20</b>	<b>12</b>

<b>de tensión DATT (%)</b>			
--------------------------------	--	--	--

Fuente: CNEE, 1999, p. 26.

“Los armónicos impares están presentes en las instalaciones eléctricas industriales y edificios comerciales. Los armónicos pares solo se producen cuando existe asimetría en la señal debido a la componente continua. Los armónicos pueden ser de secuencia positiva, negativa o nula y afecta principalmente a motores asíncronos” .(Calidad de la energía, s.f.):

- Armónicos de secuencia positiva: tienden a hacer girar los motores en el mismo sentido que la componente fundamental, generando sobre corrientes que producen sobrecalentamiento del motor reduciendo su vida útil. Tienen influencia directa en el deterioro del aislamiento en los devanados incrementando el riesgo de avería. Son responsables de calentamiento en cables, motores, transformadores, capacitores, etc.
- Armónicos de secuencia negativa: hacen girar el motor en sentido contrario, frenando el motor provocando calentamientos además de reducir la vida útil de los ejes y engranajes del motor.
- Armónicos de secuencia cero: son conocidos como homopolares, no existe desfase angular entre las fases RST, no presentan efectos sobre el giro del motor, sin embargo estos componentes se suman en el cable neutro. También son conocidos como armónicos TRIPLE-N (triplen) por ser múltiplos enteros de 3.

Las instalaciones eléctricas con gran número de equipos electrónicos, sobre todo de equipos informáticos, cuenta con grandes proporciones de armónicos TREIPLE-N, sobre todo del tercero y el noveno. En este tipo de instalaciones la sobrecarga de corriente de neutro puede ser muy grave, llegando a valores de hasta 1.5 a 2 veces la intensidad de cada fase (Calidad de la energía, s.f.).

Generalmente, las instalaciones eléctricas se diseñan con secciones menores para el conductor neutro, suponiendo ahorro, sin embargo el presente estudio demostrará que esto no es recomendable debido a presencia de armónicos.

“Los receptores industriales como lo son los rectificadores de cargadores trifásicos (convertidores de corriente alterna a corriente continua como diodos, tiristores, triac, etc.), generan armónicos de orden 5, 7, 11, 13, 17, 19, 25. Los variadores de velocidad también generan este orden de armónicos y producen corrientes de pico elevadas e inestables, debido a los constantes arranques y paros”. (Calidad de la energía, s.f.).

“Los equipos de soldadura eléctrica son cargas monofásicas con consumos por periodos cortos, intervalos entre 20 a 50 ciclos. Cuando la carga representa un consumo inestable, tiene mayor impacto solo sobre una fase. Los equipos de soldadura tienen un contenido alto de distorsión armónica de orden 3, en menor porcentaje de orden 5, 7 y 9. En este grupo incluimos los hornos de arco, que además de producir altos contenidos de distorsión armónica son responsables de fluctuaciones de tensión que dan origen al *flicker*”. (Calidad de la energía, s.f.).

“Las fuentes de alimentación monofásica como equipos electrónicos, ordenadores, instalaciones con equipo de oficina, impresoras, fotocopiadoras producen un alto contenido de armónicos en la red y las corrientes son reinyectadas aguas arriba de la instalación afectando a todos los usuarios. Este tipo de cargas generan armónicos de orden 3 y sus múltiplos, el tercer armónico tiene la propiedad de ser el que más empeora la calidad de tensión en la fuente. También podemos incluir en este grupo la iluminación fluorescente, presentando



un efecto capacitivo frente a los armónicos con mayor probabilidad de destrucción ante un alto contenido de armónicos”. (Calidad de la energía, s.f.).

Según Calidad de la energía (s.f.), los principales efectos de los armónicos son:

- Calentamientos: conductores activos, conductor de neutro y equipos. El calentamiento se presenta en los devanados de motores, transformadores, conductores y el hilo neutro. El efecto piel consiste en una superficie de circulación de corriente alterna por un conductor el cual depende de la frecuencia. A mayor frecuencia la corriente se concentra en su mayoría en la superficie externa del conductor, desaprovechando parte de la sección útil e incrementando la resistencia del cable y por ende el calentamiento. El calentamiento produce una aceleración en el deterioro del aislamiento, llegando a generar cortocircuitos, incendios, daños, etc.
- Las señales de armónicos pueden llegar a tener un valor de corriente eficaz muy pequeño y llegar a alcanzar valores pico muy elevado, provocando actuaciones erróneas de los equipos de protección.
- Resonancia: un capacitor en paralelo a una inductancia pueden formar un circuito resonante, capaz de amplificar las señales a una determinada frecuencia. Cuando una instalación es de carácter inductivo, compensamos la energía reactiva requerida colocando capacitores, con lo cual formamos un equipo resonante que provoca que ciertos armónicos se vean amplificados. Al instalar un capacitor es necesario realizar un estudio previo de armónicos.
- Vibración y acoplamiento: altas frecuencias armónicas y las subidas/bajadas rápidas de señales distorsionadas provocan interferencias electromagnéticas que pueden producir vibraciones en tableros, cables, transformadores, acoples y diafonías en redes de telecomunicaciones.

- Deterioros de la onda de tensión: cuando existe alto contenido de armónicos en la instalación eléctrica, la corriente distorsionada que generan las cargas produce una deformación de la onda de tensión, llegando a presentar efectos de achatamiento o aplanamiento en la parte superior e inferior de la onda. El aplanamiento provoca que no se alcancen los valores pico adecuado para el funcionamiento de puentes de diodos de fuentes de alimentación, convertidores de frecuencia, sobrefuerzo en diodos rectificadores, paradas inesperadas de variadores de velocidad, parpadeo de iluminación, reinicio de ordenadores, etc.
- Presencia de tensión entre neutro y tierra: la circulación de corriente por el neutro genera caídas de tensión en los conductores activos, con lo cual aparecen tensiones entre neutro y tierra perjudicando la calidad de la red y puede tener efectos graves en los equipos.

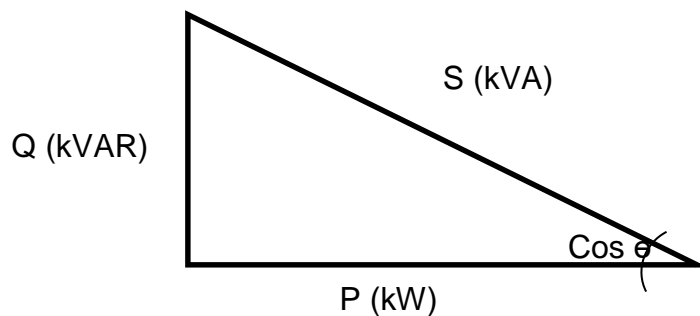
Las consecuencias de los armónicos dependerán del aumento en la tensión y la intensidad, de sus valores de cresta y el valor eficaz y tienen impacto en: a) deterioro del rendimiento energético de la instalación, b) sobredimensionamiento de equipos, c) pérdida de productividad por envejecimiento acelerado de equipos y daños. indica Ferracci, P. (2004).

#### **1.4.11. Factor de potencia**

“El factor de potencia es un indicador de la eficiencia con la que se está utilizando la energía eléctrica para producir trabajo útil. Representa el porcentaje de potencia entregada por el distribuidor de energía eléctrica que puede convertirse en trabajo útil. El factor de potencia se define como la relación entre la potencia activa kW y la potencia aparente kVA, y oscila en un rango entre 0 y 1”. (Ramírez, S., Cano, E., 2003, p. 5).

“Frecuentemente se utilizan términos para de factor de potencia en adelanto y en atraso, dichos términos tienen relación al flujo de la potencia real y reactiva. Para el presente estudio utilizaremos únicamente el término de factor de potencia en atraso, debido a que las cargas estudiadas demandan energía reactiva kVAR, cuando se habla de un generador es posible suministrar energía reactiva”. (Ramírez, S., Cano, E., 2003, p. 51).

Figura 1. **Triángulo de potencias**



Fuente: elaboración propia.

$$\cos\theta = FP = \frac{P}{S} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde:

FP: factor de potencia

P: potencia activa

S: potencia aparente

“El factor de potencia puede optimizar técnico y económicamente la instalación eléctrica, evita sobredimensionamiento de equipos y mejora su utilización. Mantener un factor de potencia por encima de 0.9 no es necesario sobredimensionar los cables, reduce las pérdidas en las líneas,

disminuye la caída de tensión, aumenta la potencia disponible en el lado secundario de un transformador”. (Ferracci, P., 2004, p. 33).

“La compensación puede ser global, parcial (por áreas o sectores) o individual; en principio la compensación ideal es la que permite producir energía reactiva en el lugar mismo donde se consume y en cantidades que se ajustan a la demanda”. (Vallant, F., Delaballe, J., 2000, p. 21).

- Compensación global: el capacitor se conecta en la barra principal de la instalación. Ventajas: elimina penalizaciones, disminuye la potencia aparente y mejora la capacidad del banco de transformación. Desventajas: la energía reactiva está presente en toda la instalación y las pérdidas por efecto joule aguas abajo no son reducidos.
- Compensación parcial: el capacitor se conecta en un sub-tablero de distribución para un área específica. Ventajas: elimina penalizaciones, mejora la capacidad del banco de transformación y optimiza parte de la red ya que la corriente reactiva no circula en toda la instalación. Desventajas: la energía reactiva está presente en todos los equipos aguas abajo del equipo de compensación y existe riesgo de sobrecompensación por variaciones de carga importantes (se puede eliminar con compensación automática).
- Compensación individual: el capacitor está conectado directamente a los bornes del equipo. En el caso de motores para potencia reactiva representa casi el 25% de la potencia activa. Ventajas: elimina penalizaciones, mejora la capacidad del banco de transformación y reduce el sobredimensionamiento de cables y pérdidas por efecto joule. Desventajas: existe riesgo de sobrecompensación por variaciones de carga importantes (se puede eliminar con compensación automática). (Vallant, F., Delaballe, J., 2000, p. 21).

“Las normas técnicas del servicio de distribución establecen en el artículo 49 el valor mínimo admitido para el factor de potencia, medido en el punto de entrega y registrado en intervalos de medición de 15 minutos.

- Usuarios con potencias de hasta 11 kW = 0.85
- Usuarios con potencias superiores a 11 kW = 0.90”. (CNEE, 1999, p. 30).

### **1.5. Mantenimiento y confiabilidad**

“El objetivo del mantenimiento es asegurar la competitividad de la empresa, en ese sentido es necesario aumentar la confiabilidad de los equipos, es decir disminuir la cantidad de fallas que generan interrupciones no programadas, de tal forma que se pueda obtener la disponibilidad requerida por operaciones”. (Altmann, C., 2017, p. 1).

La definición exacta de la función deseada en el activo, determinará los objetivos de mantenimiento en cuanto a confiabilidad y disponibilidad”. Consecuentemente se logrará determinar las estrategias de mantenimiento a aplicar para alcanzar dichos objetivos. La calidad de energía eléctrica puede ser introducida en el plan estratégico de mantenimiento como parte de un plan de eficiencia energética, ya que forma parte de los costos operativos y mantenimiento como generador de rentabilidad de la empresa. Igual que cualquier modo de falla la ineficiencia por mala calidad de energía eléctrica puede ser debido a cualquiera de las siguientes causas.

- Desgaste y deterioro
- Errores humanos en la ejecución de tareas de mantenimiento y/o en la operación de equipos

- Problemas de diseño”. (Altmann, C., 2017, p. 1)

El plan de mantenimiento debe diseñarse tomando en cuenta el impacto de una falla en:

- Operación
- Calidad
- Seguridad de las personas e instalaciones
- Medioambiente

“Muchas tareas básicas de complejidad menor y de bajo costo de implementación pueden tener gran incidencia en la calidad de energía eléctrica y por ende en la eficiencia energética, generando grandes reducciones en el consumo de energía”. (Altmann, C., 2017, p. 2).

La gestión integral de mantenimiento (GIM) busca: “Garantizarle al cliente interno y externo la disponibilidad de los activos fijos cuando lo requieran con confiabilidad y seguridad total. Las industrias necesitan operar con las mejores condiciones tecnológicas para producir bienes o servicios que satisfagan las necesidades o requerimientos de los usuarios con altos niveles de calidad, en el momento oportuno, al menor costo posible, con los mayores índices de productividad, rentabilidad y competitividad”. (Palencia, O., s.f.).

### **1.5.1. Mantenimiento basado en condición**

“Se lleva a cabo con base en el estado determinado de los activos, el cual se establece vigilando los parámetros clave de operación, cuyos valores se ven afectados por su estado real. Para medir estas condiciones se utilizan técnicas de análisis y diagnóstico como calidad de energía y técnicas de ensayos no destructivos como la termografía”. (Palencia, O., s.f.).

“Por monitoreo se entiende desde sus inicios, como la medición de una variable física que se considera representativa en la condición de la máquina y su comparación con valores que indican si la máquina está en buen estado o deteriorada. Con los avances en automatización la palabra monitoreo se ha extendido a la adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos”. (Ferracci, P., 2004, p. 31).

### **1.5.2. Mantenimiento correctivo**

Se reparan todos los defectos que han ocurrido o que se conoce que han ocurrido.

El mantenimiento correctivo es el más fácil de implementar, sin embargo tiene tres desventajas básicas.

- Permitir un fallo en un componente de una máquina y consecuentemente los costos se elevan.
- El fallo puede ocurrir en una hora o lugar de tal forma que no estará disponible los repuestos necesarios para la reparación.

- Las plantas no pueden ser paradas de un momento a otro ya que proveen un servicio esencial, manejan productos como alimentos o metales fundidos, los cuales se deterioran o se solidifican si la planta se detiene de forma inesperada”. según el Manual del ingeniero de mantenimiento (s.f.)

### **1.5.3. Mantenimiento preventivo**

“Consiste en la realización de rondas de supervisión o de sustitución en periodos fijos. El mantenimiento preventivo realizado a intervalos de tiempo regulares es un avance comparado con el mantenimiento correctivo, respecto a la prevención de fallos inesperados. Sin embargo, no se considera el método óptimo para obtener máxima seguridad y confiabilidad de la planta”. según el Manual del ingeniero de mantenimiento (s.f.):

“Principalmente no se considera óptimo debido a que las fallas no se producen a intervalos regulares de tiempo, sino se producen a intervalos de tiempo de acuerdo a una distribución. Desde este punto se elige si el intervalo de tiempo entre intervenciones es corto, que resulta seguro pero muy costoso; un intervalo de intervenciones largo, es más barato pero se incrementa el riesgo de avería por las fallas que ocurran durante el intervalo”. (Manual del ingeniero de mantenimiento, s.f.).

“El mantenimiento preventivo presenta tres desventajas básicas”:

- “Los fallos de igual forma ocurren durante los intervalos de reparación”.
- “Durante el paro muchos componentes en buenas condiciones se desmontarán, inspeccionarán o reemplazaran innecesariamente. Existe la



posibilidad de error humano en el re ensamble, por tanto la condición final de la máquina puede ser peor que antes de la intervención”.

- “En una reparación general, se requiere examinar un gran número de elementos, lo que conlleva a tomar un tiempo considerable y puede resultar en altas pérdidas de producción”.

#### **1.5.4. Mantenimiento funcional**

“Consiste en la búsqueda de fallos no evidentes, fallos que normalmente afectan a los sistemas de protección y consiste en la verificación periódica de estos elementos” (Manual del ingeniero de mantenimiento, s.f.).

#### **1.5.5. Mantenimiento predictivo**

“Consiste en analizar parámetros de funcionamiento cuya evolución permite detectar un fallo antes que este tenga consecuencias graves. En general, el mantenimiento predictivo consiste en estudiar la evolución temporal de ciertos parámetros y asociarlos a la evolución de fallos para determinar en qué periodo de tiempo una falla tomará relevancia suficiente para planificar intervenciones que eviten consecuencias graves para un equipo determinado” (Manual del ingeniero de mantenimiento, s.f.).

“La respuesta aparente para no alterar el funcionamiento normal de la planta y contar con programas de inspección periódica o continua es realizar un mantenimiento basado en la condición o estado de la máquina. Este tipo de mantenimiento permite realizar mediciones de síntomas o parámetros a intervalos fijos y se conoce como monitoreo de condición” (Manual del ingeniero de mantenimiento, s.f.).

El principio del mantenimiento predictivo se basa en establecer los procedimientos y acciones necesarias para que la intervención de la máquina se realice únicamente cuando las mediciones indican que es necesario. Definiremos el monitoreo de condición de a máquina como el control del funcionamiento y el análisis de las mediciones obtenidas tendientes a detectar fallas incipientes o deterioro. Ayuda a diagnosticar los fallos y a predecir cuánto tiempo podría funcionar una máquina en forma segura.

Las principales ventajas del mantenimiento predictivo son:

- Reduce el tiempo de parada al conocer el elemento que fallo.
- Permite seguir la evolución de un defecto en el tiempo.
- Optimiza la gestión del personal de mantenimiento.
- Requiere una plantilla de mantenimiento más reducida.
- La verificación de la maquinaria, realizado en forma periódica o de forma casual, permite registrar un histórico del comportamiento mecánico y operacional.
- Conocer con exactitud el tiempo límite de actuación que no implique la aparición de fallos imprevistos.
- Toma de decisiones de paro de una línea de máquinas en momentos críticos.
- Facilita el análisis de averías.

- Permite realizar análisis estadístico del sistema. (Manual del ingeniero de mantenimiento, s.f.).

### **1.5.6. Mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC)**

“Es una metodología utilizada para determinar sistemáticamente, que debe hacerse para asegurar que los activos físicos continúen haciendo la función requerida por el usuario. Se considera el MCC como una herramienta de gestión del mantenimiento que permitirá maximizar la confiabilidad operacional de los activos, a partir de la determinación de los requerimientos reales de mantenimiento”. (Manual del ingeniero de mantenimiento, s.f.).

### **1.5.7. Herramientas clave del MCC**

- Análisis de modos y efectos de falla AMFE: herramienta que permite identificar los efectos o consecuencias de los modos de fallo de cada activo.
- Árbol lógico de decisión: herramientas que permiten seleccionar de forma óptima las actividades de mantenimiento según la filosofía del MCC.
- Fallos funcionales: incapacidad de un elemento o componente de un equipo para satisfacer un estándar de funcionamiento deseado. Una vez que las funciones y los estándares de funcionamiento de cada equipo se haya definido.
- Modos de fallo: en este paso es importante identificar cuál es la causa origen de cada tipo de fallo.
- Efectos de fallo: se deben registrar los efectos de fallo pensando en que pasaría si ocurriera un determinado modo de fallo. (Manual del Ingeniero de Mantenimiento, s.f.).

### **1.5.8. Análisis de causa raíz**

“Es una herramienta utilizada para identificar las causas que originan los fallos o problemas, los cuales deben ser corregidos para evitar la ocurrencia de los mismos. Es una técnica de identificación de causas fundamentales que conducen a fallos recurrentes, las causas identificadas han de ser lógicas y el análisis deductivo identificará la relación causal que conduce el equipo, sistema o componente a un fallo”. (Peña, J., Mercado, V., 2016).

De acuerdo a Peña, J., Mercado, V., 2016, la aplicación del análisis causa raíz consta de cuatro etapas básicas:

- Definición del problema: identifica el problema o situación que se desea solucionar.
- Análisis del problema: las fases preliminares y de desarrollo de la herramienta. Se entrena al personal para aplicar las herramientas ACR en la solución del problema. El ACR recolecta los datos del fallo, ordena el análisis, analiza los datos (utilizar árbol de fallas).
- Identificar soluciones efectivas: ligada a los hallazgos y conclusiones obtenidas luego de aplicar el ACR, donde ya se localizan las causas de fondo y se tienen identificadas las correcciones que deben realizarse para asegurar que no ocurran fallos debido a la presencia de la causa que lo origina.
- Implementar soluciones.

### **1.5.9. Mantenimiento productivo total (MPT)**

“La filosofía del MPT crea una misión corporativa para maximizar la efectividad productiva total, utilizando un enfoque en el área productiva de una empresa. La metodología crea una organización que previene todo tipo de pérdidas y asegura, cero defecto y cero fallas, durante la vida útil de los sistemas productivos”. (Manual del ingeniero de mantenimiento, s.f.).

Filosóficamente, el MPT fortalece algunos aspectos valiosos relacionados con la manufactura de calidad total o gerencia de calidad total, como:

- Compromiso total de los altos mandos.
- Personal con suficiente delegación de autoridad para implementar cambios.
- Debe contar con programación de largo plazo para dar sostenibilidad.

Deberá influir en un cambio de mentalidad y actitud del personal. (Manual del ingeniero de mantenimiento, s.f.):

### **1.6. Técnicas de monitoreo de condición**

“El mantenimiento predictivo, se enfoca en detectar los efectos o síntomas de fallas, utilizando técnicas para monitorear el performance de un equipo, a través de la medida y seguimiento de determinados parámetros físicos. Dentro del plan de mantenimiento, se deben considerar tareas de monitoreo de distintas condiciones y/o parámetros operativos de las máquinas e instalaciones, para poder determinar cuando existe un desvío”. (Altmann, C., 2017, p. 4).

“Para el presente estudio se utiliza como herramientas de monitoreo de condición del desempeño de equipos, a través de la medida y seguimiento de parámetros físicos como:

- Temperatura: se utiliza la termografía.
- Parámetros eléctricos de voltaje, corriente y forma de onda: se utiliza el analizador de redes trifásicas”. (Altmann, C., 2017, p. 4).

### **1.6.1. Termografía**

“Los infrarrojos se encuentran en un punto medio entre el espectro visible y las microondas del espectro electromagnético. La fuente principal de radiación de infrarrojos es el calor o la radiación térmica. Cualquier objeto con una temperatura superior al cero absoluto emite radiación en la región infrarroja”. (FLIR, 2011, p. 7).

“La termografía de infrarrojos es el arte de transformar una imagen de infrarrojos en una imagen radiométrica que permita leer los valores de temperatura. De acuerdo a la definición expuesta, cada pixel de la imagen radiométrica corresponde a una medición de temperatura, por lo cual se considera a la termografía como la técnica idónea para mantenimiento predictivo”. (FLIR, 2011, p. 7).

“Las imágenes térmicas de motores eléctricos muestran sus condiciones de funcionamiento a través de la temperatura de la superficie. Las cámaras termográficas tienen la capacidad de capturar temperaturas en varios puntos al mismo tiempo, los principales componentes que pueden ser inspeccionados en un motor son:

- Carcaza del motor
- Acoplamiento del eje
- Rodamientos del motor
- Rodamientos del eje
- Tableros de control y conexiones”. (Fluke, 2005, p. 1).

“Los motores están diseñados para funcionar a una temperatura interna determinada, el resto de elementos no deben presentar temperaturas superiores a las del alojamiento del motor, diseñados para operar a una temperatura ambiente que no supere los 40 °C. Los fabricantes de motores y equipos eléctricos indican que un aumento de 10 °C sobre la temperatura indicada reduce a la mitad la vida útil del motor”. (Fluke, 2005, p. 1).

“Un desequilibrio eléctrico puede deberse a varias razones: problemas en la alimentación eléctrica, baja tensión en una de las fases, ruptura de aislamiento de las bobinas de motor, entre otras. Los desequilibrios de tensión pueden deteriorar las conexiones reduciendo la cantidad de tensión suministrada a determinados equipos. Los motores y otras cargas que se encuentran funcionando con una tensión de alimentación desequilibrada produce mayores demandas de corriente y pueden llegar a fundir fusibles”. (Fluke, 2005, p. 2).

“La termografía permitirá observar la temperatura superficial exterior en motores, por medio de la cual se podrá obtener una estimación de la temperatura interna. Adicionalmente, por medio de la termografía se detectarán temperaturas

elevadas en puntos de conexión, tableros eléctricos, variadores de frecuencia; en los cuales la temperatura sea superior para la cual están diseñados. Se evidencian las sobrecargas, armónicos y desequilibrios en los puntos que presenten una mayor temperatura respecto a las otras fases del circuito trifásico”. (FLIR, 2011, p. 4).

“Las cámaras termográficas utilizadas en aplicaciones para mantenimiento predictivo son consideradas como una potente herramienta no invasiva para la supervisión y diagnóstico de componentes, instalaciones eléctricas y mecánicas. La termografía permite identificar problemas en una fase temprana, de tal forma que se puedan corregir y documentar antes que sean graves y los costos de reparación se incrementen”. (FLIR, 2011, p. 5).

#### **1.6.1.1. Resolución**

“Una cámara con 640 X 480 pixeles tiene 307,200 puntos de medición en una imagen, cuatro veces más que una cámara con 320 X 240 pixeles que tiene 76,800 puntos de medición. La cámara con mayor resolución mejora la precisión de la medición y la calidad de la imagen”. (FLIR, 2011, p. 30).

#### **1.6.1.2. Sensibilidad térmica**

“Define la magnitud de una diferencia de temperatura que la cámara puede detectar, a mayor sensibilidad térmica menor será la diferencia de temperatura mínima que la cámara puede captar y mostrar. La cámara utilizada para el estudio cuenta con sensibilidad térmica de 0.03 °C”. (FLIR, 2011, p. 32).



### **1.6.1.3. Precisión**

“Todas las mediciones pueden presentar un error y las cámaras termográficas presentan cierto grado de precisión. El margen de error en el que operará la cámara, la temperatura medida puede variar desde la temperatura real al porcentaje de error o a temperatura absoluta, depende cual sea la mayor. La cámara utilizada para el estudio cumple con el estándar de precisión de  $\pm 2\%/\pm 2^{\circ}\text{C}$ ” (FLIR, 2011, p. 32).

### **1.6.1.4. Conductividad térmica**

“Los materiales poseen distintas propiedades térmicas, estas propiedades dependen del tipo de material y definen la velocidad de calentamiento”. (FLIR, 2011, p. 26).

### **1.6.1.5. Emisividad**

“Es la capacidad que tiene un cuerpo para emitir infrarrojos, al igual que la conductividad térmica depende de las propiedades de los materiales. Es importante definir la emisividad en la cámara, de lo contrario las temperaturas registradas no serán correctas” . (FLIR, 2011, p. 26).

### **1.6.1.6. Reflexión**

“La radiación térmica de algunos materiales reflejan la radiación de la misma forma que un espejo refleja la luz visible. Entre los materiales que reflejan la radiación se encuentran metales no oxidados, sobre todo si ya se han pulido, la reflexión provocará interpretación incorrecta de la termografía”. (FLIR, 2011, p. 27).

### **1.6.2. Registrador de parámetros eléctricos o analizador de redes**

“Durante el desarrollo de auditorías energéticas, es necesario obtener valores puntuales en un instante de tiempo determinado y valores en un periodo de tiempo de los parámetros eléctricos. Los registros de valores en un período de tiempo permiten obtener una trazabilidad e histórico de las variaciones que ocurran durante el periodo de medición”. (Mirla, L., 2015, p. 55).

“El analizador de redes es un instrumento que permite medir, registrar y monitorear los parámetros eléctricos de una instalación, para realizar un análisis posterior de dos datos. El análisis de calidad de energía eléctrica integrado en el mantenimiento predictivo utiliza un conjunto de mediciones que pueden predecir fallos eléctricos en cargas críticas de una industria”. (Fluke, 2011, p. 3).

El analizador de redes cuenta con la capacidad de medir y almacenar los valores de variables que son necesarias para realizar el diagnóstico de las condiciones de funcionamiento de las instalaciones o equipos eléctricos puntuales. Los parámetros más comunes que registra un analizador de redes son:

- Tensiones de fase y tensiones de línea.
- Intensidad de corriente de línea y neutro.
- Potencia activa (kW), reactiva (kVAR) y aparente (kVA).
- Factor de potencia.
- Energía activa (kWh), reactiva (kVARh) y aparente (kVAh).

- Armónicos de corriente y de tensión.
- Presencia de transitorios, huecos u otro tipo de perturbación electromagnética.

“La calidad de energía eléctrica es un indicador del nivel de adecuación de la instalación para soportar y garantizar el funcionamiento fiable de sus cargas. Una perturbación, tal como se menciona en incisos anteriores, puede afectar la tensión, corriente o la frecuencia”. (Fluke, 2011, p. 3).

Es por ello que se presenta la propuesta de utilizar el analizador de redes como instrumento para detectar alertas tempranas, que permitan programar intervenciones correctivas que disminuyan las fallas catastróficas y consecuentemente aumenten la disponibilidad, reduzcan los costos y mejoren el desempeño energético de equipos eléctricos.

“El equipo de medición que se utiliza cuenta con 8 canales independientes, con configuraciones automatizadas para la detección de las conexiones de los circuitos eléctricos a medir. Mide todos los estándares industriales vigentes, incluyendo clase A, IEC 61000-4-7, IEEE 1159, IEEE 519, IEEE 1459, IEC 61000-4-30, entre otros”. (DRANETZ, 2017, p. 8).

### **1.7. Evaluación económica**

A continuación se define el valor presente neto y el periodo de recuperación de la inversión. Los métodos de cálculo se utilizarán como parte de los métodos económico-financieros para evaluar la factibilidad de las inversiones.

### **1.7.1. Valor presente neto VPN**

“Es el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial. El VPN consiste en sumar los flujos descontados en el presente y restar la inversión inicial, que equivale a comparar todas las ganancias esperadas contra todos los desembolsos necesarios para producir esas ganancias, en términos de su valor equivalente en el presente o en el tiempo cero. El VPN permitirá obtener el flujo neto del proyecto de implementación de soluciones en calidad de energía”. (Urbina, G., 2001, p. 213).

### **1.7.2. Período de recuperación de inversión (PRI)**

“Es un instrumento que permite medir el plazo de tiempo que se requiere para que los flujos netos de efectivo de una inversión recuperen su costo o inversión inicial. Se evaluarán los costos iniciales de la implementación de las medidas de mejora en calidad de energía y se calcula el PIR considerando el costo inicial y los costos durante la ejecución del proyecto. Se consideran la depreciación de activos y la utilidad o pérdida respecto al año cero”. (Didier, V., 2010, p. 5).

## **1.8. Sistemas de gestión de la energía y la calidad, Norma ISO 50001 e ISO 9001**

La Norma Internacional ISO 50001 especifica los requisitos: “para establecer, mantener y mejorar un sistema de gestión de la energía, con el propósito de permitir a una organización contar con un enfoque sistemático para alcanzar la mejora continua en su desempeño energético, incluyendo la eficiencia energética, uso y consumo de la energía”. (p. 1).

“Los fallos inesperados se pueden evitar, tanto en equipos de producción y en los sistemas que funcionan para proveer algún servicio, si se añaden mediciones de calidad de potencia (mediciones PQ) a los procedimientos de mantenimiento. Un estudio publicado por IEEE 493-1997 dice que un sistema eléctrico mal mantenido se le puede atribuir el 49 % de las fallas debido a la falta de un sistema de gestión de mantenimiento”. (Antech, S. A., 2017, p. 3).

De acuerdo a los criterios presentados por Peña, J., Mercado, V. (2016), para disminuir las fallas, aumentar la eficiencia y optimizar el funcionamiento de los sistemas eléctricos, es necesaria una gestión del mantenimiento acorde con los lineamientos de calidad, basados en la Norma ISO 9001. En el presente estudio se proponen indicadores para desarrollar una estrategia de gestión de mantenimiento, utilizando parámetros y definiendo actividades que permitan una planificación y programación ajustada a los requerimientos de confiabilidad y optimización de la energía eléctrica. (p. 99).

#### **1.8.1. Términos y definiciones, Norma ISO 50001**

- Línea base energética: “Referencia cuantitativa que proporciona la base de comparación del desempeño energético. Una línea base energética representa un periodo específico y también es utilizada para calcular ahorros energéticos, como una referencia antes y después de implementar acciones de mejora del desempeño energético” .(Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 2).
- Eficiencia energética: “Proporción u otra relación cuantitativa entre el resultado en términos de desempeño, de servicios, de bienes o de energía y la entrada de energía. Es necesario que, tanto en la entrada como la

salida, se especifiquen claramente en cantidad y calidad y sean medibles”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 2).

- Sistema de gestión de la energía (SGEn): “Conjunto de elementos interrelacionados mutuamente o que interactúan para establecer una política y objetivos energéticos, y los procesos y procedimientos necesarios para alcanzar dichos objetivos”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 3).
- Desempeño energético: “Resultados medibles relacionados con la eficiencia energética, el uso de la energía y el consumo de la energía” .(Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 3).
- Indicador de desempeño energético (IDEn): “Valor cuantitativo o medida del desempeño energético tal como lo defina la organización. Los IDEn pueden expresarse como una medición, un cociente o un modelo más complejo”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 3).
- Política energética: “Declaración por parte de la organización de sus intenciones y dirección globales en relación con su desempeño energético, formalmente expresado por la alta dirección”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 3).
- Uso significativo de la energía: “Uso de la energía que ocasiona un consumo sustancial de energía y/o que ofrece un potencial considerable para la mejora del desempeño energético”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 3).

### **1.8.2. Política energética**

La política energética es: “El impulsor de la implementación y la mejora del SGE, el desempeño energético de la organización dentro de su alcance y límites definidos. La política puede ser una breve declaración que los miembros de la organización pueden comprender fácilmente y aplicar en sus actividades laborales. La difusión de la política energética puede usarse como elemento propulsor para gestionar el comportamiento de la organización”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 3).

“La política energética debe establecer el compromiso de la organización para alcanzar una mejora en el desempeño energético”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 6). La política debe:

- a) Ser apropiada a la naturaleza, magnitud de uso y consumo de energía de la organización.
- b) Incluir un compromiso de mejora continua del desempeño energético.
- c) Incluir un compromiso para asegurar la disponibilidad de información y de recursos necesarios para alcanzar los objetivos y metas.
- d) Incluir un compromiso para cumplir con los requisitos legales aplicables y otros requisitos suscritos por la organización, relacionados con el uso y el consumo de la energía y la eficiencia energética.
- e) Proporcionar el marco de referencia para establecer y revisar los objetivos energéticos y metas energéticas.
- f) Apoyar la adquisición de productos y servicios energéticamente eficientes y el diseño para mejorar el desempeño energético.

- g) Se documente y se comunique a todos los niveles de la organización.
- h) Se revise regularmente y se actualice si es necesario. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 6).

### **1.8.3. Revisión energética**

“El proceso de identificación y evaluación del uso de la energía debería conducir a la organización a definir las áreas de usos significativos de la energía e identificar oportunidades para mejorar el desempeño energético. La actualización de la revisión energética significa la actualización de la información relacionada con el análisis, determinación de la significación y determinación de las oportunidades de mejora del desempeño energético”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 7).

“Una auditoría o evaluación energética comprende una revisión detallada del desempeño energético de una organización, de un proceso o de ambos. Se basa generalmente en una apropiada medición y observación del desempeño energético real”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 8).

La organización debe desarrollar, registrar y mantener una revisión energética. La metodología y el criterio utilizado para desarrollar la revisión energética deben estar documentados. La revisión energética debe:

- a) Analizar el uso y consumo de la energía basándose en mediciones.
- b) Identificar áreas de uso significativo de energía.

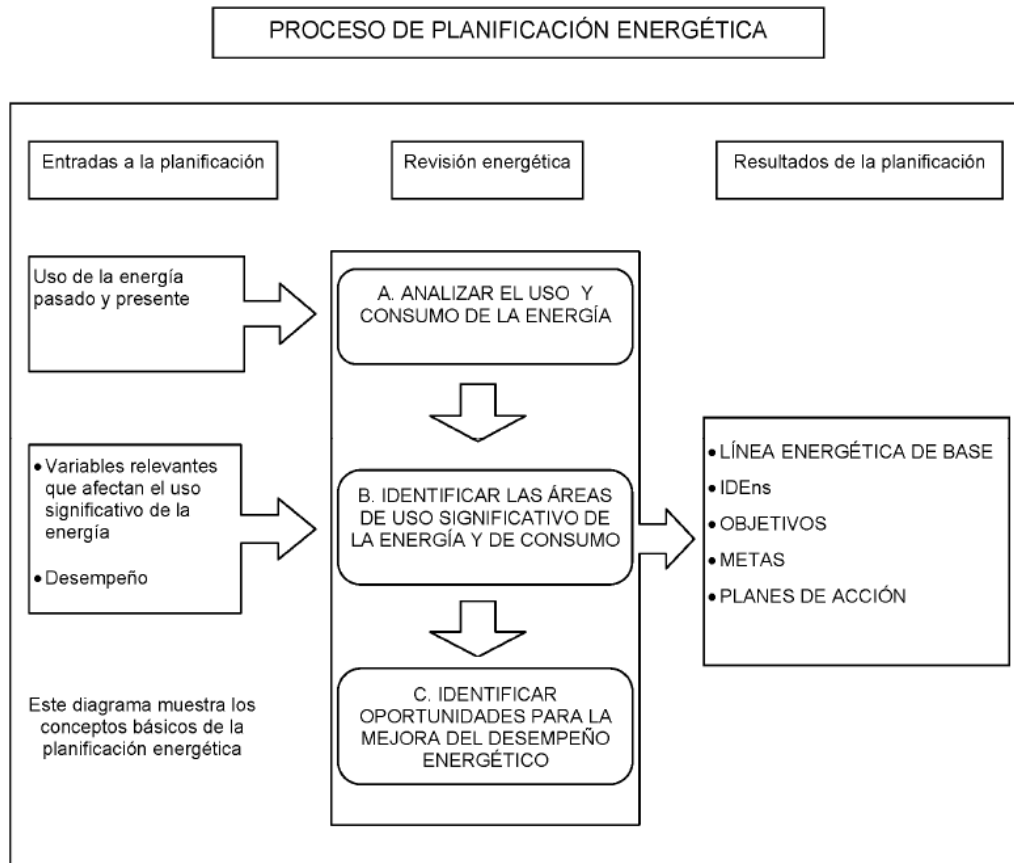


- c) Identificar instalaciones, equipamiento, sistemas, procesos y personal que trabaje para la organización y afecten significativamente el uso y consumo de la energía.
- d) Identificar otras variables pertinentes que afecten los usos significativos de la energía.
- e) Determinar el desempeño energético actual de las instalaciones, equipamiento, sistemas y procesos relacionados con el uso significativo de la energía.
- f) Estimar el uso y consumo futuro de la energía.
- g) Identificar, priorizar y registrar oportunidades para mejorar el desempeño energético. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 8).

#### **1.8.4. Planificación energética**

La figura 2 muestra un diagrama conceptual que pretende ayudar a entender el proceso de planificación energética.

Figura 2. Proceso de planificación energética



Fuente: Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 17.

“El estudio comparativo (*benchmarking*) es el proceso de reunir, analizar y relacionar información del desempeño energético de actividades comparables, con el propósito de evaluar y comparar el desempeño entre entidades”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 17).

### **1.8.5. Línea base energética**

“Un período adecuado para los datos significa que la organización tiene en cuenta los requisitos reglamentarios o las variables que afectan al uso y al consumo de la energía. Las variables pueden incluir clima, estaciones, ciclos de actividades de negocio y otras condiciones. La línea base energética se mantiene y registra como medio para que la organización determine el periodo de mantenimiento de los registros”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 18).

## **2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

“El diagnóstico de calidad de energía es una herramienta que ayuda a identificar y resolver problemas de equipos e instalaciones eléctricas”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 20). Consiste en un procedimiento organizado y sistemático para la resolución del problema. Los pasos que se realizan para la planificación y ejecución del diagnóstico de calidad de energía son:

- Planificación del diagnóstico
- Preparación para el diagnóstico
- Inspección del sitio
- Monitoreando la potencia
- Análisis de datos y monitoreo
- Aplicación de medidas correctivas

### **2.1. Configuración del analizador de calidad de energía**

“Las conexiones de las fuentes de voltaje y corriente deberán realizarse en forma adecuada y segura para evitar accidentes”. (DRANETZ, 2013). Hay que seleccionar el tamaño correcto del transformador de corriente (CT) para obtener resultados precisos en las mediciones de calidad de energía. De igual forma se deberán observar los rangos de las pinzas de voltaje para evitar superar el voltaje máximo del aislamiento.

Las configuraciones de conexión del instrumento tienen que realizarse acorde al tipo de conexión del circuito que será monitoreado y con la secuencia de fases correcta. Las conexiones típicas encontradas en instalaciones

comerciales e industriales usualmente utilizan voltajes de 240 V y 480 V. Los tipos de conexión más comunes son: delta, delta con cuatro hilos (pierna alta) y estrella.

Figura 3. **Configuración del analizador de calidad de energía**

### **Dranetz HDPQ Configuration**

Firmware	V1.3.15
Serial Number	HDPGAKA075
Site/Filename	Industria alimentos
Measured from	11/10/2017 11:40:00
Measured to	12/10/2017 14:00:00
Synchronisation	Standard A
Configuration	3 WIRE / 3 PROBE (DELTA)
Monitoring type	STANDARD PQ IEEE
Nominal voltage	237.1 V
Nominal current	288.7 A
Nominal frequency	60.0 Hz
Anti-aliasing	OFF
Use inverse sequence	No
Using currents	Yes
Characterizer mode	IEEE 1159

Fuente: (DRANETZ, 2017).

Es importante tomar en cuenta que los voltajes de las fases A, B, C y neutro deberán ser conectados en el canal correcto del medidor, y la dirección de la flecha indicará el flujo de corriente que pasa por los transformadores de corriente (CT) de la fuente hacia la carga.

El medidor proporciona un diagrama de fases con el que se podrá verificar si la conexión es la correcta. En los sistemas inductivos la corriente deberá estar en atraso respecto al voltaje y en sistemas capacitivos (muy poco comunes) la corriente deberá estar en adelanto del voltaje.

## 2.2. Auditoría PQ

El propósito de realizar una auditoría de calidad de potencia (auditoría PQ) es para solucionar problemas relacionados con las variables voltaje, corriente, factor de potencia y potencia de una instalación eléctrica industrial. La auditoría PQ se realiza en una industria de alimentos que cuenta con dos líneas de producción con una demanda máxima registrada de 143.5 kW.

La auditoría PQ permitirá determinar el desempeño, identificar las fuentes de interferencia, determinar la calidad de potencia y la idoneidad de la potencia disponible antes de instalar nuevos equipos. Los alcances de la auditoría son los siguientes:

- La instalación eléctrica cuenta con un transformador de 300 kVA con conexión secundaria delta con cuatro hilos (pierna alta). Las cargas de las líneas de producción tienen motores de  $\frac{1}{4}$  HP hasta 10 HP y utilizan variadores de frecuencia. Las cargas de equipos de servicios o auxiliares son ventiladores, caldera y bomba de agua.
- Las mediciones con el analizador de redes trifásicas se registran en el tablero principal y en el tablero de distribución para la línea de producción uno. Se realizan tres mediciones del tablero principal y una en la línea de producción de pastas. El proceso productivo de la línea uno consiste en laminado, precocido, secado en horno y empaque. El proceso productivo de la línea dos consiste en mezcla, laminado, precocido, corte, freidora, envasado, termo encogido y empaque.

- Se utiliza un analizador de redes trifásicas para las 4 mediciones. Las mediciones se realizan en los siguientes periodos de tiempo:
  - Medición 1 - 03/04/2017 18:59 al 06/04/2017 11:37
  - Medición 2 - 11/10/2017 12:00 al 12/10/2017 14:00
  - Medición 3 - 22/05/2018 17:15 al 25/05/2018 03:45
  
- Se registran variables de voltaje, corriente, factor de potencia y potencia para calcular los indicadores de regulación de voltaje, desbalance de voltaje, desbalance de corriente, armónicos de voltaje, armónicos de corriente y *flicker* (CNEE, 1999).

Existen tres hitos importantes a tomar en cuenta para la auditoría: 1) Cambio de un transformador de 150 kVA de poste por uno de 300 kVA tipo PAD MOUNTED, 2) Reubicación de transformador de corriente del banco de capacitores de la fase a hacia la fase b, 3) instalación de equipo nuevo en la línea de producción uno.

### **2.2.1. Planificación de la auditoría PQ**

La planificación de la auditoría PQ consiste en realizar dos actividades primordiales: definir los objetivos y el alcance de actividades. La definición de los objetivos ayudará a establecer los recursos específicos que se obtienen al realizar una auditoría, como: número de medidores, equipos, técnicas de monitoreo de condición y personal.

El nivel de análisis de la auditoría realizada en la industria de alimentos seleccionada, servirá para indicar al departamento de mantenimiento, cual debería ser el entorno electromagnético al que será sometida la instalación. Los

registros de perturbaciones en la red eléctrica serán analizados con estadística descriptiva en el capítulo 3 y los resultados serán discutidos en el capítulo 4.

De acuerdo con (DRANETZ, 2003) los objetivos de la auditoría son:

- Realizar una evaluación general de calidad de energía en el tablero principal.
- Tomar termografías del transformador, tablero principal, alimentador principal, banco de capacitores y motores con consumo significativo.
- Identificar los problemas en el transformador de 150 kVA y proponer una acción correctiva programada.
- Determinar el entorno electromagnético al cual será sometida la instalación.
- Proponer soluciones para reducir la susceptibilidad de los equipos.
- Graficar líneas base de los índices de calidad antes y después de implementar las acciones preventivas y correctivas.

Se tomarán 3 mediciones de calidad de energía en el tablero principal de la instalación y termografías a equipos críticos (transformador, tablero principal, alimentador principal, banco de capacitores, variador de frecuencia y motores con consumo significativo).

Se analizan las variables de voltaje, corriente, factor de potencia y potencia activa. Los indicadores de calidad utilizados para el análisis descriptivo y para generar las líneas base son: regulación de voltaje, desbalance de voltaje, desbalance de corriente, distorsión armónica y *flicker*. (CNEE, 1999). Se incluye el análisis de los registros de *sags* durante el período de medición.

El consumo máximo registrado en las instalaciones durante las 3 mediciones no supera los 150 kW, debido a esto la auditoría PQ puede realizarse con las mediciones del tablero principal. La termografía se utilizará como técnica complementaria para el diagnóstico de calidad de energía.



### **2.2.2. Preparación de la auditoría**

La empresa inició hace 50 años con una línea de producción, conformada por cuartos estáticos con un sistema de ventilación fijo. En el 2000 introduce la segunda línea de producción y en el 2014 realiza una renovación de la línea de producción uno y adquiere un horno de secado automatizado.

La información y datos recolectados son proporcionados por el gerente de la empresa y el jefe de mantenimiento. La encuesta realizada antes de la auditoría, refleja la necesidad de la empresa de implementar un sistema de gestión de calidad, debido al incremento en la producción. La empresa ingresará su producto a los supermercados grandes de Guatemala.

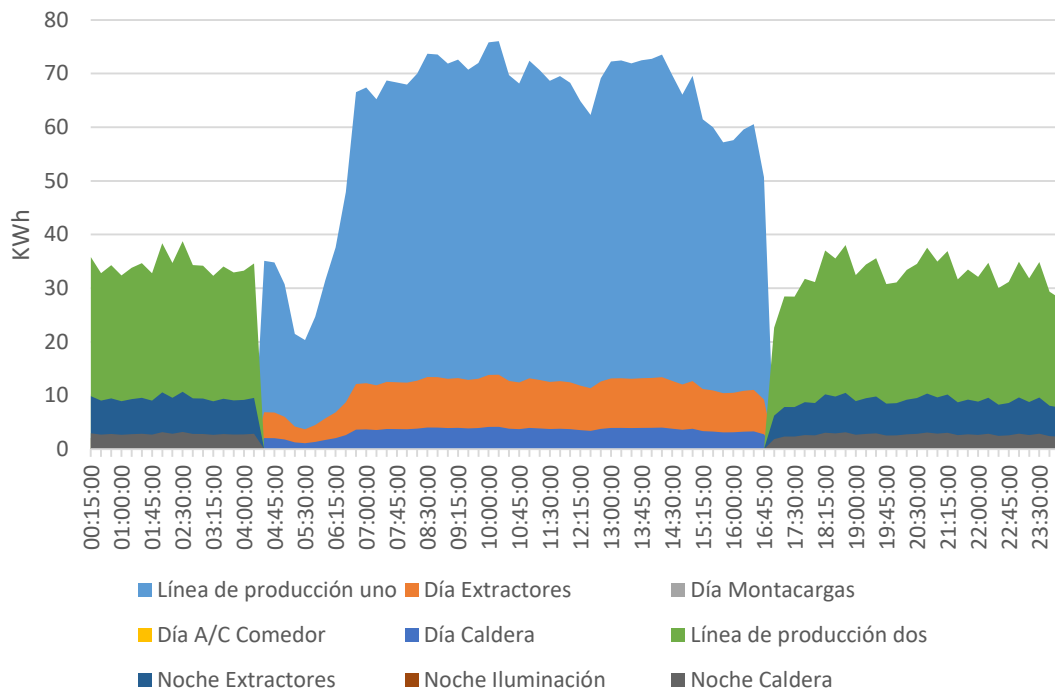
El gerente de la empresa indica que después de analizar, si es posible realizar un cambio en las operaciones, se pretende operar las líneas de producción en simultáneo. Actualmente operan una línea de producción durante el día y la línea de producción dos la operan en la noche. La línea de producción uno opera de 06:30 a las 16:15, la línea de producción dos, de 17:30 a 04:40 y los tiempos de paro son para actividades de limpieza y arranque de las líneas de producción.

Se toman mediciones con un analizador de redes trifásicas en el tablero principal y mediciones puntuales de corriente con un amperímetro a las cargas significativas de la instalación. Se registran temperaturas de equipos como: transformador, tablero principal, alimentador principal, banco de capacitores, variador de frecuencia y motores con consumo significativo.

Se registra demanda máxima de 76 kW durante la operación de la línea de producción uno y demanda máxima de 39 kW durante la operación de la línea de

producción dos. La capacidad instalada del transformador es de 150 kVA con una reducción de la eficiencia de 0.96 en el día y 0.86 en la noche, es decir, que la capacidad del transformador será de 6 kVA y 21 kVA, respectivamente.

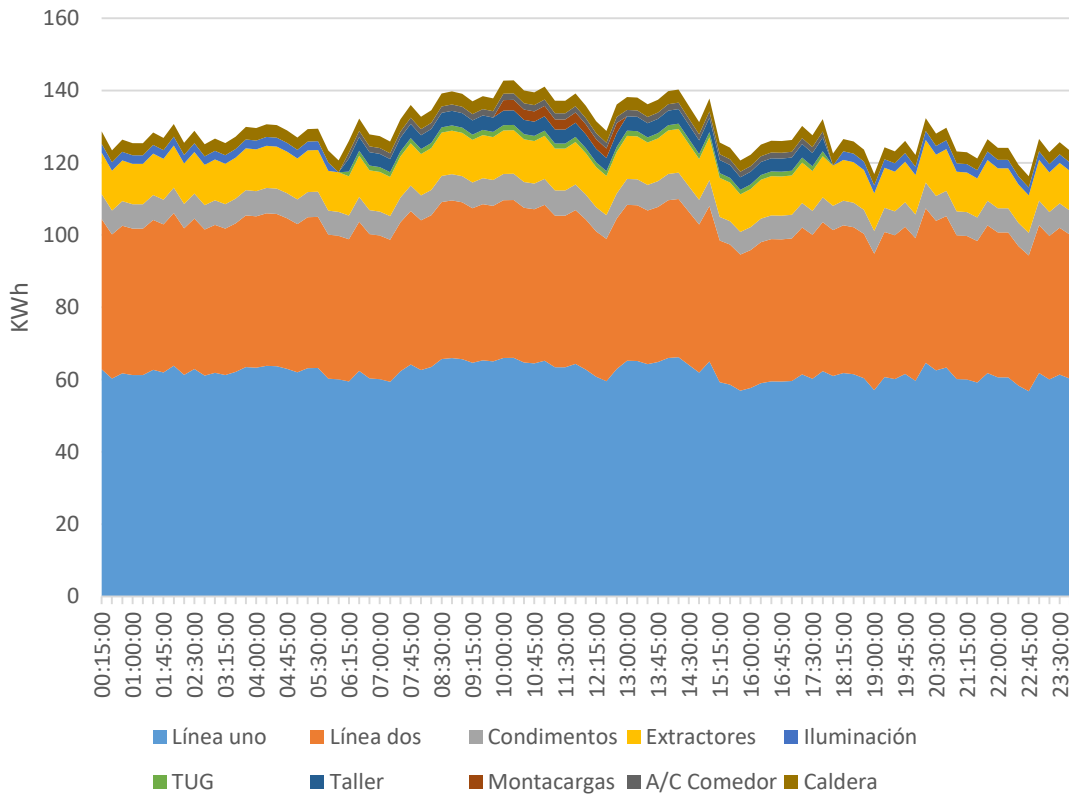
Figura 4. Perfil de carga de las líneas de producción uno y dos



Fuente: elaboración propia.

Se realizó una simulación de la operación de ambas líneas de producción en simultáneo y se estimó que la demanda máxima sería de 145 kW, por lo que se recomendó cambiar el transformador, alimentador principal e interruptor principal para evitar el riesgo de sobrecarga. El 11 de diciembre de 2017 se realiza el cambio instalando un transformador tipo PAD MOUNTED de 300 kVA, 2 alimentadores por fase calibre 350 kcmil y un cable de neutro calibre 350 kcmil e interruptor principal de 800 amperios.

Figura 5. Perfil de carga de la operación en simultáneo



Fuente: elaboración propia.

La conexión del transformador es estrella en el primario y delta aterrizada (pierna alta) en el secundario; sin embargo, al realizar la medición con el analizador de redes trifásicas se detecta una condición de neutro flotante. Aunado a lo anterior, se observa que la fase b presenta un mayor consumo de potencia reactiva y el transformador de corriente del banco de capacitores se encuentra ubicado en la fase a, produciendo una operación errática del controlador del banco de capacitores.

Se programarán mediciones con el analizador de redes trifásicas que permitan obtener el registro de eventos transitorios; variaciones de corta duración momentáneas, temporales e interrupción sostenida (DIP). El medidor registrará fenómenos electromagnéticos en estado estable (regulación de voltaje, desbalance de fases, distorsión armónica. Se realizan mediciones con un multímetro y termografía de cargas sensibles y críticas.

Tabla VIII. Registro de mediciones

No.	Fecha	Día	Hora	Descripción	Eventos inusuales
1	03/04/2017 06/04/2017	lunes jueves	18:59 11:37	Medición en tablero principal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 motores hace 5 años dañados.</li> <li>• 3 tarjetas electrónicas de codificadoras quemadas.</li> <li>• Variador de frecuencia de la línea dos se quema.</li> </ul>
2	11/10/2017 12/10/2017	miércoles jueves	12:00 14:00	Medición en tablero principal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 motores de la enfriadora de la línea dos dañados.</li> <li>• Daño en capacitores de formadoras automáticas de termo encogido.</li> <li>• Parpadeo de luminarias.</li> </ul>
3	22/05/2018 25/05/2018	martes viernes	17:15 03:45	Medición en tablero principal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quema del controlador del banco de capacitores y capacitores.</li> <li>• Quema del motor de 2 extractores por punto caliente y daño en el aislamiento del cable.</li> <li>• Corrupción de datos y daño a equipos sensibles.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

### **2.2.3. Inspección del sitio**

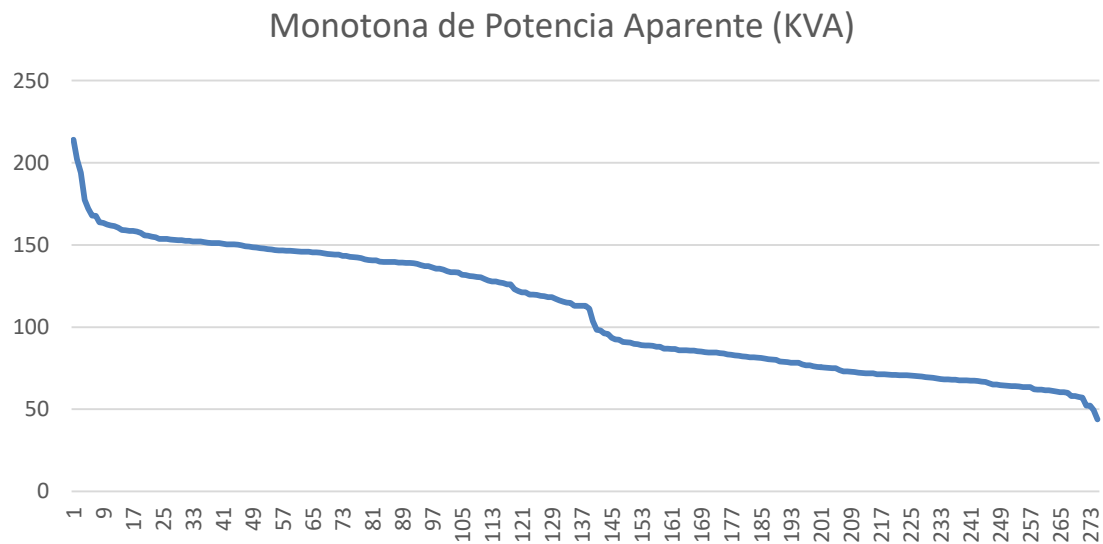
Se realiza de dos formas: visual y física. Durante la inspección se cuenta con el acompañamiento del jefe de mantenimiento y el supervisor eléctrico para obtener una descripción del proceso, fallas y rutinas de mantenimiento.

- Inspección visual externa: se realiza un recorrido por toda la instalación, identificando riesgos potenciales y oportunidades de mejora. Se observa una instalación con alimentación en 13.2 kV y baja a 240/120 V por medio de tres transformadores en poste con capacidad de 50 kVA cada uno. Existe un banco de compensación del factor de potencia de una capacidad total de 16.7 kVAR; sin embargo, el factor de potencia permanece en 0.80, por lo que la empresa ha estado pagando penalización por incumplimiento a la tolerancia establecida en las NTSD.
- Inspección visual interna: se realiza un recorrido por toda la instalación identificando riesgos potenciales y oportunidades de mejora. Se debe de identificar los equipos asociados a la producción que sea una fuente de interferencia y que puedan introducir problemas obvios a la instalación eléctrica. Revisar la mayor parte de cargas eléctricas o cargas que presenten un histórico de fallas de mal funcionamiento, prestar atención al cableado de alimentación o falsos contactos.
- Inspección física: el proceso de inspección incluye la revisión del cableado de alimentación de cargas críticas y cargas que puedan causar problemas de calidad de energía. Se observa calentamiento en conductores de alimentación, interruptor principal, transformador, puntos calientes en terminales, contactores, capacitores y motores.

Durante la inspección física se observa que el transformador instalado actualmente presenta elevaciones de temperatura debido a que la carga actual

oscila en un rango de 40 a 200 KVA, utilizando los registros de potencia máxima. El transformador actual tiene capacidad de 150 KVA, en la figura 6 se observa que, actualmente el 16 % del tiempo del periodo que duró la medición 1, la potencia aparente supera la capacidad instalada.

Figura 6. **Curva monótona de potencia aparente**



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica monótona se puede observar que el 50 % del tiempo el transformador se encuentra operando muy cerca de su capacidad máxima y en algunos registros se supera.

- 16 % del tiempo, el consumo se encuentra por encima de 150 KVA.
- 34 % del tiempo, el consumo se encuentra en un rango entre 110 a 150 KVA.
- 50 % del tiempo, el consumo se encuentra por debajo de 110 KVA.

En la inspección física se detectó que el calibre del conductor instalado en el tablero principal es 350 AWG Kcmil THHN, las características de este tipo de conductores permiten fluir corrientes de hasta 350 amperios y a temperaturas hasta 90 °C. Se observa que el conductor está sobrecargado y los conductores presentan calentamiento por encima de 40 °C. El calentamiento de los conductores produce pérdidas por efecto joule ( $I^2 \times R$ ), estas pérdidas se disipan en forma de calor debido a la excesiva circulación de los electrones por el mismo.

Se estima que, aproximadamente el 48 % del tiempo, la corriente que circula por los conductores principales 350 AWG Kcmil supera los 350 amperios de capacidad del cable. Se estima que en el período del 3/4/17 15:15 al 6/4/2017 11:45 las pérdidas por efecto joule debido a la sobrecarga del alimentador principal equivalentes a 6.21 KWh, lo cual representa 0.11 % de pérdidas.

Durante la inspección física se detectó que en los arranques de las líneas de producción se presentarán las corrientes más elevadas, alcanzando valores promedio de hasta 780 amperios. La corriente nominal que circularía con ambas líneas funcionando en simultáneo es de aproximadamente 488 amperios, por lo cual se infiere que es necesario cambiar el interruptor principal, ya que este soporta hasta 500 amperios.

#### **2.2.4. Monitoreo de la potencia**

“Para determinar la calidad de energía de toda la instalación eléctrica, se ha colocado el analizador de redes trifásicas en el punto de conexión común entre el usuario y el distribuidor. El equipo mostrará la calidad de energía suministrada y el efecto de las cargas significativas dentro de la instalación del usuario y su incidencia el sistema”. (DRANETZ, 2017, p. 56).

“Si se desea encontrar un problema de calidad de energía, se deberá monitorear el voltaje. Si se desea encontrar la(s) causa(s) de un problema de calidad de energía, se deberán monitorear ambos el voltaje y la corriente”. (DRANETZ, 2017, p. 56).

En esta sección se describe cómo se deberá colocar el equipo analizador, el equipo deberá contar con un protocolo de conexión y los procedimientos para identificar las causas o el origen del problema se describen en la siguiente sección.

- Ubicación del medidor

Se colocará el medidor en la ubicación determinada durante la planificación e inspección del sitio de la auditoría PQ. La ubicación del medidor permitirá diferenciar dónde se origina el evento de calidad de energía, se tomará de referencia en el punto de medición los eventos aguas arriba, cuando son del lado del suministro o desde la fuente y aguas abajo, cuando ocurren del lado de la carga.

- Conexión del analizador de redes trifásicas

La conexión del equipo deberá iniciar colocando las pinzas de voltaje, ya que sin la presencia de voltaje la carga no podría trabajar. De igual forma, también debemos considerar que si la corriente es excesiva, el voltaje sufre perturbaciones y la carga no puede trabajar.

Es de suma importancia seleccionar la conexión correcta para la carga que se esté analizando. Para cargas trifásicas se deberán colocar las tres pinzas de voltaje en las líneas vivas y si es una estrella o una delta aterrizada (pierna alta)



se deberá tomar la referencia de neutro y tierra, para registrar los impulsos a tierra que pueden afectar la carga.

Es importante tomar en cuenta que, para obtener la precisión y exactitud deseada de los valores de corriente, hay que seleccionar correctamente la dirección del flujo y el rango correcto en los equipos. Monitorear la corriente que fluye por las fases o líneas vivas sirve para determinar la fuente de la perturbación y monitorear la corriente de neutro o tierra es esencial para determinar la fuente de los disturbios neutro a tierra o para determinar las fuentes de flujo de corriente por el hilo de tierra.

#### **2.2.5. Análisis de datos y monitoreo**

El primero objetivo del análisis de datos de la auditoría es identificar si la energía eléctrica es un problema que afecta el rendimiento de los equipos. Se analizan los eventos de calidad de energía que ocurren durante los intervalos en que los equipos operan de forma errática. Los sistemas de gestión deberán contar con un monitoreo que permita evaluar si los eventos exceden los límites de rendimiento para el equipo afectado.

La revisión continua de los registros de monitoreo servirá para identificar eventos inusuales o severos. Se deberá encontrar una correlación entre los problemas detectados durante la inspección física con los síntomas que presentan los equipos.

Figura 7. Síntomas de equipos y problemas de calidad de energía

	Suspected Interference	Voltage Sag	Impulse	Voltage Distortion	Outage	Neutral Ground Voltage	Repetitive Disturbance	Overvoltage
Hard Disk Crash			Yes		Yes			Yes
Semiconductor Failure			Yes				Yes	Yes
AC Detect Activation	Yes			Yes	Yes			Yes
Lock Up/Memory Scramble	Yes		Yes				Yes	Yes
Soft Errors			Yes			Yes	Yes	Yes
Breaker Trip (Shunt Trip)	Yes			Yes				
Reset/Reboot	Yes				Yes	Yes		
Measurement Error			Yes	Yes		Yes	Yes	
Poor Signal to Noise Ratio			Yes			Yes	Yes	
Speed or Setting Drift			Yes				Yes	
Power Supply Failure			Yes		Yes		Yes	Yes

Fuente: (DRANETZ, 2003) p. 121.

Se deberán revisar los datos de placa de los equipos para evaluar si el rendimiento está siendo afectado por los problemas de calidad de energía registrados. Seleccionar los eventos que tengan correlación con el historial de fallas y la inspección del sitio. Las especificaciones principales que se deben revisar es el voltaje nominal del equipo, en algunos casos se provee el límite de voltaje de neutro a tierra, para comparar si los eventos registrados exceden los límites establecidos. Por último, se deben clasificar los eventos.

## 2.2.6. Aplicación de medidas correctivas

Existen casos en los cuales al realizar un cambio del cableado o reubicando alguna fuente de disturbios hacia otro circuito, puede ser una solución efectiva o puede ser poco práctica y costosa. La figura 8 presenta las acciones correctivas para proteger una carga que se somete a un entorno electromagnético en el que se producen perturbaciones.

Figura 8. Soluciones a problemas de calidad de energía

Suspected Interference	Voltage Sag	Impulse	Voltage Distortion	Outage	Neutral-Ground Voltage	Repetitive Disturbance	Overvoltage
Rewire Load or Move Interference Source		Yes (3)			Yes (3)	Yes (3)	
Transformer		Yes (4)			Yes (12)	Yes (4)	
Voltage Regulator	Yes (1)	Yes (5)				Yes (5)	Yes (10)
Surge Suppressor		Yes (2)				Yes (2)	
Filter/Suppressor		Yes (2)				Yes (2)	
Power Conditioner	Yes (1) (7)	Yes	Yes (11)		Yes (12)	Yes	Yes (7)
Motor Generator	Yes (1)	Yes	Yes	Yes (8)	Yes (12)	Yes	
Standby Ups	Yes	Yes (2) (9)		Yes		Yes (2) (9)	Yes (10)
On-Line Ups	Yes	Yes (9)	Yes	Yes	Yes (12)	Yes (9)	Yes

Figure 2-31. Solutions for power problems.

- 1 The sag may exceed the range limit of the voltage regulator.
- 2 The impulse let-through (minimum suppression limits) may be greater than the withstand capabilities of the load.
- 3 Rewiring may not isolate the load sufficiently because the power source may still be common.
- 4 The transformer may not attenuate the interference sufficiently to prevent disruption.
- 5 The device may not provide impulse attenuation.
- 6 Bypass circuits may prevent electrical isolation. This limits neutral-to-ground and common mode protection.

- 7 Some power conditioners do not offer voltage regulation.
- 8 The outages may exceed the ride-through provided by the flywheel effect of the motor generator.
- 9 Some UPS designs do not electrically isolate the load during normal operation but rely upon filters and surge suppressors.
- 10 Some devices do not react to or correct overvoltage.
- 11 The device must recreate the sine wave.
- 12 N-G problems due to improper grounding require rewiring.

Fuente: (DRANETZ, 2003), p. 135.

### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

El plan de gestión de mantenimiento para la reducción de fallas por mala calidad de energía eléctrica, deberá enfocarse en optimizar la gestión de la energía. El responsable de los sistemas de gestión deberá comprometerse a comunicar las responsabilidades que se tendrán dentro del plan:

- El interés en estimular proyectos de gestión de energía deberá resultar en ahorros reales y duraderos.
- Los operadores y el personal de mantenimiento contarán con los instrumentos y herramientas necesarias para formar parte del equipo encargado de la gestión de energía.
- La gestión de la energía es una parte integral de cada departamento.

El estándar ISO 50001 puede ser tomado de referencia para desarrollar un plan de gestión de mantenimiento con enfoque en calidad de energía. Considerar los siguientes pasos para que el proceso sea efectivo.

- Obtener el compromiso total de la gerencia.
- Obtener la colaboración de todas las áreas y los empleados.
- Realizar auditorías energéticas PQ de forma oportuna.
- Establecer las metas de conservación de la energía.
- Desarrollar formatos de informe efectivos.
- Implementar los cambios de ingeniería energética.
- Proveer los equipos necesarios para el monitoreo.
- Monitorear los resultados y generar las tendencias de las líneas base.

“Antes de realizar cualquier proyecto de gestión de la energía es primordial realizar conservación de la misma. Para cuantificar y tomar decisiones respecto a los proyectos de conservación de la energía, hay que comprender los beneficios que se obtienen al contar con un plan de gestión y un equipo de monitoreo de variables e indicadores”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 30). Algunos de los beneficios, de contar con un sistema de monitoreo son:

- Detección de disturbios y problemas.
- Identificación y caracterización de problemas.
- Implementación de soluciones.
- Seguimiento y verificación de las soluciones implementadas.
- Monitoreo en tiempo real de cargas significativas y sensibles.
- Aumento de la seguridad del personal.
- Implementación de programas de mantenimiento preventivo.
- Concordancia con el sistema de calidad ISO 9001-2000.
- Compensación de energía reactiva utilizando el mejor método técnico-económico.
- Solución de problemas causados por distorsión armónica utilizando el mejor método técnico-económico.

### **3.1. Distribución de cargas**

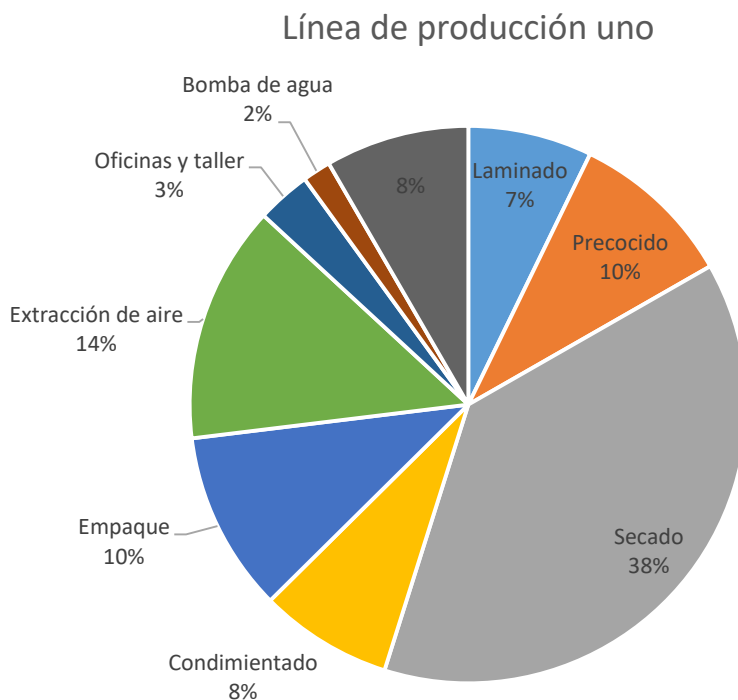
En las gráficas mostradas a continuación se muestra la distribución de consumos por cada etapa de las líneas de producción. Durante la operación de la línea uno, el mayor consumo se registra en la etapa de secado de pasta con 38 %. Existe una alta oportunidad de ahorro si se hace más eficiente la extracción de aire, lo cual representa 14 % de consumo durante el día.

Durante la operación de la línea dos, el mayor consumo que se registra en la producción es la etapa de mezcla, donde se utiliza un motor de mezcla y dos motores para el llenado, los cuales representan el 16 %. En este caso, el mayor consumo está representado por los extractores con 19 %, por lo cual se recomienda evaluar la opción de hacer más eficiente este servicio, ya que se encuentra asociado a ambas líneas de producción el ahorro puede tener retornos de inversión en periodos cortos.

- Producción en el día
  - Laminado: laminado, moldeo y llenado.
  - Precocido: caldera 100 HP.
  - Secado de pastas: Four Star, Flow Pack, Tayi Yeh de Goya, transportadora de codificación, transportadora de Goya, túnel de encogimiento Goya, transportadora de moldeo, ventiladores de báscula, motores y tomacorrientes de uso general.
  - Condimentos: multiplast 1, empacadora (sal mágica), empacadora de líquidos y mezcladora de condimentos.
  - Empaque: compresor, bomba de aceite y empaque.
  
- Producción en la noche
  - Mezcla: mezcladora, motor 1 y 2 de llenado.
  - Laminado: formadora de lienzo.
  - Precocido: caldera 100 HP.
  - Corte, freidora y enfriamiento.
  - Envasado: compresor, ventiladores y forradora de vaso.
  - Termoencogido: Tayi Yeh de sopas, túnel de encogimiento charola, túnel de termo encogido, bomba de aceite.

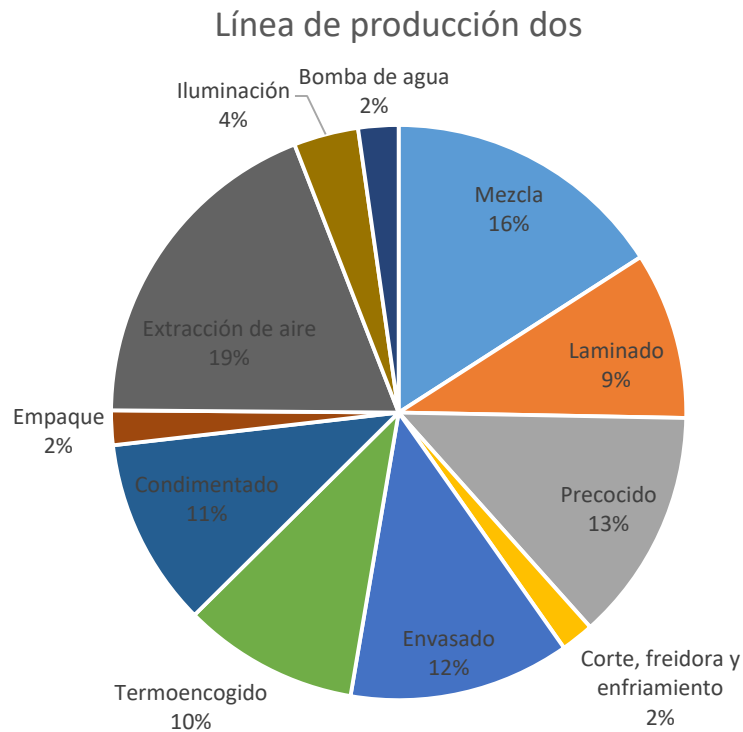
- Condimentos: multiplast 2, empacadora (sal mágica), empacadora de líquidos y mezcladora de condimentos.
  - Empaque: compresor, bomba de aceite y empaque.
- Servicios
    - Extracción de aire: 4 extractores
    - Bomba de agua: motor de 2 HP
    - Lavado y secado de uniformes: lavadoras y secadoras
    - Iluminación: oficinas, taller, lámparas de techo (nave de producción) y exterior
    - Tomacorrientes de uso general: en área de producción y oficinas

**Figura 9. Distribución de consumos línea de producción uno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Distribución de consumos línea de producción dos**



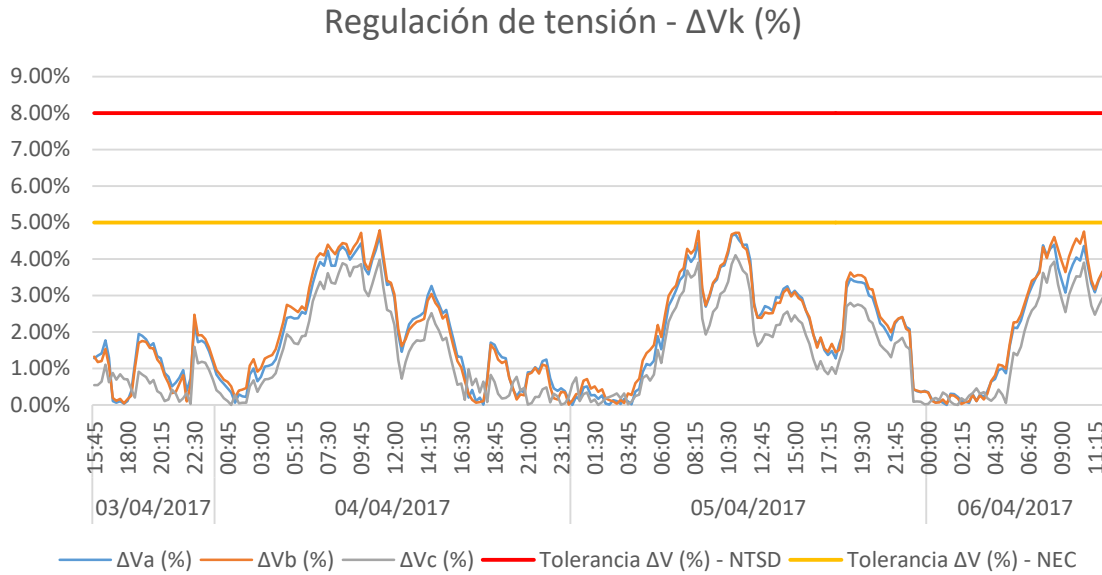
Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Regulación de voltaje –auditoría PQ

Para analizar los datos de voltaje hay que graficar los voltajes de fase y neutro, se toman los límites permisibles por la Norma NTSD (8 %) y se establecerán indicadores de alerta de acuerdo a lo que establece el NEC (5 %). El Código Eléctrico Nacional (NEC), por sus siglas en inglés, indica que la caída de tensión del conductor que alimenta el tablero principal deberá estar por debajo del 3 % y la caída de tensión del tablero principal a los tableros de distribución o subtableros deberá estar por debajo de 5 %.

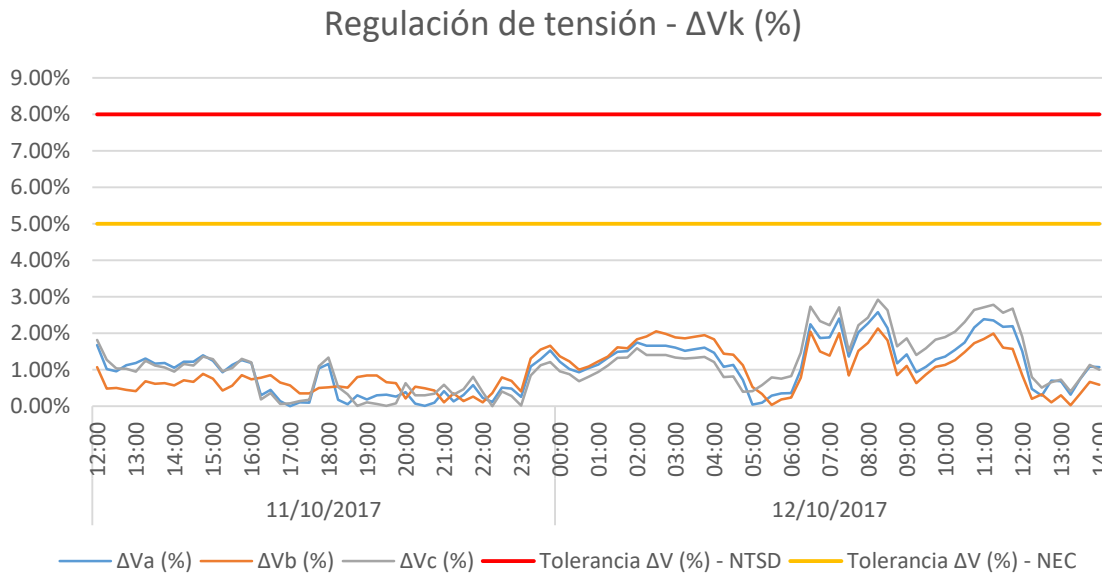


**Figura 11. Regulación de voltaje tablero principal – medición 1**



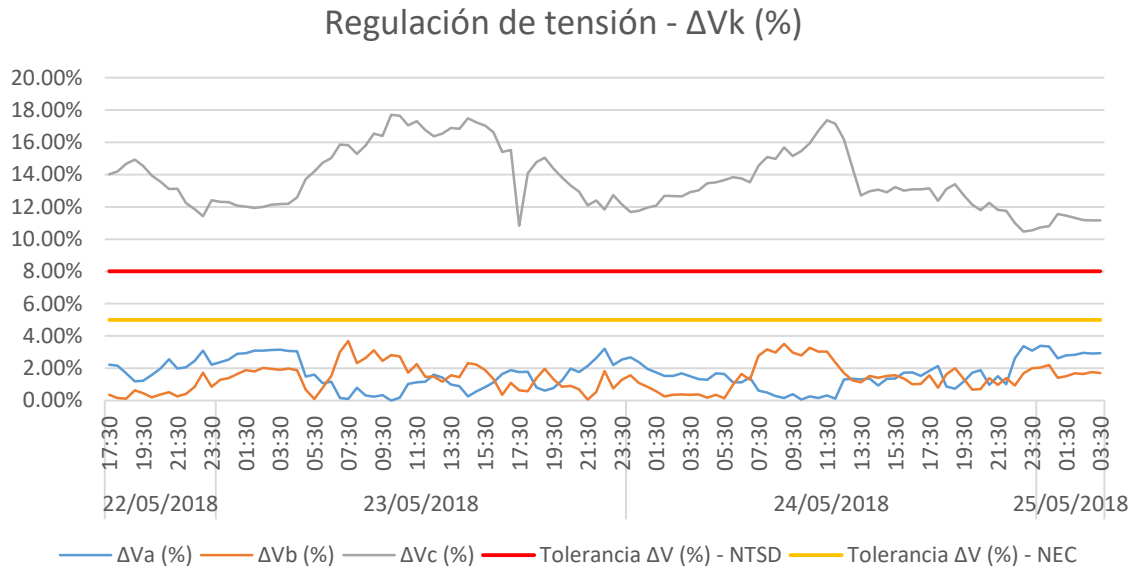
Fuente: elaboración propia.

**Figura 12. Regulación de voltaje tablero principal – medición 2**



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Regulación de voltaje tablero principal –medición 3



Fuente: elaboración propia.

En el capítulo 4 se presentan histogramas para las mediciones de voltaje y diagramas de caja y bigotes para el indicador de regulación de voltaje. La estadística descriptiva se utilizará para el análisis PQ.

### 3.3. Desequilibrio de fases –auditoría PQ

El desbalance de voltaje puede tener efectos dañinos en motores y otros equipos eléctricos. El desbalance de corriente es el causante del desbalance de voltaje y puede ser solventado redistribuyendo las cargas de la fase en la que fluye más corriente a la que se registra un flujo de corriente menor. Se toman los límites permisibles por la Norma NTSD (3 %) y se establecerán indicadores de alerta de acuerdo a lo que establece la Norma NEMA MG1-12.45 (1 %) para el

desbalance de voltaje. Se toman los límites permisibles por la Norma NTSD (10%) para el desbalance de corriente.

Figura 14. Desequilibrio de fases V, I – medición 1

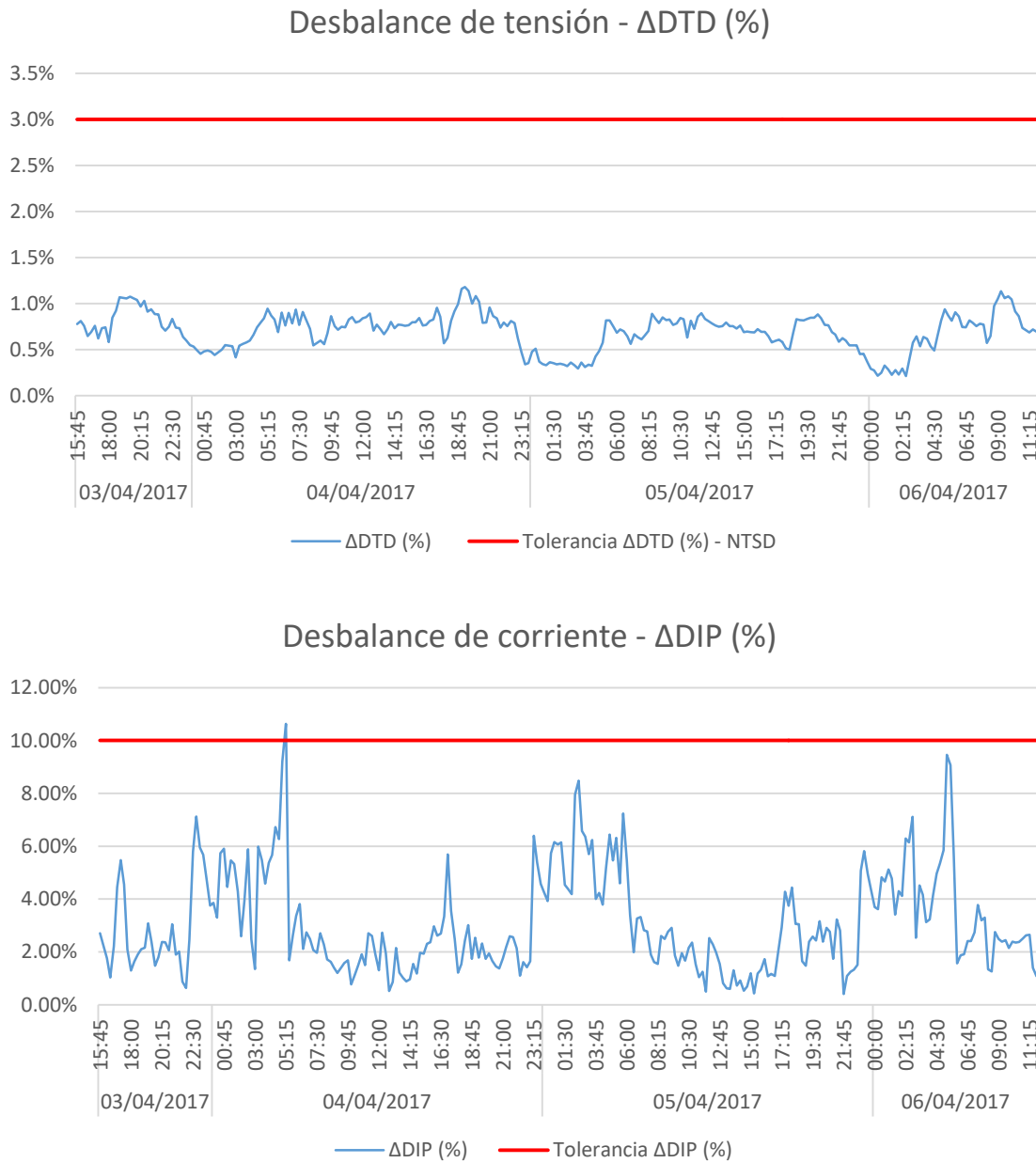
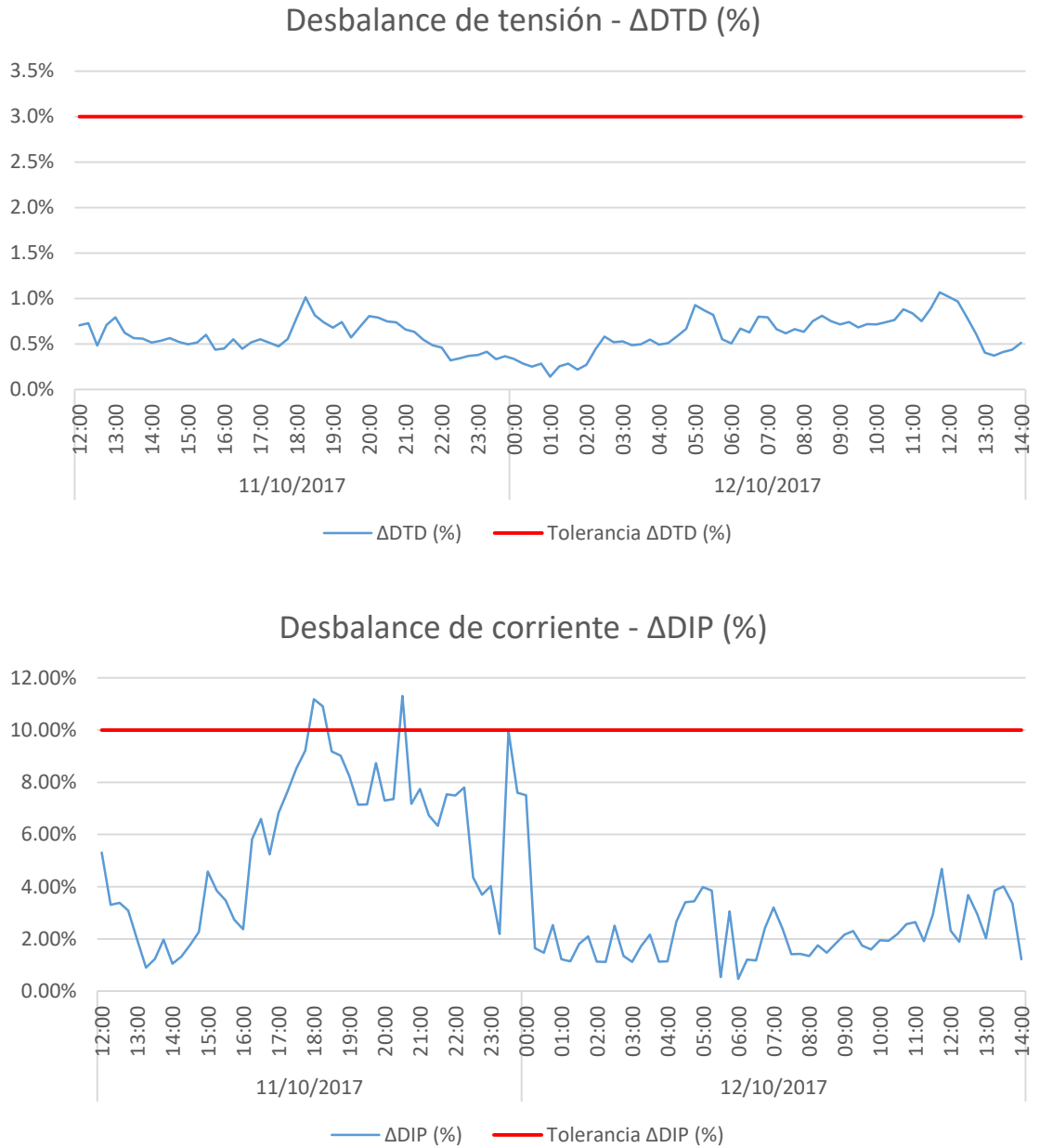
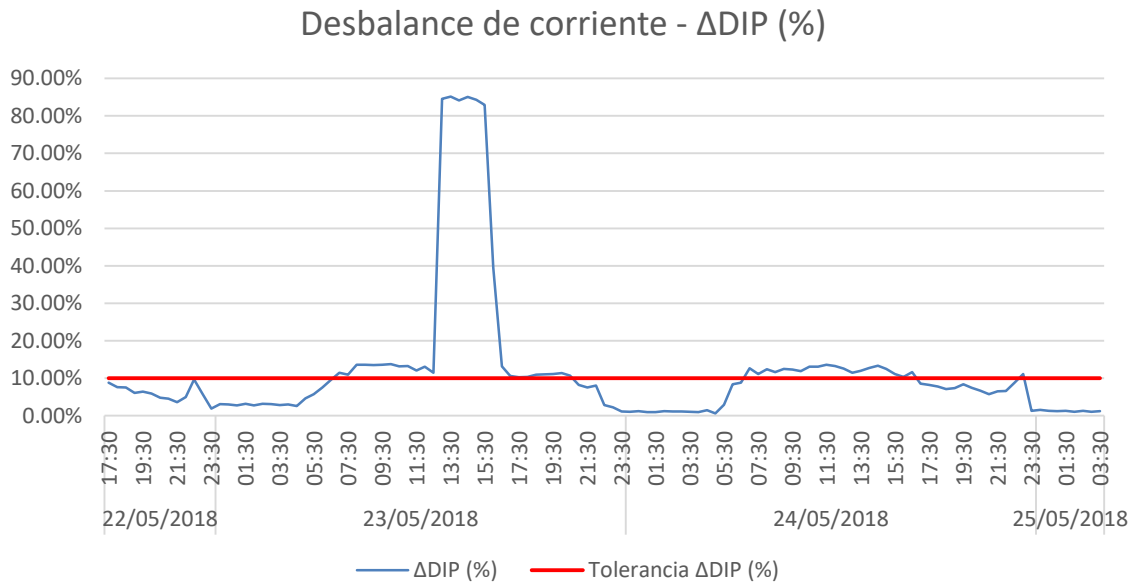
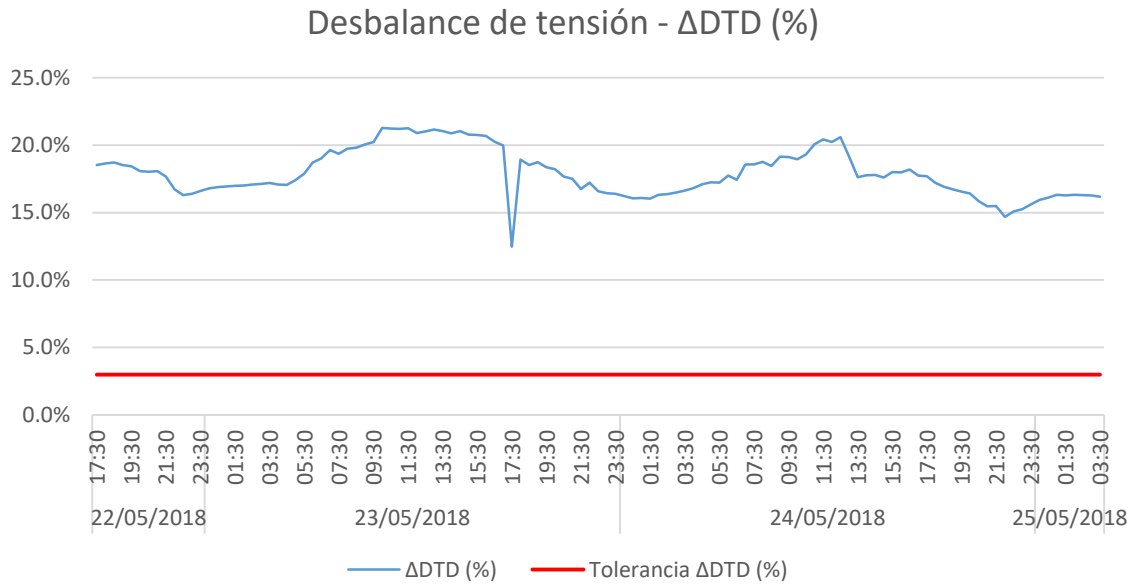


Figura 15. Desequilibrio de fases V, I – medición 2



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Desequilibrio de fases V, I – medición 3



Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Armónicos de voltaje –auditoría PQ

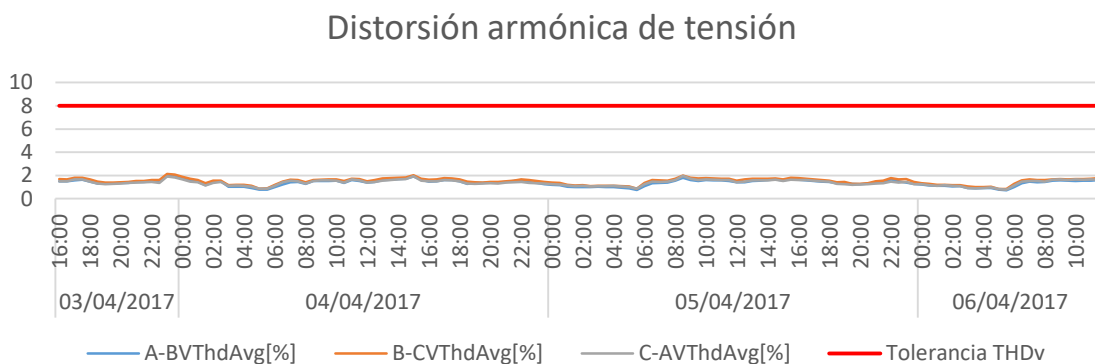
Según el estándar IEEE 519 “Los armónicos de voltaje en el punto de conexión del usuario y la fuente no deben superar los siguientes límites”

- El 99 % de los datos registrados en 1 día deberán ser menores a 8 %, registros cada minuto.
- El 95 % de los datos registrados en 1 semana deberán ser menores a 8 %, registros cada 10 minutos”.

“La NTSD establece que los datos registrados durante una medición de 8 días, 768 registros, el 95 % de los registros de distorsión armónica total de voltaje THD no deberán superar el 8 %”. (CNEE, 1999).

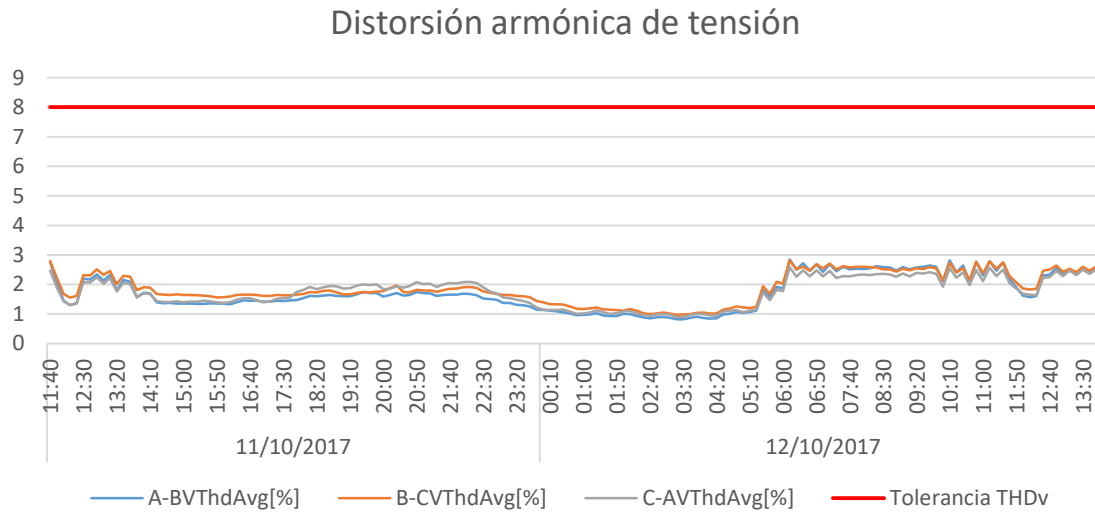
En el capítulo 3 se presentan diagramas de caja y bigotes para analizar el indicador de distorsión armónica total de voltaje y armónicos individuales (3, 5, 7, 9 y 11). La estadística descriptiva se utilizará para el análisis PQ.

Figura 17. **Distorsión armónica total de voltaje – medición 1**



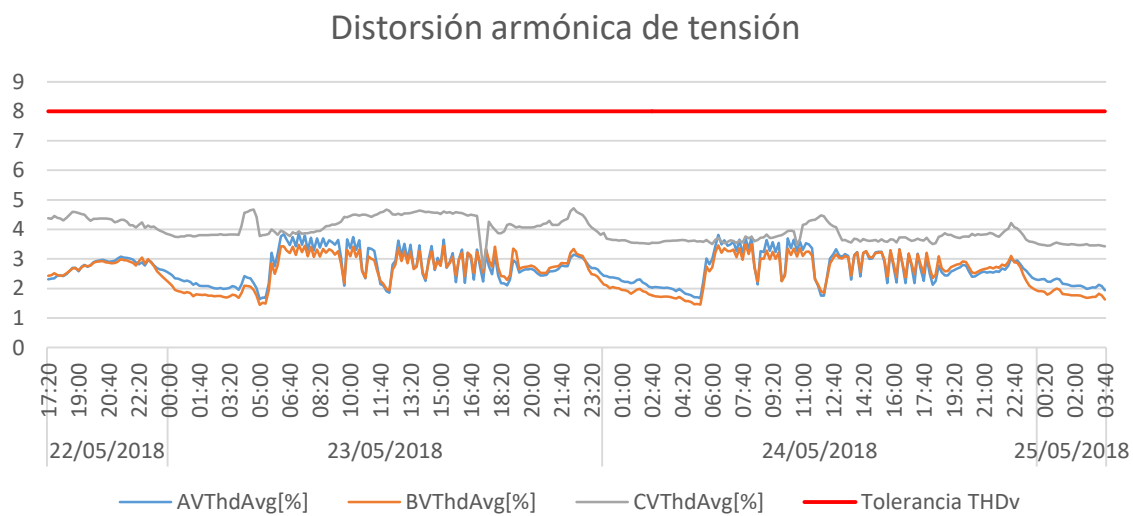
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Distorsión armónica total de voltaje –medición 2



Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Distorsión armónica total de voltaje –medición 3



Fuente: elaboración propia.

### 3.5. Armónicos de corriente – auditoría PQ

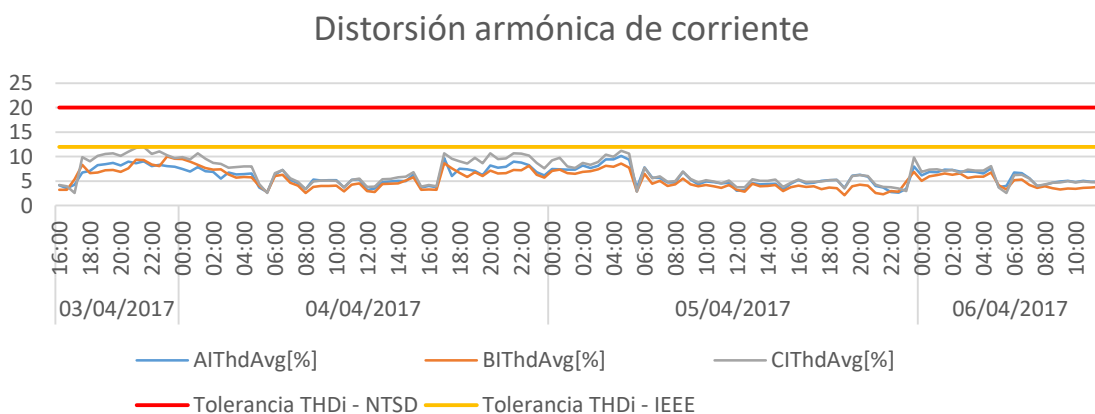
Según el estándar IEEE 519: “Los armónicos de corriente en el punto de conexión del usuario y la fuente se establecen por medio de la corriente de cortocircuito y la corriente máxima registrada. Para el presente estudio se utilizará como corriente máxima 500 amperios y 65 kiloamperios de corriente de cortocircuito”. Se toman los límites permisibles por la Norma NTSD (20 %) y se establecerán indicadores de alerta de acuerdo a lo que establece la Norma IEEE 519 (12 %) para armónicos de corriente.

Tabla IX. **Distorsión armónica de corriente**

$I_{CC} / I_{max}$	<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	35< h	TDD
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20<50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50<100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100<1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Fuente: IEEE 519-1992, p. 25.

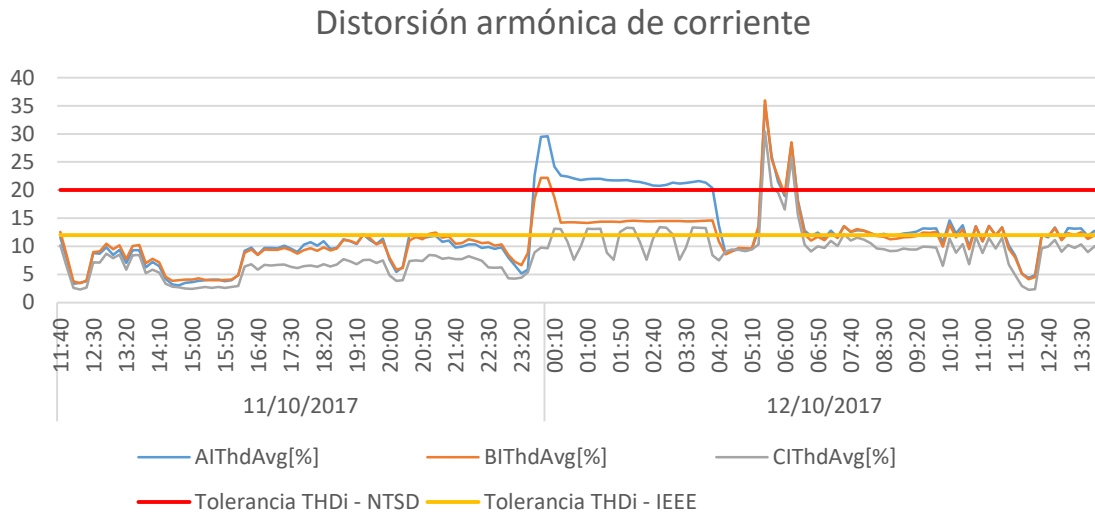
Figura 20. **Distorsión armónica total de corriente –medición 1**



Fuente: elaboración propia.

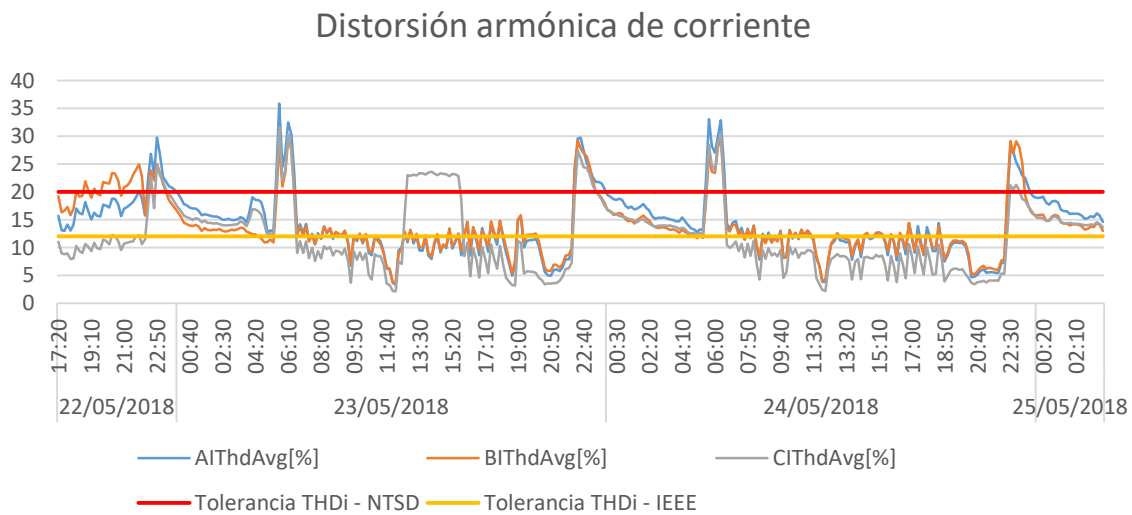


Figura 21. Distorsión armónica total de corriente –medición 2



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Distorsión armónica total de corriente –medición 3

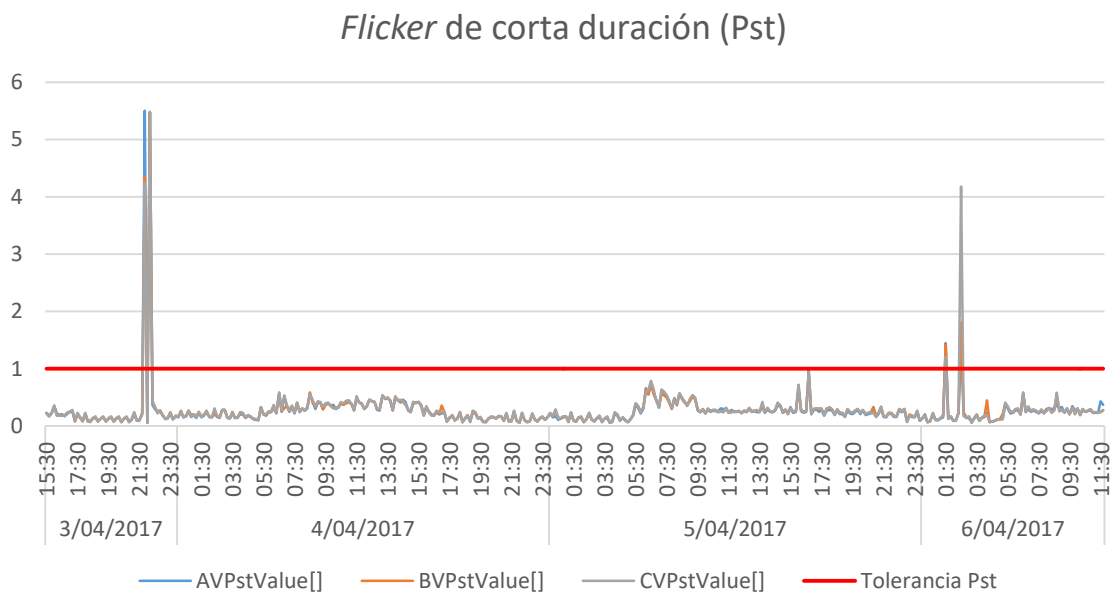


Fuente: elaboración propia.

### 3.6. Flicker –auditoría PQ

“El flicker es producido por variaciones periódicas o series de cambios aleatorios en la tensión de la red eléctrica. El índice de tolerancia máxima para flicker es de  $Pst \leq 1$ , durante el 95 % del tiempo del período de medición que es de 7 días continuos. El índice de severidad de corto plazo se evalúa en intervalos de medición de 10 minutos”. (CNEE, 1999, p. 24).

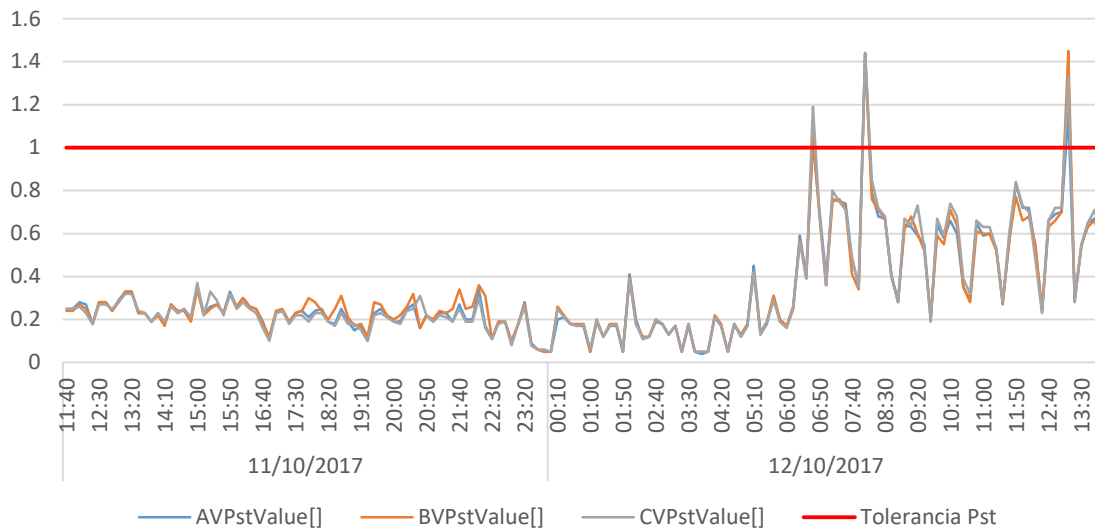
Figura 23. Flicker –medición 1



Fuente: elaboración propia.

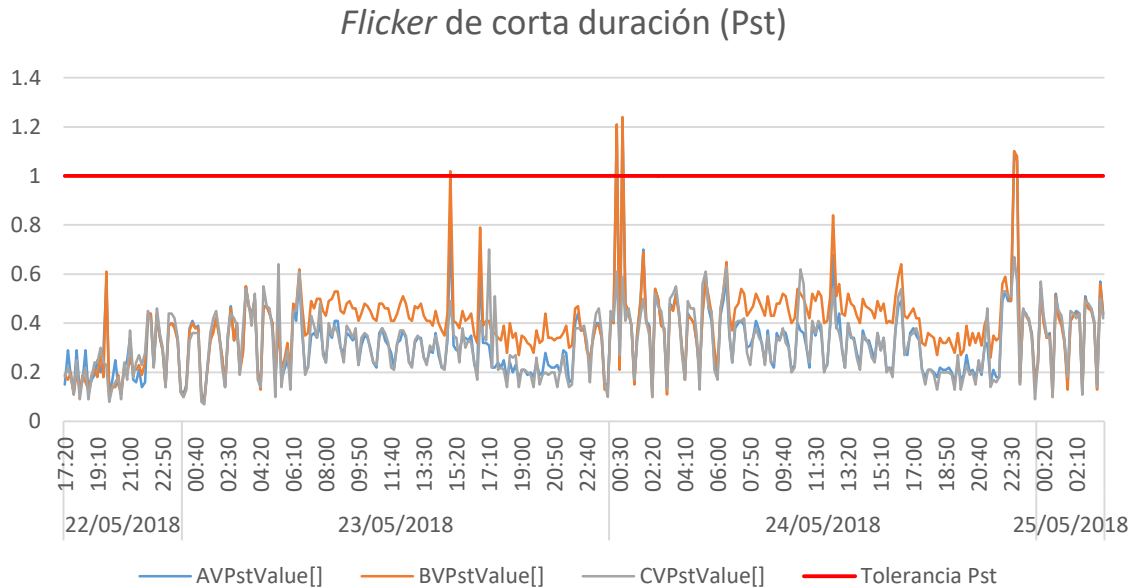
Figura 24. **Flicker –medición 2**

*Flicker* de corta duración (Pst)



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. *Flicker* –medición 3



Fuente: elaboración propia

### 3.7. Informe PQ, según la Norma EN50160

#### 3.7.1. Medición 1

Nominal Voltage (Un) = 236 V

#### Power Frequency

Range	Threshold	Compliance	
60 Hz +1%/-1%	99.5%	100.0%	PASSED
60 Hz +4%/-6%	100.0%	100.0%	PASSED

#### Supply Voltage Variations

Range	Compliance:			CHC	
	Threshold	CHA	CHB		
236 V +10%/-10%	95.0%	100.0%	100.0%	100.0%	PASSED
236 V +10%/-15%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	PASSED

#### Rapid Voltage Changes

Not available

**Flicker**

Range	Compliance: Threshold	CHA	CHB	CHC
<1 95.0%	100.0%	100.0%	100.0%	<b>PASSED</b>

**Supply Voltage Unbalance**

Range	Threshold	Compliance
0-2% 95.0%	0.0%	<b>PASSED</b>

**Harmonics**

All shown figures are 95% values

Limit(% of Un)	A	B	C	Status
THD <8.00%	1.70%	1.82%	1.68%	<b>PASSED</b>
H02 <2.00%	0.03%	0.03%	0.03%	<b>PASSED</b>
H03 <5.00%	0.33%	0.41%	0.54%	<b>PASSED</b>
H04 <1.00%	0.03%	0.04%	0.04%	<b>PASSED</b>
H05 <6.00%	1.37%	1.38%	1.29%	<b>PASSED</b>
H06 <0.50%	0.03%	0.04%	0.03%	<b>PASSED</b>
H07 <5.00%	1.05%	1.31%	1.17%	<b>PASSED</b>
H08 <0.50%	0.02%	0.02%	0.02%	<b>PASSED</b>
H09 <1.50%	0.20%	0.14%	0.15%	<b>PASSED</b>
H10 <0.50%	0.01%	0.01%	0.01%	<b>PASSED</b>
H11 <3.50%	0.40%	0.37%	0.50%	<b>PASSED</b>
H12 <0.50%	0.02%	0.01%	0.01%	<b>PASSED</b>
H13 <3.00%	0.23%	0.31%	0.29%	<b>PASSED</b>
H14 <0.50%	0.02%	0.01%	0.01%	<b>PASSED</b>
H15 <0.50%	0.09%	0.09%	0.08%	<b>PASSED</b>
H16 <0.50%	0.02%	0.01%	0.01%	<b>PASSED</b>
H17 <2.00%	0.14%	0.15%	0.16%	<b>PASSED</b>
H18 <0.50%	0.02%	0.01%	0.01%	<b>PASSED</b>
H19 <1.50%	0.11%	0.12%	0.13%	<b>PASSED</b>
H20 <0.50%	0.02%	0.01%	0.01%	<b>PASSED</b>
H21 <0.50%	0.08%	0.04%	0.06%	<b>PASSED</b>
H22 <0.50%	0.02%	0.01%	0.01%	<b>PASSED</b>
H23 <1.50%	0.10%	0.09%	0.10%	<b>PASSED</b>
H24 <0.50%	0.02%	0.01%	0.01%	<b>PASSED</b>
H25 <1.50%	0.09%	0.07%	0.09%	<b>PASSED</b>

**Supply Voltage Dips, Interruptions and Overvoltages**

(EN50160 does not specify limits for this category, these are informative figures)

Magnitude	10-100 msec	0.1-0.5 Sec.	0.5-1 Sec.	1-3 Sec.	3-20 Sec.	20-60 Sec.	1-3 Min	>3 Min
<b>Dips:</b>								
0% - 10%	--	-	-	-	-	-	-	-
10% - 15%	--	-	-	-	-	-	-	-
15% - 30%	--	-	-	-	-	-	-	-
30% - 60%	- 1	-	-	-	-	-	-	-
60% - 99%	3 -	-	-	-	-	-	-	-
<b>Interruptions:</b>								
99% - 100%	--	-	-	-	-	-	-	-
<b>Swells:</b>								
0% - 110%	--	-	-	-	-	-	-	-
110% - 120%	--	-	-	-	-	-	-	-
120% - 140%	--	-	-	-	-	-	-	-
140% - 160%	--	-	-	-	-	-	-	-
160% - 200%	--	-	-	-	-	-	-	-
200% -	--	-	-	-	-	-	-	-

**Transient Overvoltages**

(EN50160 does not specify limits for this category, these are informative figures)

Magnitude	Counts
-----------	--------

0% - 110%	-
110% - 120%	-
120% - 140%	-
140% - 160%	-
160% - 200%	224
200% -	-

---

### Interharmonic Voltage

(EN50160 does not specify limits for this category. All shown figures are 95% values)

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
TID	0.18%	0.18%	0.19%
IH00	0.00%	60.5%	69.1%
IH01	0.12%	0.11%	0.11%
IH02	0.05%	0.05%	0.06%
IH03	0.02%	0.02%	0.02%
IH04	0.02%	0.02%	0.02%
IH05	0.02%	0.02%	0.02%
IH06	0.02%	0.02%	0.02%
IH07	0.02%	0.02%	0.02%
IH08	0.02%	0.01%	0.02%
IH09	0.01%	0.01%	0.02%
IH10	0.01%	0.02%	0.01%
IH11	0.02%	0.02%	0.02%
IH12	0.06%	0.06%	0.06%
IH13	0.01%	0.01%	0.01%
IH14	0.01%	0.01%	0.01%
IH15	0.05%	0.05%	0.05%
IH16	0.06%	0.06%	0.06%
IH17	0.02%	0.02%	0.02%
IH18	0.03%	0.02%	0.03%
IH19	0.01%	0.01%	0.01%
IH20	0.02%	0.01%	0.01%
IH21	0.01%	0.01%	0.01%
IH22	0.02%	0.02%	0.02%
IH23	0.01%	0.01%	0.01%
IH24	0.01%	0.02%	0.01%
IH25	0.01%	0.01%	0.01%

Fuente: Industria 240 delta principal, Week #1 (03/04/2017 15:20:00.0 to 06/04/2017 11:45:00.0).

### Análisis de los resultados del informe y las gráficas de la auditoría PQ

Las corrientes armónicas presentes en las fases o líneas vivas, producen calentamiento y pérdidas por efecto joule. Es recomendable aumentar el calibre de los conductores ante la presencia de armónicos. Los armónicos individuales que superan la tolerancia durante el periodo de medición son el 5, 7, 9 y 11.

“Los armónicos producen calentamientos excesivos en motores de inducción, este calentamiento produce pérdidas en los núcleos ferromagnéticos, además de producir pares parásitos en la flecha del motor, produciendo efectos de freno. El calentamiento y freno en los motores reduce la vida útil del aislante,

incrementa las necesidades de mantenimiento, rebobinado y reduce la vida útil de las máquinas” (Calidad de la energía. s.f.).

“Las corrientes armónicas introducen error en los equipos de medición, estas corrientes se introducen en los discos de inducción de los medidores comerciales y error en los medidores digitales, por tanto los errores en la facturación pueden significar sobrecostos”. (Calidad de la energía. s.f.).

El error dependiendo de la clase de precisión y exactitud se incrementa en rangos desde 0.3 a 1.2 % en presencia de quinto armónico.

“Las fuerzas electrodinámicas producidas por corrientes instantáneas asociadas a los armónicos causan exceso de vibraciones y ruido a equipos como transformadores, capacitores, reactores. El calentamiento de capacitores es causado por fenómenos de conducción e histéresis en el dieléctrico, estas pérdidas son proporcionales al cuadrado del voltaje, por consiguiente, los capacitores son muy sensibles a sobrecargas de cualquier tipo”. (Calidad de la energía. s.f.).

“Las pérdidas en el transformador se incrementan debido a la presencia de armónicos Los armónicos producen funcionamiento erróneo de protecciones y controladores de equipos críticos para la producción”. (Calidad de la energía. s.f.).

La presencia de armónicos puede ser tolerada por un largo período de tiempo, pero llega el momento que inesperadamente causa problemas de *flicker*, ya que el conductor de neutro se abre.

Es muy común que, ante severos problemas de armónicos, se incrementen los efectos debido a la introducción de nuevos equipos o por cambio de equipos. La presencia inesperada de *flicker* debido a la severidad de los armónicos puede llegar a reducir la vida útil de las luminarias.

### 3.7.2. Medición 2

Nominal Voltage (Un) = 237 V

#### Power Frequency

Range	Threshold	Compliance	
60 Hz +1%/-1%	99.5%	100.0%	<b>PASSED</b>
60 Hz +4%/-6%	100.0%	100.0%	<b>PASSED</b>

#### Supply Voltage Variations

Range	Compliance:		CHA	CHB	CHC
	Threshold				
237	10%		95.0%	100.0%	+10%/-
	100.0%		<b>PASSED</b>		
237	15%		100.0%	100.0%	+10%/-
	100.0%		<b>PASSED</b>		

#### Rapid Voltage Changes

Not available

#### Flicker

Range	Compliance:	CHA	CHB	CHC
	Threshold			
<1	95.0%	100.0%	100.0%	<b>PASSED</b>

#### Supply Voltage Unbalance

Range	Threshold	Compliance	
0-2%	95.0%	100.0%	<b>PASSED</b>

#### Harmonics

All shown figures are 95% values

Limit(% of Un)	A	B	C	Status
THD <8.00%	2.68%	2.68%	2.48%	<b>PASSED</b>
H02 <2.00%	0.05%	0.04%	0.04%	<b>PASSED</b>
H03 <5.00%	0.36%	0.43%	0.37%	<b>PASSED</b>
H04 <1.00%	0.03%	0.04%	0.04%	<b>PASSED</b>
H05 <6.00%	1.78%	1.73%	1.83%	<b>FAILED</b>
H06 <0.50%	0.04%	0.05%	0.04%	<b>PASSED</b>
H07 <5.00%	1.76%	1.80%	1.49%	<b>FAILED</b>
H08 <0.50%	0.03%	0.03%	0.03%	<b>PASSED</b>
H09 <1.50%	0.21%	0.13%	0.16%	<b>FAILED</b>
H10 <0.50%	0.02%	0.01%	0.01%	<b>PASSED</b>
H11 <3.50%	0.55%	0.42%	0.46%	<b>FAILED</b>
H12 <0.50%	0.02%	0.01%	0.01%	<b>PASSED</b>



H13	<3.00%	0.64%	0.48%	0.42%	PASSED
H14	<0.50%	0.02%	0.01%	0.02%	PASSED
H15	<0.50%	0.30%	0.14%	0.23%	PASSED
H16	<0.50%	0.02%	0.02%	0.02%	PASSED
H17	<2.00%	0.54%	0.68%	0.56%	PASSED
H18	<0.50%	0.02%	0.02%	0.02%	PASSED
H19	<1.50%	0.46%	0.32%	0.32%	PASSED
H20	<0.50%	0.02%	0.01%	0.01%	PASSED
H21	<0.50%	0.13%	0.10%	0.16%	PASSED
H22	<0.50%	0.02%	0.01%	0.01%	PASSED
H23	<1.50%	0.20%	0.23%	0.22%	PASSED
H24	<0.50%	0.02%	0.01%	0.01%	PASSED
H25	<1.50%	0.13%	0.11%	0.11%	PASSED

### Supply Voltage Dips, Interruptions and Overvoltages

(EN50160 does not specify limits for this category, these are informative figures)

Magnitude	10-100 msec	0.1-0.5 Sec.	0.5-1 Sec.	1-3 Sec.	3-20 Sec.	20-60 Sec.	1-3 Min	>3 Min
<b>Dips:</b>								
0% - 10%	--	-	-	-	-	-	-	-
10% - 15%	--	-	-	-	-	-	-	-
15% - 30%	--	-	-	-	-	-	-	-
30% - 60%	--	-	-	-	-	-	-	-
60% - 99%	--	-	-	-	-	-	-	-
<b>Interruptions:</b>								
99% - 100%	--	-	-	-	-	-	-	-
<b>Swells:</b>								
0% - 110%	--	-	-	-	-	-	-	-
110% - 120%	--	-	-	-	-	-	-	-
120% - 140%	--	-	-	-	-	-	-	-
140% - 160%	--	-	-	-	-	-	-	-
160% - 200%	--	-	-	-	-	-	-	-
200% -	--	-	-	-	-	-	-	-

### Transient Overvoltages

(EN50160 does not specify limits for this category, these are informative figures)

Magnitude	Counts
0% - 110%	-
110% - 120%	-
120% - 140%	-
140% - 160%	-
160% - 200%	54
200% -	-

### Interharmonic Voltage

(EN50160 does not specify limits for this category. All shown figures are 95% values)

	A	B	C
TID	0.35%	0.33%	0.32%
IH00	0.00%	47.8%	53.6%
IH01	0.18%	0.16%	0.16%
IH02	0.09%	0.08%	0.07%
IH03	0.04%	0.04%	0.04%
IH04	0.04%	0.04%	0.04%
IH05	0.04%	0.04%	0.04%
IH06	0.04%	0.04%	0.04%
IH07	0.03%	0.03%	0.03%
IH08	0.03%	0.02%	0.02%
IH09	0.02%	0.02%	0.02%
IH10	0.03%	0.03%	0.02%
IH11	0.04%	0.03%	0.03%
IH12	0.12%	0.10%	0.11%
IH13	0.04%	0.03%	0.04%
IH14	0.04%	0.03%	0.03%
IH15	0.12%	0.11%	0.11%
IH16	0.14%	0.15%	0.14%
IH17	0.08%	0.08%	0.08%
IH18	0.07%	0.07%	0.07%
IH19	0.03%	0.02%	0.02%
IH20	0.02%	0.02%	0.02%

IH21	0.02%	0.02%	0.02%
IH22	0.02%	0.02%	0.02%
IH23	0.02%	0.02%	0.02%
IH24	0.02%	0.02%	0.02%
IH25	0.01%	0.01%	0.01%

Fuente: Industria Week #2 (11/10/2017 11:40:00.0 to 12/10/2017 14:00:00.0).

Las soluciones para disminuir el desbalance permanente en las redes de distribución, es el balanceo de cargas y el replanteo de cargas monofásicas y bifásicas.

“El desbalance es un problema de eficiencia energética en los sistemas eléctricos de potencia, que produce demandas y pérdidas de energía adicionales generalmente desatendidos por dar mayor importancia a otros aspectos y por los usuarios polifásicos. La disminución del desbalance produce aumento en la eficiencia energética de los sistemas y permite un mejor aprovechamiento capacidad de transporte y distribución. El desbalance de corriente es tomado como una incidencia del usuario en la calidad del producto del suministro de energía eléctrica”. (Calidad de la energía. s.f.).

“El *flicker* puede ser causado por la combinación de variaciones elevadas de la corriente y una impedancia de red también elevada, puede causar variaciones excesivas de la tensión de alimentación. Si las variaciones de tensión se repiten a intervalos cortos de tiempo, se producirán fluctuaciones de la iluminación, principalmente de aquella emitida por luminarias incandescentes”. (Calidad de la energía. s.f.).

En general, la forma de solución conduce a alimentar estas cargas, de variación rápida, mediante circuitos exclusivos o bien sobredimensionar cables y transformadores de alimentación. Sin embargo, esta solución puede ser muy costosa, por lo cual se recomienda realizar auditoría PQ de forma periódica y

monitorear la reducción de las variaciones de voltaje al implementar soluciones de este tipo.

### 3.7.3. Medición 3

Nominal Voltage (Un) = 237 V

#### Power Frequency

Range	Threshold	Compliance			
60	1%	99.5%	Hz	100.0%	+1%/-
		<b>PASSED</b>			
60 Hz +4%/-6%	100.0%	100.0%		<b>PASSED</b>	

#### Supply Voltage Variations

Range	Compliance: Threshold	CHA	CHB	CHC	
160 V +10%/-10%	95.0%	0.0%	0.0%	21.4%	<b>FAILED</b>
160 V +10%/-15%	100.0%	0.0%	0.0%	21.4%	<b>FAILED</b>

#### Rapid Voltage Changes

Not available

#### Flicker

Range	Compliance: Threshold	CHA	CHB	CHC
<1 95.0%	100.0%	100.0%	100.0%	<b>PASSED</b>

#### Supply Voltage Unbalance

Range	Threshold	Compliance	
0-2% 95.0%	0.0%		<b>FAILED</b>

#### Harmonics

All shown figures are 95% values

Limit(% of Un)	A	B	C	Status
THD <8.00%	3.66%	3.35%	4.58%	<b>PASSED</b>
H02 <2.00%	0.05%	0.05%	0.29%	<b>PASSED</b>
H03 <5.00%	0.45%	0.78%	3.55%	<b>PASSED</b>
H04 <1.00%	0.04%	0.04%	0.20%	<b>PASSED</b>
H05 <6.00%	2.54%	2.40%	2.68%	<b>FAILED</b>
H06 <0.50%	0.05%	0.06%	0.07%	<b>PASSED</b>
H07 <5.00%	2.34%	2.02%	2.06%	<b>FAILED</b>
H08 <0.50%	0.04%	0.04%	0.04%	<b>PASSED</b>
H09 <1.50%	0.42%	0.54%	0.56%	<b>FAILED</b>
H10 <0.50%	0.03%	0.03%	0.03%	<b>PASSED</b>
H11 <3.50%	1.15%	1.50%	0.88%	<b>FAILED</b>
H12 <0.50%	0.03%	0.03%	0.03%	<b>PASSED</b>
H13 <3.00%	1.25%	0.89%	0.50%	<b>PASSED</b>
H14 <0.50%	0.04%	0.03%	0.02%	<b>PASSED</b>
H15 <0.50%	0.47%	0.62%	0.19%	<b>FAILED</b>
H16 <0.50%	0.02%	0.02%	0.02%	<b>PASSED</b>
H17 <2.00%	0.31%	0.41%	0.16%	<b>PASSED</b>
H18 <0.50%	0.02%	0.02%	0.01%	<b>PASSED</b>
H19 <1.50%	0.30%	0.29%	0.10%	<b>PASSED</b>
H20 <0.50%	0.02%	0.02%	0.01%	<b>PASSED</b>
H21 <0.50%	0.11%	0.15%	0.11%	<b>PASSED</b>
H22 <0.50%	0.02%	0.02%	0.01%	<b>PASSED</b>

H23	<1.50%	0.13%	0.16%	0.04%	<b>PASSED</b>
H24	<0.50%	0.02%	0.02%	0.01%	<b>PASSED</b>
H25	<1.50%	0.11%	0.09%	0.05%	<b>PASSED</b>

### Supply Voltage Dips, Interruptions and Overvoltages

(EN50160 does not specify limits for this category, these are informative figures)

Magnitude	10-100 msec	0.1-0.5 Sec.	0.5-1 Sec.	1-3 Sec.	3-20 Sec.	20-60 Sec.	1-3 Min	>3 Min
<b>Dips:</b>								
0% - 10%	--	-	-	-	-	-	-	-
10% - 15%	--	-	-	-	-	-	-	-
15% - 30%	--	-	-	-	-	-	-	-
30% - 60%	--	-	-	-	-	-	-	-
60% - 99%	--	-	-	-	-	-	-	-
<b>Interruptions:</b>								
99% - 100%	--	-	-	-	-	-	-	-
<b>Swells:</b>								
0% - 110%	--	-	-	-	-	-	-	-
110% - 120%	--	-	-	-	-	-	-	-
120% - 140%	--	-	-	-	-	-	-	-
140% - 160%	--	-	-	-	-	-	-	-
160% - 200%	--	-	-	-	-	-	-	-
200% -	--	-	-	-	-	-	-	-

### Transient Overvoltages

(EN50160 does not specify limits for this category, these are informative figures)

Magnitude	Counts
0% - 110%	-
110% - 120%	-
120% - 140%	-
140% - 160%	-
160% - 200%	129
200% -	-

### Interharmonic Voltage

(EN50160 does not specify limits for this category. All shown figures are 95% values)

	A	B	C
TID	0.43%	0.45%	0.30%
IH00	0.12%	0.14%	0.13%
IH01	0.15%	0.16%	0.14%
IH02	0.10%	0.10%	0.09%
IH03	0.04%	0.05%	0.04%
IH04	0.05%	0.06%	0.04%
IH05	0.05%	0.06%	0.04%
IH06	0.05%	0.06%	0.04%
IH07	0.04%	0.05%	0.03%
IH08	0.04%	0.05%	0.03%
IH09	0.04%	0.04%	0.03%
IH10	0.10%	0.12%	0.09%
IH11	0.05%	0.06%	0.05%
IH12	0.27%	0.25%	0.14%
IH13	0.06%	0.07%	0.03%
IH14	0.12%	0.26%	0.11%
IH15	0.04%	0.06%	0.03%
IH16	0.11%	0.19%	0.09%
IH17	0.03%	0.04%	0.02%
IH18	0.05%	0.05%	0.03%
IH19	0.03%	0.03%	0.02%
IH20	0.03%	0.05%	0.02%
IH21	0.03%	0.03%	0.02%
IH22	0.03%	0.04%	0.02%
IH23	0.03%	0.03%	0.01%
IH24	0.03%	0.03%	0.02%
IH25	0.03%	0.03%	0.02%

Fuente: Industria, Week #3 (22/05/2018 15:59:21.0 to 25/05/2018 07:15:00.0).

En las mediciones realizadas con el analizador de redes trifásicas se registraron variaciones en el voltaje de la fase C. El voltaje nominal para esta fase debe estar en valores cercanos a 208 V, sin embargo, las variaciones en esta fase producen un porcentaje de regulación de voltaje superior a lo que requieren algunos equipos, en este caso presenta valores de hasta 17.7 % y su tolerancia se encuentra en 8 %.

“Existe mala regulación de voltaje a lo interno de la instalación eléctrica, durante la tercera inspección del sitio se observa que no se cuenta con una referencia sólida a tierra. Existe una condición de neutro flotante que produce variaciones de tensión debido a la falta de una referencia a tierra en el tablero principal, lo cual puede llegar a dañar las cargas y puede llegar a introducir tensiones de toque peligrosas para el personal que opera los equipos”. (Calidad de la energía. s.f.).

Tal como se observa en el informe las tensiones fase a fase BC y CA se reducen en ciertos periodos y producen desbalances de voltaje de hasta 21.3 %. Si el neutro de una red o instalación eléctrica se rompe en el lado de la fuente (transformador 300 kVA) o del lado de la carga, este flotará y perderá su referencia a tierra.

No existe una tierra física común en el tablero principal, esto provoca que el voltaje de las líneas BC y CA oscile de acuerdo al desbalance de carga presente en la instalación. La falta de una referencia común entre el transformador y el tablero principal presenta algunas señales visibles, estas señales pueden ser parpadeo de luces y elevaciones o caídas repentinas del voltaje que producen calentamiento de conductores o paro de maquinaria. Para

verificar que el neutro este sólidamente aterrizado no debe existir tensión entre neutro y tierra y si existiese debe ser menor a 2 V.

Se recomienda, según estándares internacionales, que el desbalance de tensión no supere el 2 %, según Normas NEMA (NEMA MG1 – 12.45) un desequilibrio de tensión que supere 1 % se considera un peligro para el funcionamiento de un motor. Existe una condición de neutro flotante que produce variaciones de tensión debido a la falta de una referencia a tierra en el tablero principal, lo cual puede dañar las cargas y llegar a introducir tensiones de toque peligrosas para el personal que opera los equipos.

Se observa una onda distorsionada de corriente debido a que el arranque es realizado por medio de la rectificación de 6 pulsos con el variador, además de un alto contenido de armónicos introducidos por este *driver*. Los armónicos introducidos por el variador de frecuencia son el 5to, 7mo, 11vo, 13vo, 17vo, 19, 21, etc., al incrementar las frecuencias del voltaje y corriente se incrementan las pérdidas en el motor y se produce calentamiento, acelerando el envejecimiento y deterioro del aislante del motor.

Debido al alto contenido armónico se introducen corrientes de secuencia negativa que intentan hacer girar al motor en sentido opuesto, produciendo calentamientos, cabeceo y vibraciones en el eje del motor. A este tipo de corrientes armónicas elevadas como en este caso que se registran valores por encima de 35 amperios para el quinto armónico, se atribuyen la circulación de corrientes por los ejes del motor, sobretodo en ejes no aislados.

El quinto armónico es responsable del daño en los rodamientos del motor, esta falla es conocida como erosión eléctrica en los rodamientos. Esta erosión se

observa como picaduras a lo largo de la pista del rodamiento, producidas por corrientes parásitas introducidas por el arrancador suave.

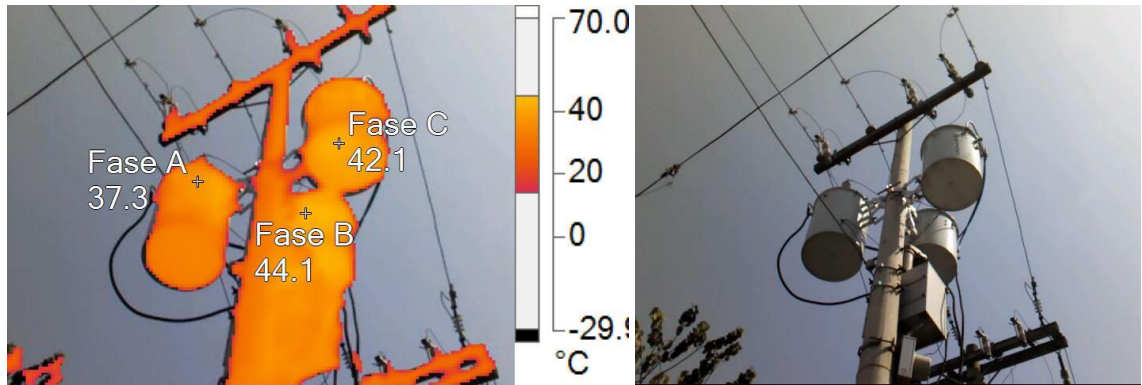
### 3.8. Informe de termografía

El informe de termografías presenta la tendencia de temperaturas en equipos críticos como el transformador y el interruptor principal. Los equipos de criticidad media como el variador de frecuencia, motores y banco de capacitores, solo se tiene la medición luego del cambio de transformador.

#### 3.8.1. Transformador

Inspection Date:	4/3/2017 3:03:37 PM	Location	Poste
Equipment	Transformer 3X50 kVA	Equipment Name:	TP
Ambient Air Temp:	28 °C	Wind Speed	
Load (%)	95	Max Rated Load:	
Exception Temperature:		Potential Problem	Overload
Recommended Action	Change	Repair Priority:	Alta
Emissivity:	0.77	Reflected Temperature:	24.5 °C
Camera Manufacturer		Camera:	TiS45-15090911

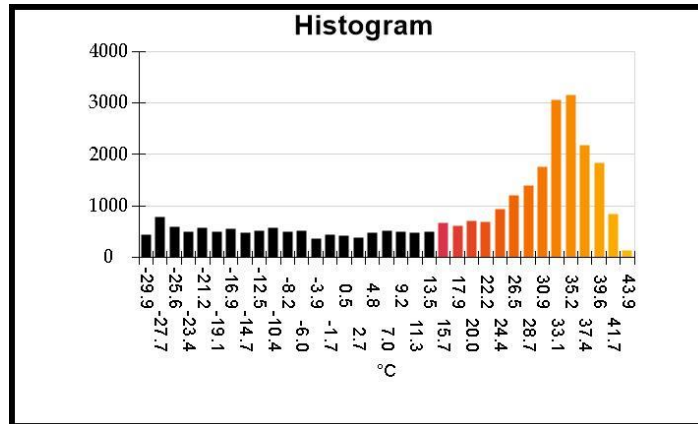
## Transformer 3x50 kVA



IR\_00521.IS2

Visible Light Image

Se observan temperaturas fuera del rango de operación normal del transformador. La temperatura de operación normal de un transformador de este tipo debe estar cercana a la temperatura ambiente entre 25 a 32 °C. Temperaturas elevadas producen pérdidas y deterioran el aislamiento.



Fuente: elaboración propia

Inspection Date:	4/3/2017 3:04:03 PM	Location	Poste
Equipment	Transformer 3X50 kVA	Equipment Name:	TP
Ambient Air Temp:	28 °C	Wind Speed	
Load (%)	95	Max Rated Load:	
Exception		Potential Problem	Overload
Temperature:		Repair Priority:	Alta
Recommended Action		Reflected Temperature:	24.0 °C
Emissivity:	0.77		

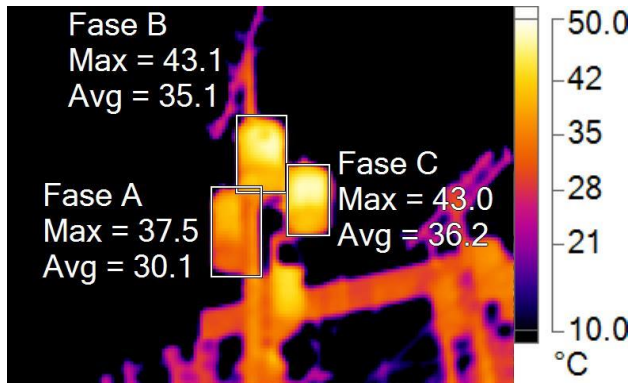


Camera Manufacturer

Camera:

TiS45-  
15090911

### Transformador de distribución 3X50 KVA



IR\_00522.IS2

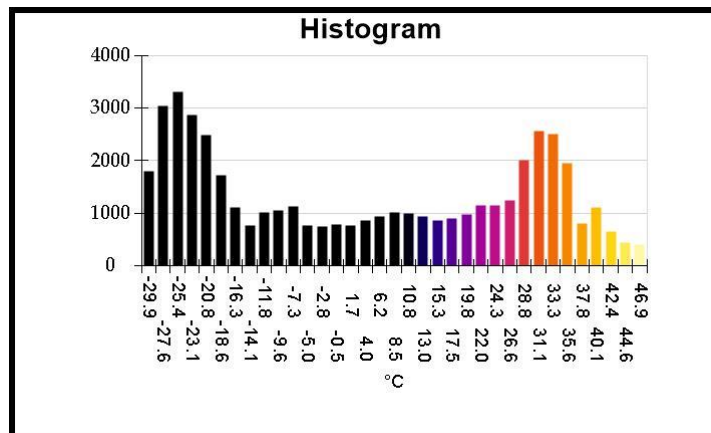
Visible Light Image

Se observan temperaturas fuera del rango de operación normal del transformador. La temperatura de operación normal de un transformador de este tipo debe estar cercana a la temperatura ambiente entre 25 a 32°C. Temperaturas elevadas producen pérdidas y deterioran el aislamiento.

La temperatura máxima del punto más caliente durante sobrecargas del transformador se establece para las bobinas en 150 °C y en ningún caso debe sobrepasar 190 °C.

Se detectó que durante el día, al funcionar la línea de producción de pastas se supera la capacidad del transformador.

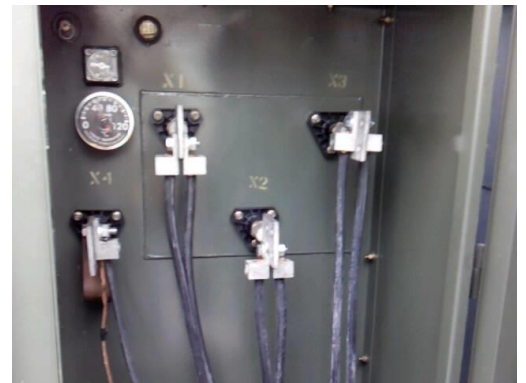
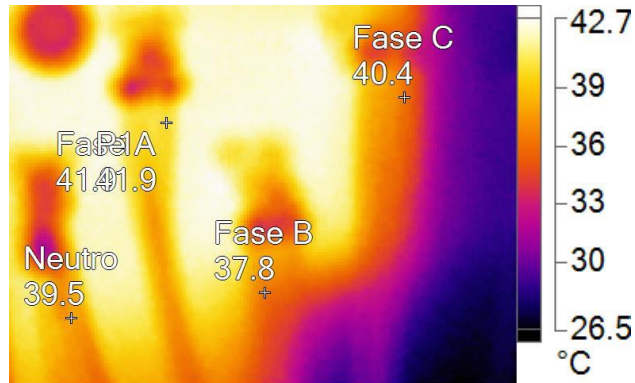
Alta presencia de armónicos de corriente incrementa el calentamiento del transformador.



Fuente: elaboración propia

Inspection Date:	12/18/2017 4:28:29 PM	Location	Exterior
Equipment	Transformador 300 kVA	Equipment Name:	TPM
Ambient Air Temp:	21 °C	Wind Speed	
Load (%)	50	Max Rated Load:	
Exception		Potential Problem	Neutro flotante
Temperature:		Repair Priority:	
Recommended		Reflected Temperature:	22.0 °C
Action		Camera:	TiS45-
Emissivity:	0.90		15090911
Camera			
Manufacturer			

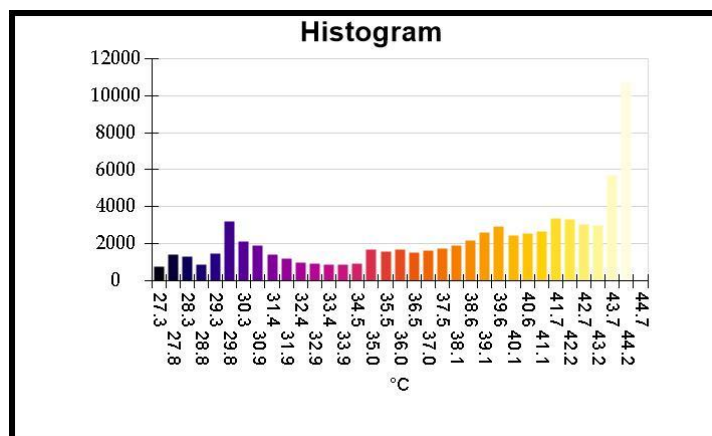
### Terminales de transformador 300 kVA



IR\_00870.IS2

Visible Light Image

No se observan temperaturas fuera de rango.  
Calentamiento por armónicos.

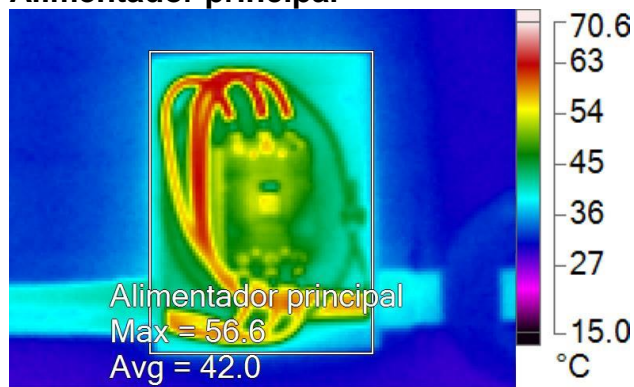


Fuente: elaboración propia.

### 3.8.1.1. Interruptores

Inspection Date:	4/3/2017 3:19:28 PM	Location	Planta
Equipment	Interruptor	Equipment Name:	IP
Ambient Air Temp:	28 °C	Wind Speed	
Load (%)	95	Max Rated Load:	500 A
Exception		Potential Problem	Sobrecarga
Temperature:		Repair Priority:	Alta
Recommended Action		Reflected Temperature:	22.0 °C
Emissivity:	0.77	Camera:	TiS45-15090911
Camera Manufacturer			

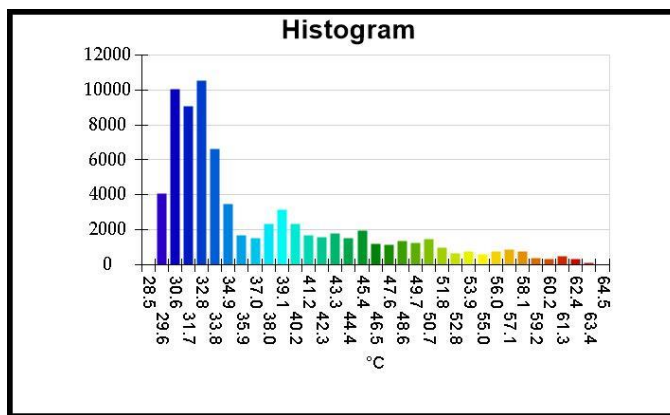
#### Alimentador principal



#### IR\_00523.IS2

Se observa calentamiento de los cables, durante la inspección se midió la corriente y se concluye que este se encuentra sobrecargado. Cuando fluye demasiada corriente a través del conductor se incrementan las pérdidas. Los armónicos de corriente incrementan las pérdidas por efecto joule.

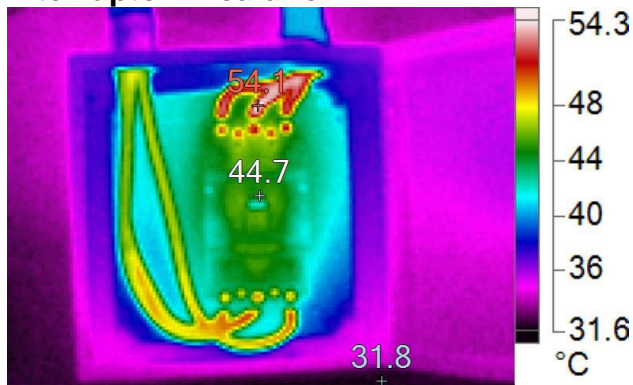
Visible Light Image



Fuente: elaboración propia.

Inspection Date:	4/3/2017 4:14:21 PM	Location	Planta
Equipment	Interruptor línea 1	Equipment Name:	IL1
Ambient Air Temp:	28 °C	Wind Speed	
Load (%)	95	Max Rated Load:	400 A
Exception		Potential Problem	Sobrecarga
Temperature:		Repair Priority:	Alta
Recommended Action		Reflected Temperature:	24.0 °C
Emissivity:	0.98	Camera:	TiS45-15090911
Camera Manufacturer			

### Interruptor línea uno



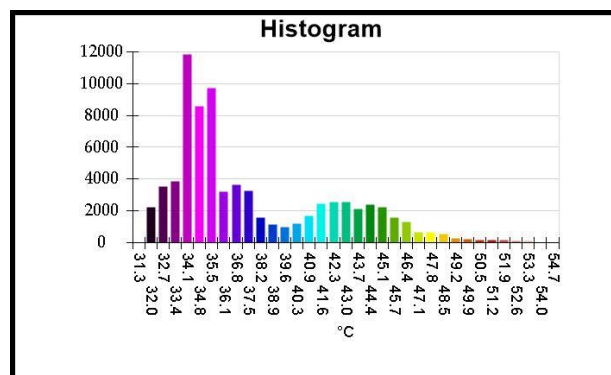
IR\_00525.IS2

Se observa calentamiento de los cables, durante la inspección se midió la corriente y se concluye que este se encuentra sobrecargado. Cuando fluye demasiada corriente a través del conductor se incrementan las pérdidas.



Visible Light Image

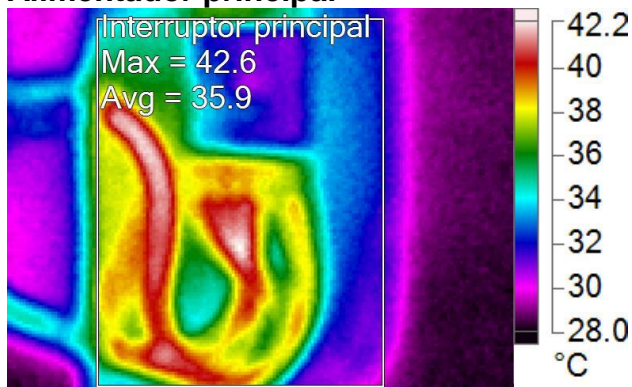
Los armónicos de corriente incrementan las pérdidas por efecto joule.



Fuente: elaboración propia.

Inspection Date:	12/8/2017 3:46:27 PM	Location	Planta
Equipment	Interrupcion	Equipment Name:	IP
Ambient Air Temp:	28 °C	Wind Speed	
Load (%)	50	Max Rated Load:	800 A
Exception	23 °C	Potential Problem	Neutro flotante
Temperature:		Repair Priority:	Media
Recommended Action	Auditoría PQ	Reflected Temperature:	22.0 °C
Emissivity:	0.77	Camera:	TiS45-
Camera Manufacturer			15090911

### Alimentador principal

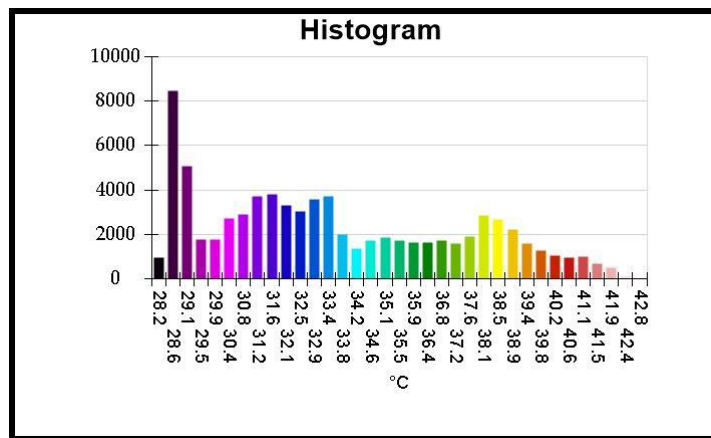


### IR\_00842.IS2

Se observa calentamiento de los cables, durante la inspección se midió la corriente y se concluye que este se encuentra sobrecargado. Cuando fluye demasiada corriente a través del conductor se incrementan las pérdidas.

### Visible Light Image

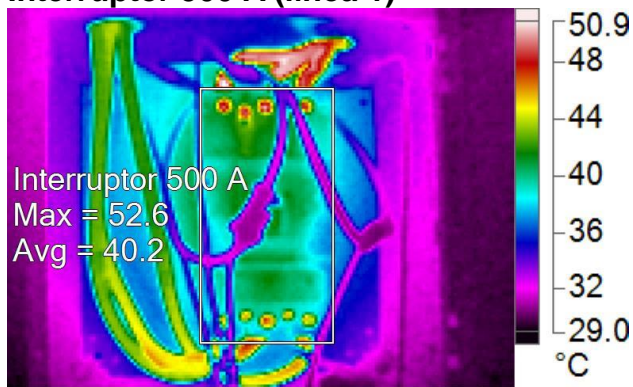
Los armónicos de corriente incrementan las pérdidas por efecto joule.



Fuente: elaboración propia.

Inspection Date:	1/15/2018 11:19:45 AM	Location	Planta
Equipment	Interruptor	Equipment Name:	IP
Ambient Air Temp:	28 °C	Wind Speed	
Load (%)	70	Max Rated Load:	500 A
Exception Temperature:	23 °C	Potential Problem	Neutro flotante, PQ
Recommended Action	Auditoría PQ	Repair Priority:	Media
Emissivity:	0.77	Reflected Temperature:	22.0 °C
Camera Manufacturer		Camera:	TiS45-15090911

### Interruptor 500 A (línea 1)

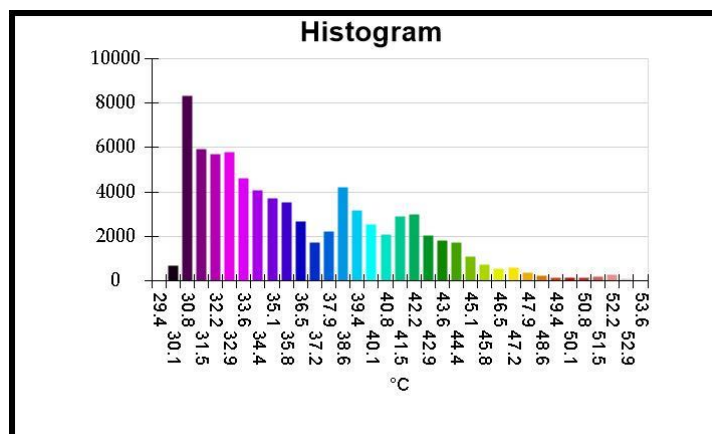


IR\_02170.IS2

El interruptor debería operar a temperatura no mayor a 35 °C. Se infiere que el calentamiento se debe al desbalance de fases, armónicos y falta de una referencia a tierra.



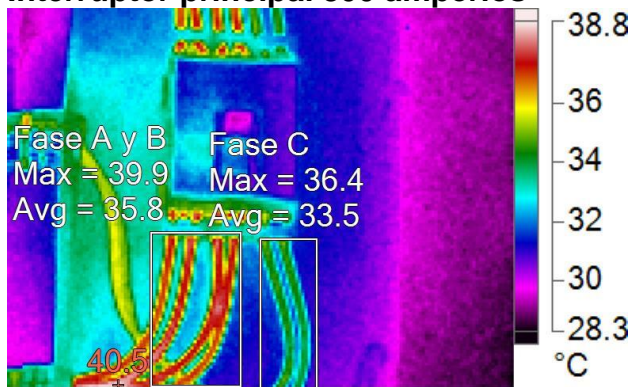
Visible Light Image



Fuente: elaboración propia.

Inspection Date:	5/22/2018 2:47:38 PM	Location	Planta
Equipment	Interruptor	Equipment Name:	IP
Ambient Air Temp:	23 °C	Wind Speed	
Load (%)	50%	Max Rated Load:	800 A
Exception Temperature:		Potential Problem	Neutro flotante
Recommended Action		Repair Priority:	Media
Emissivity:	0.90	Reflected Temperature:	22.0 °C
Camera Manufacturer		Camera:	TiS45-15090911

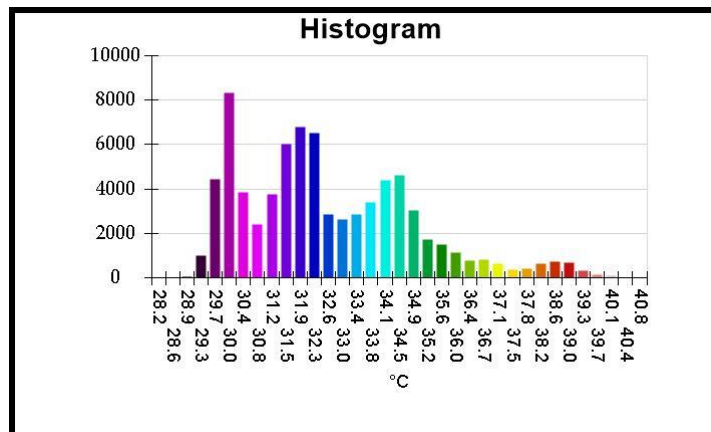
### Interruptor principal 800 amperios



IR\_02173.IS2

Visible Light Image

No se observan temperaturas fuera del rango normal de operación. Sin embargo, se observa una diferencia de 3°C entre las fases A-B y la fase C, producto del desbalance de cargas. La capacidad del interruptor y cables es suficiente para soportar la carga, la elevación de temperatura se debe al desequilibrio, armónicos y falta de una referencia a tierra.



Fuente: elaboración propia.

### 3.8.1.2. Capacitores

Inspection Date:	5/22/2018 2:48:10 PM	Location	Planta
Equipment	Capacitors	Equipment Name:	BC
Ambient Air Temp:	23 °C	Wind Speed	
Load (%)	50	Max Rated Load:	46.6 kVAR
Exception Temperature:		Potential Problem	Armónicos
Recommended Action		Repair Priority:	
Emissivity:	0.90	Reflected Temperature:	22.0 °C
Camera Manufacturer		Camera:	TiS45-15090911

#### Banco de capacitores

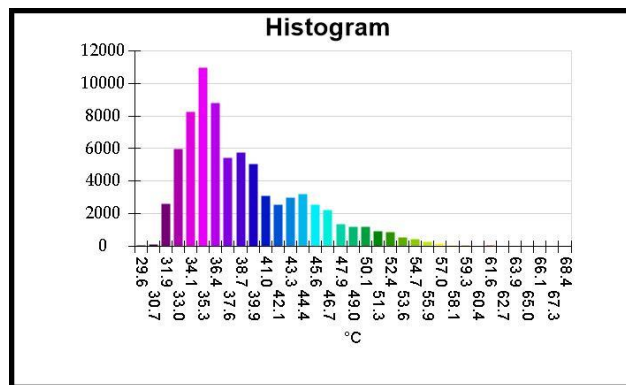


IR\_02176.IS2

Se observa calentamiento en los capacitores y las resistencias de descarga operan de forma continua. Se observa calentamiento en los cables y contactores de las etapas del banco de capacitores. Se detectó una mala configuración del controlador y alto contenido de armónicos.



Visible Light Image



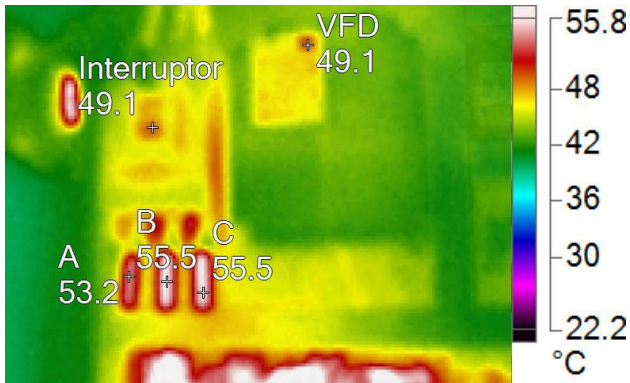
Fuente: elaboración propia.



### 3.8.2. Variador de frecuencia

Inspection Date:	5/22/2018 3:49:14 PM	Location	Planta
Equipment	VFD Línea 1	Equipment Name:	VFD1
Ambient Air Temp:	23 °C	Wind Speed	
Load (%)	75	Max Rated Load:	
Exception		Potential Problem	Armónicos
Temperature:		Repair Priority:	Media
Recommended Action		Reflected Temperature:	22.0 °C
Emissivity:	0.90	Camera:	TiS45-15090911
Camera Manufacturer			

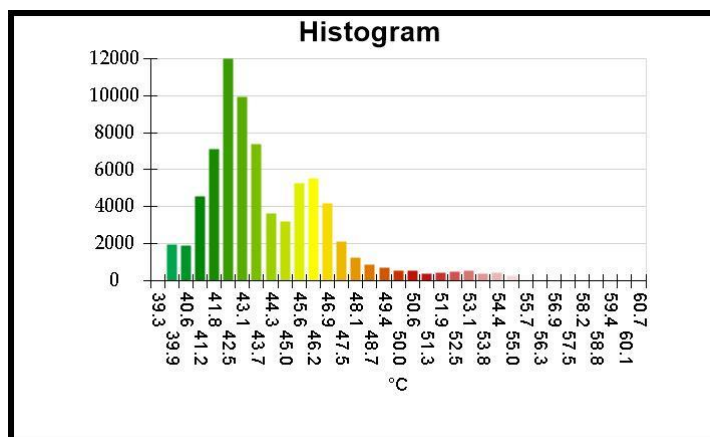
#### Variador de frecuencia línea uno



IR\_02187.IS2

Visible Light Image

Se observan temperaturas elevadas en los cables de salida del interruptor.



Fuente: elaboración propia.

### 3.8.3. Motores

Inspection Date:	5/22/2018 3:51:32 PM	Location	Línea 1
Equipment	Motor	Equipment Name:	Motor 5.5 kW
Ambient Air Temp:	23°C	Wind Speed	
Load (%)	80	Max Rated Load:	5.5 kW
Exception		Potential Problem	Calentamiento
Temperature:		Repair Priority:	Media
Recommended Action		Reflected Temperature:	22.0 °C
Emissivity:	0.90	Camera:	TiS45-15090911
Camera Manufacturer			

#### Motor 5.5 kW - línea 1

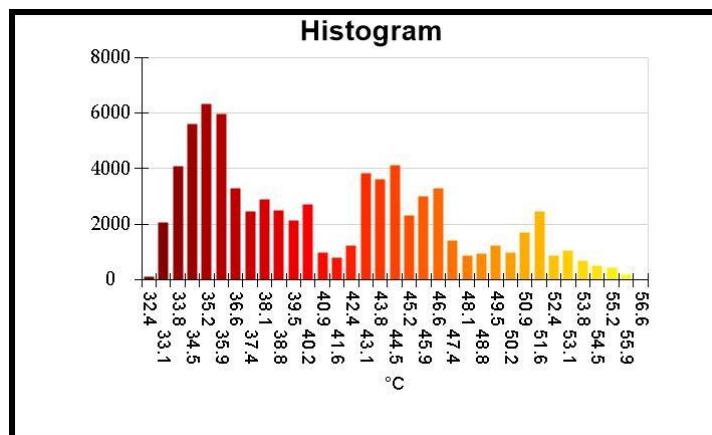


IR\_02191.IS2



Visible Light Image

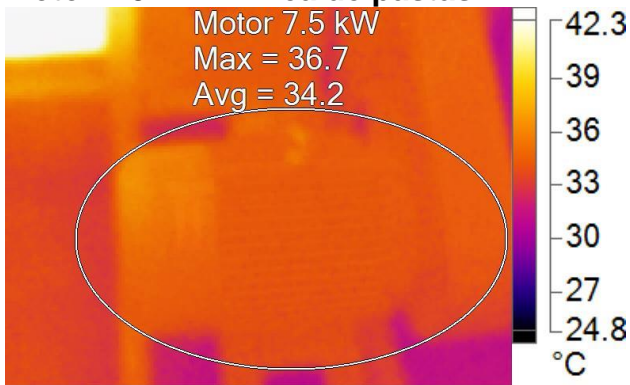
Se observa calentamiento en el motor, esta condición puede deberse al desbalance de tensión, contenido de armónicos y por una mala referencia a tierra. Los calentamientos excesivos de los motores pueden acelerar el deterioro del aislante, cambio de cojinetes y desbalance en el eje.



Fuente: elaboración propia.

Inspection Date:	5/22/2018 3:53:46 PM	Location	Línea 1
Equipment	Motor	Equipment Name:	Motor 7.5 kW
Ambient Air Temp:	23°C	Wind Speed	
Load (%)	80	Max Rated Load:	7.5 kW
Exception		Potential Problem	
Temperature:		Repair Priority:	
Recommended Action		Reflected Temperature:	22.0 °C
Emissivity:	0.90	Camera:	TiS45-15090911
Camera Manufacturer			

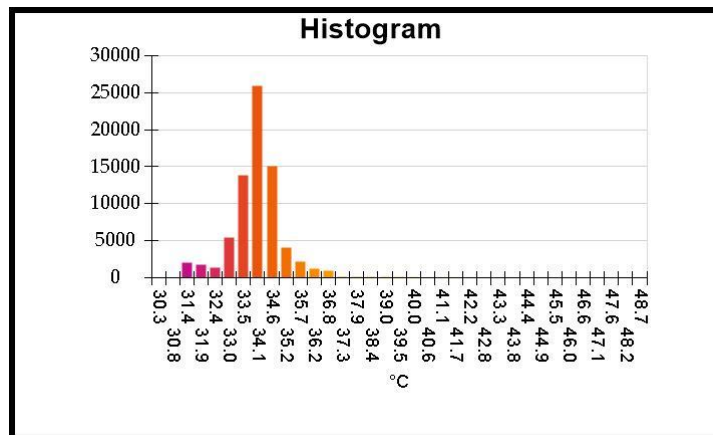
**Motor 7.5 kW - Línea de pastas**



**IR\_02192.IS2**

**Visible Light Image**

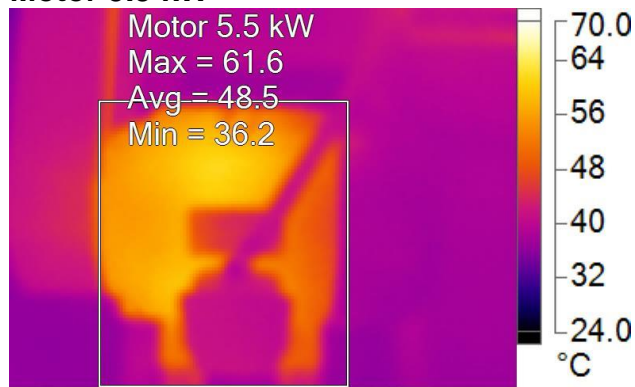
No se observan calentamientos excesivos en el motor, las temperaturas de operación se encuentran en rango. Sin embargo, es necesario considerar que existe desbalance de tensión, contenido de armónicos y ausencia de referencia a tierra.



Fuente: elaboración propia.

Inspection Date:	5/22/2018 3:54:29 PM	Location	Línea 1
Equipment	Motor	Equipment Name:	Motor 5.5 kW
Ambient Air Temp:	23°C	Wind Speed	
Load (%)	80	Max Rated Load:	5.5 kW
Exception		Potential Problem	Calentamiento
Temperature:		Repair Priority:	Media
Recommended Action		Reflected Temperature:	24.0 °C
Emissivity:	0.90	Camera:	TiS45-15090911
Camera Manufacturer			

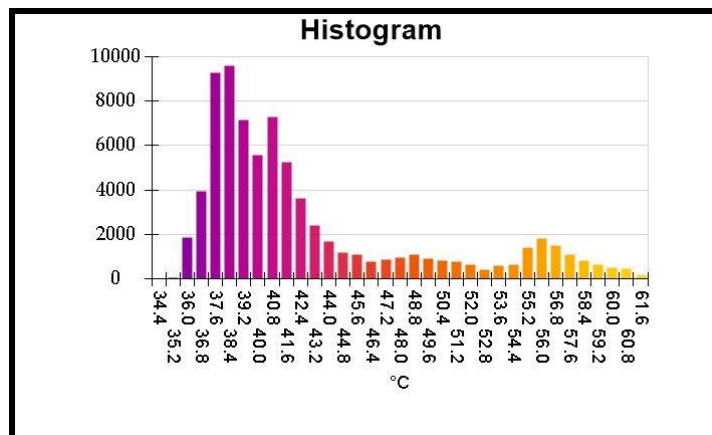
### Motor 5.5 kW



### IR\_02193.IS2

Se observa calentamiento en el motor, esta condición puede deberse al desbalance de tensión, contenido de armónicos y por una mala referencia a tierra. Los calentamientos excesivos de los motores pueden acelerar el deterioro del aislante, cambio de cojinetes y desbalance en el eje.

### Visible Light Image



Fuente: elaboración propia.

Inspection Date:	5/22/2018 3:54:54 PM	Location	Línea 1
Equipment	Motor	Equipment Name:	Motor 2.2 kW
Ambient Air Temp:	23°C	Wind Speed	
Load (%)	90	Max Rated Load:	2.2 kW
Exception		Potential Problem	Calentamiento
Temperature:		Repair Priority:	Media
Recommended Action		Reflected Temperature:	22.0 °C
Emissivity:	0.90	Camera:	TiS45-15090911
Camera Manufacturer			

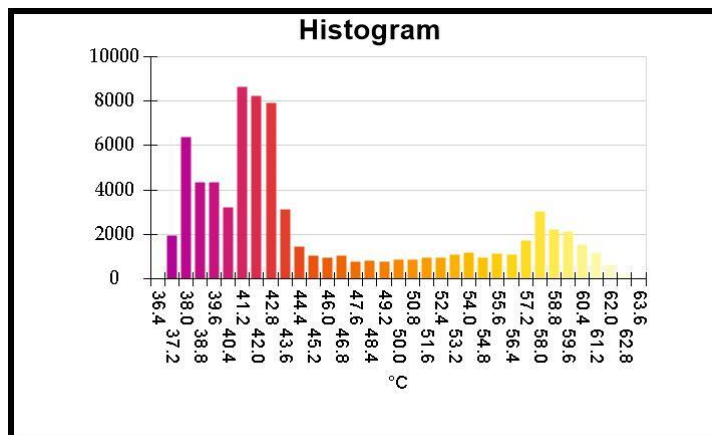
### Motor 2.2 kW - línea uno



### IR\_02194.IS2

Se observa calentamiento en el motor, esta condición puede deberse al desbalance de tensión, contenido de armónicos y por una mala referencia a tierra. Los calentamientos excesivos de los motores pueden acelerar el deterioro del aislante, cambio de cojinetes y desbalance en el eje.

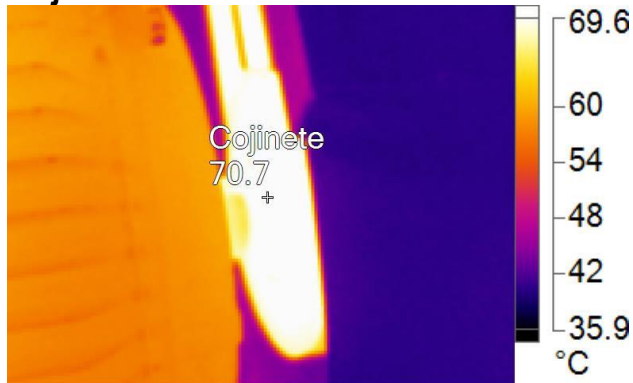
### Visible Light Image



Fuente: elaboración propia.

Inspection Date:	5/22/2018 3:55:24 PM	Inspected By:	
Equipment	Cojinete de motor	Location	Eje de motor
Ambient Air Temp:	23 °C	Equipment Name:	Cojinete
Load (%)	90	Wind Speed	
Exception		Max Rated Load:	2.2 kW
Temperature:		Potential Problem	Calentamiento
Recommended Action		Repair Priority:	Media
Emissivity:	0.90	Reflected Temperature:	22.0 °C
Camera Manufacturer	Fluke Thermography	Camera:	TiS45-15090911

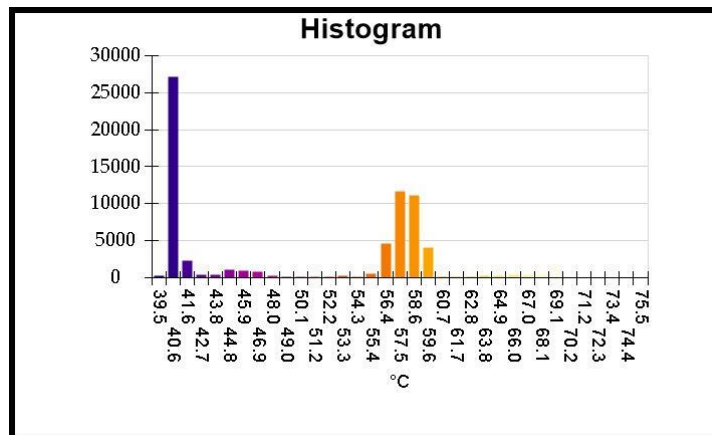
### Cojinete del motor 2.2 kW



IR\_02195.IS2

Visible Light Image

Se observa calentamiento en los cojinetes de motor. Esta condición se debe al desequilibrio de fases, presencia de armónicos y deterioro acelerado derivado de los problemas de alimentación. Circulación de corrientes parasitas en los cojinetes y transferencia de calor a la faja.



Fuente: elaboración propia.



**Termografía tesis IR\_02197.IS2**



**Visible Light Image**

Fuente: elaboración propia.

### **3.9. Análisis modal de fallas y efectos**

Los objetivos de mantenimiento deberán estar alineados con los de la empresa y deben responder a las necesidades del modelo de gestión de mantenimiento para reducir las fallas por calidad de energía. A continuación listamos los objetivos principales del modelo.

- Asegurar la disponibilidad y fiabilidad de los sistemas, instalaciones, máquinas y equipos para maximizar la producción.
- Reducir a su máxima expresión las fallas y aumentar la vida útil de los sistemas, instalaciones, máquinas y equipos para reducir costos.
- Mantener el funcionamiento regular de la producción sin distorsiones, realizar las reparaciones de los sistemas, instalaciones, máquinas y equipos con la calidad requerida.
- Conservar el buen estado de los sistemas, instalaciones, máquinas y equipos, eliminando paros/arranques continuos que puedan empeorar el rendimiento y afectar la conservación de la energía. (Manual del ingeniero de mantenimiento, s.f.).

Una falla es el deterioro o desperfectos de los sistemas, instalaciones, máquinas y equipos que no permiten un funcionamiento normal. El análisis de

fallas permitirá detectar la falla y repararla hasta establecer su origen y prever que no se repita en el futuro. Para analizar el origen de las fallas las clasificaremos de la siguiente forma.

- a) Mal diseño o error de cálculo: existe la posibilidad que el fabricante de los equipos desconozca el entorno electromagnético al cual se someterán las máquinas o equipos. Se estima que esta clasificación representa el 12 % del total de fallas. Es una condición que no se puede revertir y es probable que se presente un alto índice de desperfectos.
- b) Defectos de fabricación: se debe tomar en cuenta la calidad de los materiales durante la fabricación de equipos, máquinas, sistemas o instalaciones. Se estima que esta clasificación representa el 10.45 % del total de fallas.
- c) Mal uso o desuso: este tipo de fallas es la más común y frecuente, generalmente son producidas por desconocimiento de la operación o por utilizarla para realizar tareas para las cuales no fueron diseñados los equipos, máquinas, sistemas o instalaciones. Se estima que esta clasificación representa el 40% del total de fallas.
- d) Desgaste natural o envejecimiento: este tipo de fallas se presentan por la continuidad de uso y por la antigüedad de los equipos, máquinas, sistemas o instalaciones; alcanzando altos niveles de desgaste, abrasión, corrosión, picadura, etc. Se estima que esta clasificación representa el 10.45 % del total de fallas.
- e) Fenómenos naturales u otras causas: las condiciones atmosféricas o maniobras en los sistemas eléctricos de transmisión y distribución pueden influir en el funcionamiento normal de los equipos, máquinas, sistemas o instalaciones produciendo daños o interrupciones en la producción. Se estima que esta clasificación representa el 27% del total de fallas. (Manual del ingeniero de mantenimiento, s.f):



La clasificación anterior es importante desde el punto de vista de la producción, sin embargo, desde la perspectiva de mantenimiento se clasificarán de la siguiente forma:

- a) En función de la capacidad de trabajo:
  - Averías totales: ponen fuera de servicio a toda la instalación.
  - Averías parciales: ponen fuera de servicio a una parte de la instalación.
  
- b) En función de la forma en que se originan:
  - Repentinas: no existe un precedente de algún evento que pueda anunciar la aparición de la falla y generalmente producen daños o interrupciones en la producción.
  - Progresivas: generalmente, se origina por un desgaste paulatino de algún elemento o pieza por abrasión, desajuste, corrosión, picadura, calentamiento. Las fallas de este tipo presentan alertas antes de producirse, advierten sobre el riesgo de falla y por medio del monitoreo se puede estimar la vida útil y programar el cambio antes de que se produzca la avería. (Manual del ingeniero de mantenimiento, s.f)

### **3.9.1. Listado de equipos**

El análisis de fallas de criticidad se realizará para los equipos asociados a las líneas de producción 1 y 2. Los equipos más significativos que presentan un historial de fallas serán analizados de acuerdo al método de árbol de mantención.

Tabla X. Listado de cargas significativas

No.	Cantidad	Equipo	Línea de producción	Etapa en la producción
1	1	Motor	1	Laminado
2	1	Motor	1	Precocido
3	5	Motor ½ HP	1	Secado
4	6	Motor ¼ HP	1	Secado
5	1	Motor ¾ HP	1	Secado
6	1	Motor 1 HP	1	Secado
7	1	Ventilador	1	Secado
8	2	Motor 2 kW	1	Secado
9	2	Motor 5.5 kW	1	Secado
10	3	Motor 7.5 kW	1	Secado
11	2	Empacadoras	1	Condimento
12	1	Motor mezcla	1	Condimento
13	1	Bomba de aceite	1	Empaque
14	1	Compresor	1	Empaque
15	1	Motor 9.5 kW	2	Mezcla
16	2	Motor ½ HP	2	Mezcla
17	1	Motor 2.2 kW	2	Laminado
18	1	Motor 4 kW	2	Laminado
19	1	Motor	2	Pre-cocido
20	5	Motor ¼ HP	2	Termo encogido
21	2	Motor ¾ HP	2	Termo encogido
22	1	Motor 1 HP	2	Termo encogido
23	2	Empacadoras	2	Condimento
24	1	Motor mezcla	2	Condimento
25	4	Extractor 5 HP	1, 2	Servicios
26	1	Bomba de agua 2 HP	1, 2	Servicios
27	2	Lavadoras 3.5 kW		Servicios
28	1	Secadora 4.15 kW		Servicios
29	5	Iluminación 2.4 kW		Servicios
30	1	Transformador 3X50 kVA en poste	1, 2	
31	1	Banco de capacitores 13.4 kVAR (3 celdas)	1, 2	

32	1	Transformador PAD MOUNTED 300 kVA	1, 2	
33	1	Banco de capacitores de 46.6 kVAR (5 celdas)	1, 2	
34	1	Variador de frecuencia	1	
35	1	Variador de frecuencia 3.7 kW	2	
36	1	Variador de frecuencia 5.5 kW	2	
37	2	Variador de frecuencia 0.75 kW	2	
38	4	Variador de frecuencia 1.5 kW	2	
39	1	Interruptor principal de 500 A	1, 2	
40	1	Interruptor principal de 800 A	1, 2	

Fuente: elaboración propia.

### 3.9.2. Fallas típicas en la forma de onda

El analizador de redes trifásicas capturó formas de onda de voltaje y corriente durante la elaboración de la auditoría PQ, las oscilografías obtenidas servirán para identificar las causas, efectos y posibles soluciones a los problemas de calidad de energía (DRANETZ, 2017, p. 2)

“Un impulso de voltaje se presenta como una forma de onda de alta frecuencia que puede tener amplitud positiva o negativa”. (DRANETZ, 1997, p. 138). Un impulso medible entre conductores portadores de corriente es un evento de modo normal y un impulso común a todos los conductores portadores de corriente y medible con referencia a tierra es un evento de modo común. Muchos eventos tienen componentes de ambos en modo normal y modo común.

El impulso puede alcanzar los circuitos lógicos sensibles de tres formas: a) camino capacitivo: la capacitancia en el embobinado del transformador, capacitancia entre cables y cables de medición conectados cerca de los cables de alimentación; b) Desviación en diodos de la fuente de alimentación de equipos: los condensadores de filtro o condensadores de desviación de la fuente de alimentación pueden presentar una alta resistencia equivalente en serie a la frecuencia del impulso, permitiendo el paso del impulso; c) eventos de modo común: es una elevación del voltaje respecto a tierra de la fuente, que produce un impulso tal que los condensadores de derivación y los circuitos lógicos referenciados a tierra se ven forzados a absorber esta energía. Los efectos de los eventos de impulsos varían de un equipo a otro y de una instalación a otra. (DRANETZ, 2013, p. 60).

La capacidad del impulso requerida para perturbar una carga se ve afectada por los siguientes factores:

- Amplitud, duración y frecuencia del impulso
- Sistemas de filtrado y capacitores en derivación
- Diseño y velocidad de operación de semiconductores
- Sistema de tierras

Síntomas: corrupción o caída del disco duro, error de paridad en equipo de cómputo, falla en la fuente de alimentación, falla de componentes, bloqueos, corrupción de memoria, falla en SCR y desajustes de velocidad o controladores.

Causas: cargas controladas por SCR, variadores de frecuencia, cableado e interruptores defectuosos, cierre de contactores o relé, desconexión o arranque de cargas, corrección del factor de potencia, rayo y fotocopiadoras.

Posible solución: reemplazo de cableado defectuoso, reemplazo de interruptores defectuosos, añadir sistema de amortiguación para contactores y relé, instalar equipos de tratamiento de calidad de energía (supresores de picos, filtros, acondicionadores de onda, sistemas de UPS), mover la fuente de perturbaciones o la carga sensible.

La falla por un *dip* se presenta por el decremento por un periodo corto de tiempo del voltaje. El *dip* reduce la potencia entregada a la carga, provocando que la carga se apague o que opere en forma errática si el voltaje se reduce demasiado o si el *dip* o *sag* es de mayor duración. Por ejemplo, si en una fuente de alimentación de una carga electrónica que almacena energía en los filtros de capacitores se presenta un *sag*, la fuente continua operando con la energía almacenada. Sin embargo, si el *sag* dura mucho tiempo la fuente caerá (DRANETZ, 2013, p. 124).

La mayoría de los *sag* que ocurren dentro de la instalación del usuario son resultado del arranque de una carga significativa. La caída de voltaje ocurre debido a la circulación de una corriente *inrush* elevada interactuando con la impedancia de los cables de alimentación y la fuente. La mayoría *de sag* que se originan en la red de distribución es resultado de la operación de fusibles, re-conectores o fallas ente fases o fase a tierra (DRANETZ, 2013, p. 124).

Síntomas: reinicios, disparo de protecciones, interrupción de procesos, caídas de voltaje, errores, registros de bajo voltaje.

Causas: falla en la red de distribución, arranque de motores, fallas o cortocircuito, falla en interruptores, falso contacto en cableado, inestabilidad del UPS.

Posibles soluciones: reparar cableado, reemplazo de interruptores, reemplazar a calibres adecuados, instalar reguladores de voltaje o acondicionadores de onda para sag, agregar un UPS.

“La distorsión de voltaje es una desviación de la forma de onda fundamental a 60 Hz. Normalmente, es causada por la interacción entre las corrientes armónicas de la carga y la combinación de la impedancia de la fuente y el sistema de distribución. Usualmente son visibles por el achatamiento y muescas en la onda de voltaje”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 9).

“La distorsión de la onda de voltaje produce calentamiento en motores y transformadores. Elevaciones de voltaje pueden causar actuación errónea de protecciones o alteraciones en las fuentes de alimentación, Los altos niveles de armónicos de voltaje reducen la vida útil de los capacitores en fuentes de alimentación”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 9).

Síntomas: calor excesivo, pérdidas de fase, alarmas de bajo voltaje, falla en motores (falla cojinetes por corrientes parasitas, sobre todo no aislados).

Causas: conmutación de fuentes de alimentación, cargas controladas por SCR, grandes sistemas de UPS, variadores de frecuencia, fuentes de alta impedancia y cableado de alta impedancia.

Posibles soluciones: mover o reemplazar cableado de cargas afectadas, instalar filtros de armónicos, reducir la impedancia de la fuente, utilizar valores RMS en lugar de valores pico en medición.

“La distorsión de la onda de corriente fluye a través de conductores no aterrizados y puede afectar la distribución eléctrica de energía en la instalación”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 9).

El efecto de las cargas sinusoidales sobre el cableado y el equipo de distribución, proporcionan la base para definir los códigos eléctricos y el diseño eléctrico para los equipos. Con un mantenimiento adecuado de las instalaciones, las corrientes de fase sinusoidal rara vez causan problemas.

La amplitud de los picos de corriente y un alto nivel de armónicos de corriente causan calentamiento y puede forzar a que las protecciones operen de forma errónea. Los armónicos de voltaje pueden incrementar en forma significativa con corrientes no lineales en sistemas de distribución de alta impedancia.

Síntomas: disparo de protecciones, calor excesivo en cableado (pérdidas por efecto joule  $I^2R$ ), calor excesivo en transformadores, corrientes de neutro excesivas.

Causas: equipo de cómputo, variadores de frecuencia, balastro electrónico, UPS.

Posibles soluciones: instalar filtro de armónicos, reducir las cargas no lineales, reducir la impedancia de la fuente de alimentación.

Los disturbios repetitivos son impulsos causados por cargas controladoras de fase-ángulo (SCR). Una alta concentración acumulativa de disturbios repetitivos puede tener efectos adversos sobre una carga, tienen una alta

probabilidad de ocurrir en un periodo tiempo crítico para la producción y afectar un componente que detenga todo el proceso.

Síntomas: falla en alimentación de circuitos, errores, bloqueos, errores de paridad en equipos de cómputo, desajustes de velocidad o controladores, ruido audible, errores en medición, falla en supresores de voltaje.

Posibles soluciones: aislar la fuente de disturbios, mover la fuente de disturbios a otro circuito, instalar dispositivos de tratamiento de la onda (supresores de picos, filtros, acondicionadores de onda, UPS).

“Las corrientes circulando por el neutro o en el conductor de tierra indican que existe desbalance en el circuito trifásico. Cuando existen ondas de corriente no sinodal la circulación de corriente por el neutro es resultado de las corrientes armónicas”. (UNE-EN 50160, 2011, p. 8).

Síntomas: calor excesivo en el neutro, calor excesivo y ruido en el transformador, voltaje elevado entre neutro y tierra.

Causas: rectificadores de onda de fase a neutro, SCR conectados entre fase y neutro, desbalance de cargas.

Posibles soluciones: incrementar el calibre del conductor de neutro, agregar transformadores de aislamiento en la carga, agregar filtros de armónicos, balancear las cargas, balancear las corrientes armónicas.



### 3.10. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad FMECA

“El modo de falla se refiere a las posibles formas en que un equipo puede fallar. En esta sección se considera cada modo de falla típico en la forma de onda para el transformador, cables de alimentación principal, interruptor principal, banco de capacitores, motores y variadores de frecuencia”. (Manual del ingeniero de mantenimiento, s.f.).

La tabla XI presenta el análisis cualitativo de los modos de fallas y efectos en relación a la severidad, detectabilidad, mantenibilidad y seguridad.

Tabla XI. **Cuadro de análisis cualitativo FMECA**

Equipo	Modo de falla	Síntomas	Causas	Consecuencias	Forma de detección	Observaciones
Motor	Dip, desequilibrio	Elevación de temperatura por armónicos, deterioro de aislamiento, saturación por sobrevoltaje, efecto de freno.	Cargas no lineales, corrientes parasitas en cojinetes, torque inverso, mal dimensionamiento de conductor.	Reducción de la vida útil, derrateo de potencia, rebobinado, paro de producción, daño a bobinas y aislamiento.	Medición de parámetros PQ y termografía	Temperaturas con cámara termográfica
Transformador	Armónicos, desequilibrio, impulsos	Elevación de temperatura por armónicos, falla de aislamiento por impulsos, saturación por sobre voltaje, inestabilidad de voltaje por alta impedancia de la fuente, impulsos en la salida de voltaje por interacción con cargas controladas por SCR.	Cargas no lineales, factor k bajo, sobrecarga, cableado de alta impedancia o mal dimensionado.	Reducción de la vida útil, derrateo de potencia, paro de producción, daño a bobinas y aislamiento.	Medición de parámetros PQ y termografía	Temperaturas con cámara termográfica y medición con analizador de redes trifásicas
Banco de capacitores	Impulso, armónicos	Elevación de temperatura, capacitores inflados, mala operación del controlador, degradación de los componentes, falla de contactores.	Resonancia, cargas no lineales, distorsión armónica, explosión de celdas.	Bajo factor de potencia, calentamiento de equipos, mayor demanda reactiva.	Medición de parámetros PQ y termografía	Temperaturas con cámara termográfica

Equipo	Modo de falla	Síntomas	Causas	Consecuencias	Forma de detección	Observaciones
Variador de frecuencia	Impulso, armónicos, disturbios repetitivos	Bloqueo o corrupción de la computadora, bloqueo o mala operación de controladores analógico/digital, error en la operación de controles de retroalimentación, error en el <i>set point</i> de velocidad del motor, falla de hardware, niveles de voltaje incorrectos en dispositivos de modulación de ancho de pulso (PWM).	Falla en la alimentación del circuito, corrupción de memoria, cambios de velocidad, falla del SCR, reinicios y bloqueo	Quema de componentes, degradación de componentes electrónicos, paro de la línea de producción	Medición de parámetros PQ y termografía	Temperaturas con cámara termográfica
Interruptor principal	Dip, armónicos	Disparo errático de la protección, calentamiento excesivo.	Distorsión armónica y mal dimensionamiento de la protección.	Paro de la línea de producción.	Medición de parámetros PQ y termografía	Temperaturas con cámara termográfica y medición con analizador de redes trifásicas

Fuente: elaboración propia.

La tabla de análisis cuantitativo considera la tasa de falla ( $\lambda$ ), confiabilidad ( $\beta$ ), tiempo de operación ( $t$ ), horas de operación ( $h$ ), número total de mantenimientos correctivos en el periodo de estudio (NMC), tiempo de paro ( $f$ ), disponibilidad ( $\epsilon$  %) y rendimiento en las mediciones 1 a la 3 ( $\eta$  %).

Tabla XII. **Cuadro de análisis cuantitativo FMECA**

Línea	Equipo	$\beta$	$\lambda$	$t$	$h$	NMC	$f$	$\epsilon$ %	$\eta$ % 1	$\eta$ % 2	$\eta$ % 3
1	Motores	60%	0.10	2,552.40	2,841.69	1.21	289.29	0.90	0.75	0.82	0.75
1	VFD	99%	0.54	1,286.40	2,786.40	-	1,500.00	0.46	0.75	0.82	0.75
2	Motores	60%	0.09	2,773.57	3,044.40	1.17	270.83	0.91	0.75	0.82	0.75
2	VFD	88%	0.49	1,544.40	3,044.40	1.00	1,500.00	0.51	0.75	0.82	0.75
1, 2	Transformador	70%	0.34	5,750.00	8,760.00	0.50	3,010.00	0.66	0.75	0.82	0.75
1, 2	Interruptor	65%	0.29	6,240.00	8,760.00	0.50	2,520.00	0.71	0.75	0.82	0.75
1, 2	Capacitores	55%	0.25	6,600.00	8,760.00	1.00	2,160.00	0.75	0.75	0.82	0.75

Fuente: elaboración propia.

La tabla mostrada a continuación presenta un resumen del análisis de criticidad realizado, el cual permitirá establecer la importancia entre los diferentes equipos y determinar la prioridad que será requerida por cada máquina según los siguientes factores

- Producción
  - 80 % -4
  - 50 a 80 % -2
  - Menor a 50% -1
  
- Influencia en el resto de la planta
  - Toda la planta -5
  - Importante -4
  - Relativa -2
  - Solo el equipo -1
  
- Importancia sobre la calidad
  - Decisiva -5
  - Importante re-trabajo - 4
  - Relativa o dentro de tolerancia -2
  - Nula -1
  
- Importancia sobre el mantenimiento, horas parada
  - < 500 horas para el cambio -1
  - 500 a 2000 horas para el cambio -2
  - > 2000 horas para el cambio -5
  
- Influencia sobre el medio ambiente
  - Grave -5
  - Relativa -2
  - Nula -1

- Importancia en la seguridad:
  - Riesgo del operario – 5
  - Riesgo del equipo – 2.
  - Relativo – (Manual del ingeniero de mantenimiento, s.f.)

“El análisis de criticidad está basado en el promedio acumulativo de fallas de los equipos significativos para la producción y que son susceptibles a los problemas de calidad de energía”. (Manual del ingeniero de mantenimiento, s.f.). Se realiza el análisis respecto a los resultados obtenidos de la encuesta PQ, auditoría PQ y las mediciones registradas en campo. Se infiere que las fallas presentadas en los equipos críticos pueden continuar o empeorar si no se implementan soluciones adecuadas en temas de calidad de energía.

Tabla XIII. **Cuadro de análisis de criticidad FMECA**

LÍNEA	EQUIPO	USO	INFLUENCIA EN LA PLANTA	HORAS DE PARO	IMPORTANCIA EN LA CALIDAD	IMPORTANCIA AMBIENTE	IMPORTANCIA EN LA SEGURIDAD	NIVEL DE CRITICIDAD
1	Motores	4	3	1	2	1	2	13
1	VFD	4	2	2	4	1	2	15
2	Motores	4	3	1	3	1	2	14
2	VFD	4	2	2	4	1	2	15
1, 2	Transformador	4	5	5	5	1	5	25
1, 2	Interruptor	4	5	5	5	1	5	25
1, 2	Capacitores	4	2	5	1	1	2	15

Fuente: elaboración propia.

El análisis de criticidad se establecerá por equipo y se calcula la eficiencia general de los equipos en cada medición. La eficiencia general de los equipos (OEE) mide la eficiencia productiva de la maquinaria respecto a su disponibilidad

y rendimiento (se utiliza el factor de derrateo total) durante las mediciones realizadas. La criticidad se analiza clasificándola de la siguiente forma:

- Equipos que presentan criticidad de 30 o mayor, alta.
- Equipos que presentan criticidad entre 10 y 30, media.
- Equipos que presentan criticidad menor a 10, baja.

Tabla XIV. **Resumen del análisis de criticidad**

Equipo	Cantidad	OEE medición 1	OEE medición 2	OEE medición 3	Criticidad
Motores L1	28	0.67	0.73	0.67	Media
VFD L1	1	0.35	0.38	0.35	Media
Motores L2	22	0.68	0.74	0.68	Media
VFD L2	8	0.38	0.41	0.38	Media
Transformador	1	0.49	0.54	0.49	Alta
Interruptor	1	0.53	0.58	0.53	Alta
Capacitores	1	0.56	0.61	0.56	Media

Fuente: elaboración propia.

### 3.11. Gestión de mantenimiento y tablero de control de indicadores

El modelo de gestión de mantenimiento para reducir las fallas por mala calidad de energía tomará como base las etapas del proceso de acción cíclica: planificar, ejecutar, controlar y actual. El tablero de control de indicadores permitirá evaluar la situación durante las tres mediciones realizadas para establecer una tendencia que permita la planificación. Las líneas base fijaran el punto de partida y los objetivos que se quieren alcanzar para la ejecución del plan. La implementación de un sistema de monitoreo de variables de calidad de energía permitirá evaluar el grado de cumplimiento de los objetivos y el control de

resultados se verifica respecto a las metas fijadas. Si existen desviaciones respecto al modelo, se debe corregir actuando sobre la planificación y ejecución, retroalimentando así el sistema a través del ciclo de mejora continua. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 15).

El tablero de control es el producto final de un sistema integrado de información de variables como voltaje, corriente, factor de potencia y potencia. “La función principal del tablero de control de variables es alimentar la base de datos para el cálculo de indicadores. La función principal del tablero de control de indicadores de calidad de energía es proporcionar información para el control de gestión, informar a la dirección para la toma de decisiones, establecer ratios de mantenimiento eléctrico y el grado de cumplimiento de los objetivos estratégicos, tácticos y operativos”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 17).

El tablero de control de indicadores se elabora a través de las etapas siguientes:

- a) Conocer la actividad productiva de la empresa.
- b) Establecer los puntos importantes de monitoreo de variables PQ.
- c) Definir objetivos y alcances de la auditoría.
- d) Definir indicadores PQ.
- e) Definir las relaciones entre el sistema de monitoreo de variables PQ para generar los indicadores del tablero de control.
- f) Definir encuestas PQ que permitan evaluar los aspectos cualitativos más importantes para el diagnóstico.
- g) Definir las tolerancias y límites de alarma dentro del cual debe permanecer el indicador.
- h) Establecer la dirección y sentido de la tendencia de los indicadores.
- i) Presentar un tablero de control que permita ver la información en forma rápida y de fácil comprensión.

- j) Generar proyecciones de tendencia para escenarios sin implementar las soluciones PQ y el escenario si se implementa.
- k) Establecer un sistema de monitoreo que permita la verificación de las medidas de mejora implementadas. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 18)

La estructura del tablero de control estará dividida en tres secciones: 1) variables de monitoreo, 2) indicadores y 3) Líneas de tendencia. Esta estructura permitirá identificar si el trayecto general o la dirección se mantienen de acuerdo a los objetivos. La sección 1, presenta histogramas de las variables de voltaje, corriente, factor de potencia y gráficas de barras para la potencia. La sección 2, utiliza gráficos de caja y bigotes para analizar por medio de estadística descriptiva si los indicadores se encuentran dentro de las tolerancias. La sección 3, presenta líneas de tendencia con respecto a las líneas base.

“Las líneas base fueron formadas durante la auditoría PQ y permiten analizar proyecciones de implementación de medidas de mejora para colocar equipos nuevos o para mejorar el desempeño energético de los que operan actualmente”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 18).

“Para administrar y ordenar la información obtenida del sistema de monitoreo y verificación de las variables de calidad de energía, es necesario considerar los siguientes aspectos: crear y mantener una base de datos actualizada, manipulación e interpretación de los indicadores en tiempo real, aplicar los conocimientos, experiencia e idoneidad para tomar decisiones basándose en el tablero de control de indicadores”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 19).

El modelo de gestión de mantenimiento para reducir las fallas por mala calidad de energía debe contar con un sistema de medición que registre variables,

calcule indicadores y realice evaluaciones o diagnósticos en tres perspectivas de tiempo.

- Histórico, evolución de los indicadores y las variables de calidad de energía.
- Presente, situación actual.
- Tendencias al futuro, líneas base que permitan visualizar cómo será la evolución de los indicadores en distintos escenarios. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 20).

“Las líneas base presentarán un escenario modelo en el cual se proyecta realizar 10 mejoras al sistema eléctrico para reducir el efecto de las fallas por mala calidad de energía eléctrica e incluirlo como una propuesta para la gestión de mantenimiento”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 20). Se propone realizar lo siguiente: 1) balance de cargas, 2) mejora al sistema de tierras, 3) instalación de supresor de picos, 4) cambio de motores de servicios por motores de alta eficiencia, 5) instalación de filtro de armónicos, 6) instalación de transformadores de aislamiento en ambas líneas de producción (posterior al VFD), 7) instalación de UPS para el control en las líneas de producción, 8) auditoría PQ, 9) instalación de una nueva línea de producción, 10) auditoría PQ.

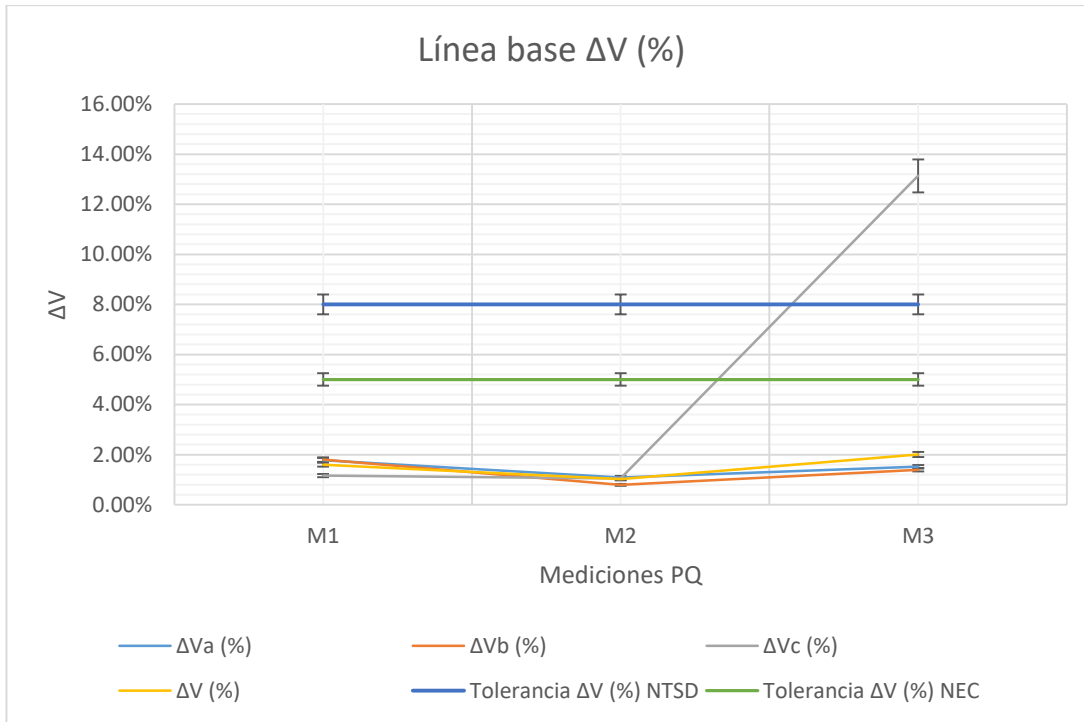
En caso de no hacer nada, se realizará una estimación de los indicadores de calidad tomando como referencia las 3 mediciones realizadas en la auditoría PQ.

Las gráficas mostradas a continuación corresponden al histórico de indicadores de calidad de energía y temperaturas para la instalación eléctrica de la industria de alimentos en la cual se realizó la auditoría PQ.



### 3.11.1. Año base de indicadores PQ

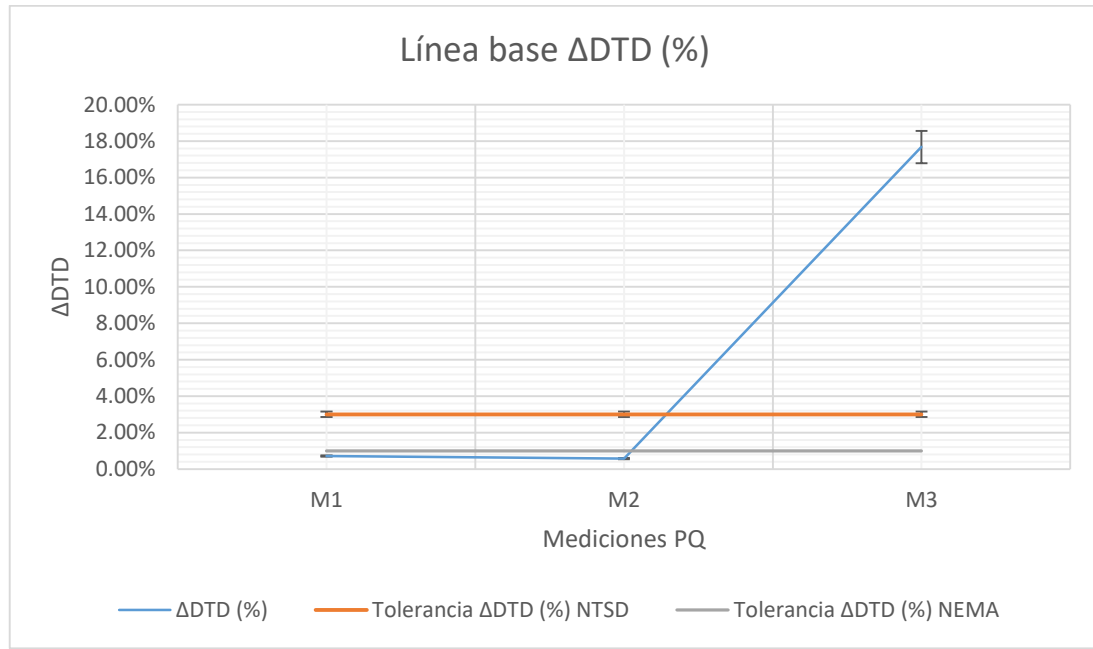
Figura 26. Año base de regulación de voltaje



Fuente: elaboración propia.

La figura 26 muestra un incremento en el indicador de regulación de voltaje en la fase C, esto se debe a una condición de neutro flotante, luego de realizar un cambio en las operaciones y cambio del transformador. El voltaje nominal para esta fase debe estar en valores cercanos a 208 V, sin embargo, las variaciones en esta fase producen un porcentaje de regulación de voltaje superior a lo que requieren algunos equipos, en este caso presenta valores de hasta 13.13 % y su tolerancia se encuentra en 8 %.

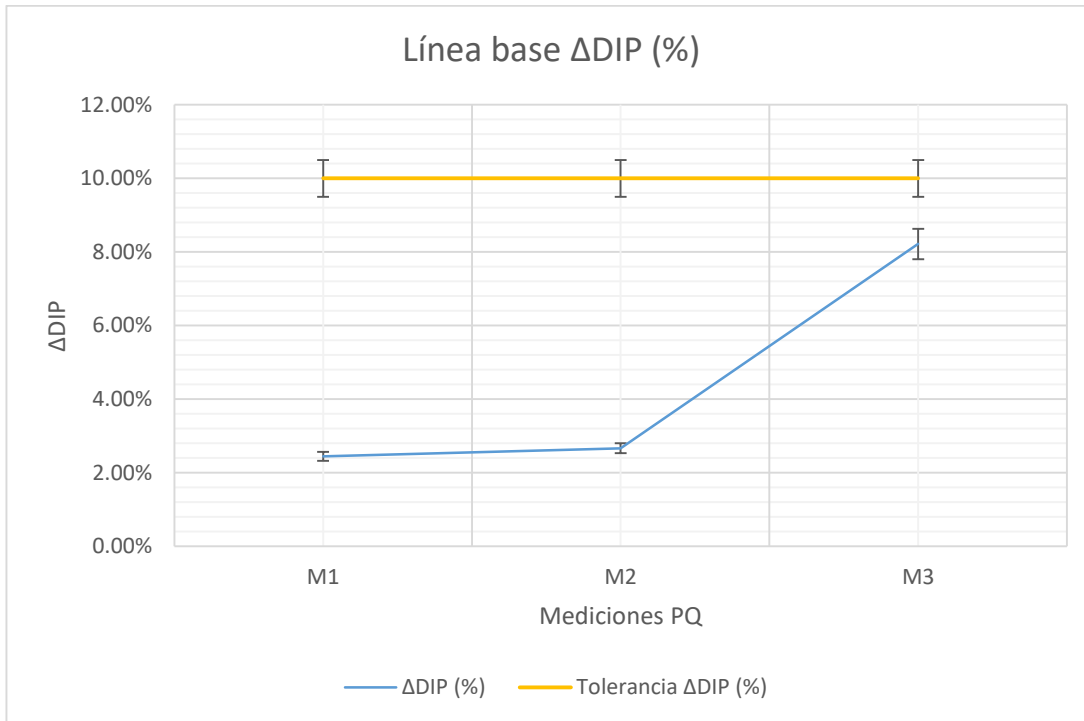
Figura 27. Año base de desbalance de voltaje



Fuente: elaboración propia.

En la figura 27 se observa un incremento en el indicador de desbalance de voltaje, esto se debe a una condición de neutro flotante, luego de realizar un cambio en las operaciones y cambio del transformador. Existe una condición de neutro flotante que produce variaciones de tensión debido a la falta de una referencia a tierra en el tablero principal, lo cual puede llegar a dañar las cargas y puede llegar a introducir tensiones de toque peligrosas para el personal que opera los equipos. El desbalance de voltaje alcanza valores de hasta 17.68 % debido a que no existe una referencia sólida a tierra, los voltajes entre fases oscilan en valores entre 188 y 246 V, siendo el voltaje nominal 240 V.

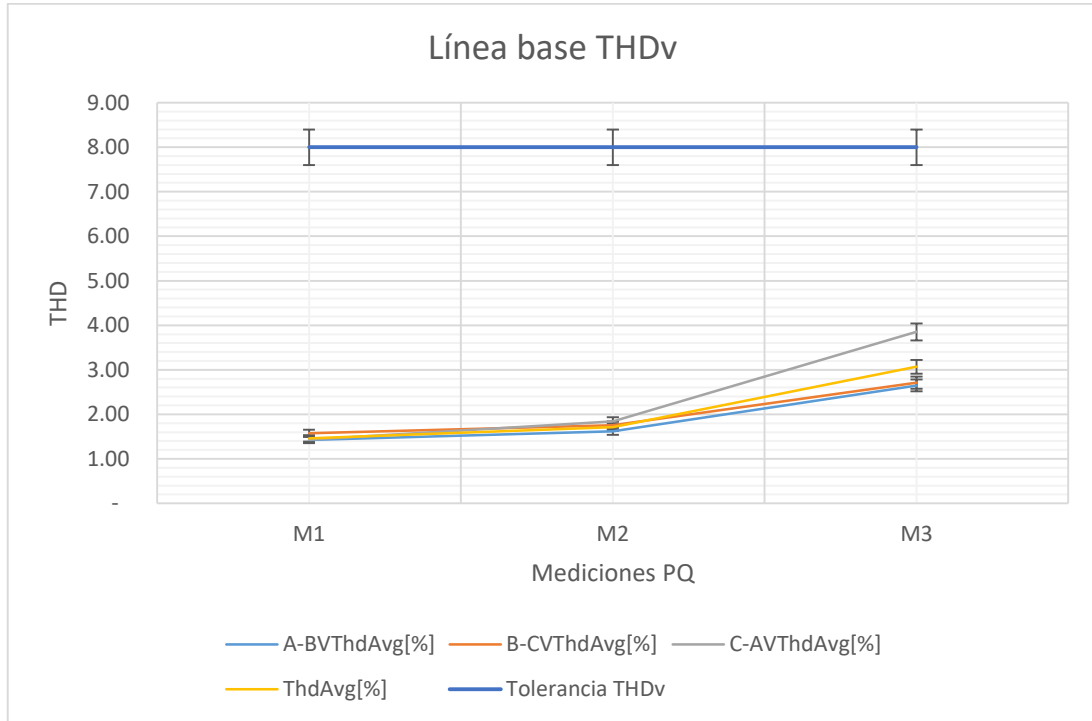
Figura 28. Año base desbalance de corriente



Fuente: elaboración propia.

En la figura 28 se ve un incremento en el indicador de desbalance de corriente, esto se debe a una condición de neutro flotante, luego de realizar un cambio en las operaciones y cambio del transformador. Las soluciones para disminuir el desbalance permanente en la redes de distribución, es el balanceo de cargas y el replanteo de cargas monofásicas y bifásicas. El desbalance de corriente alcanza valores de hasta 8.21% y corrientes de neutro de hasta 26 amperios.

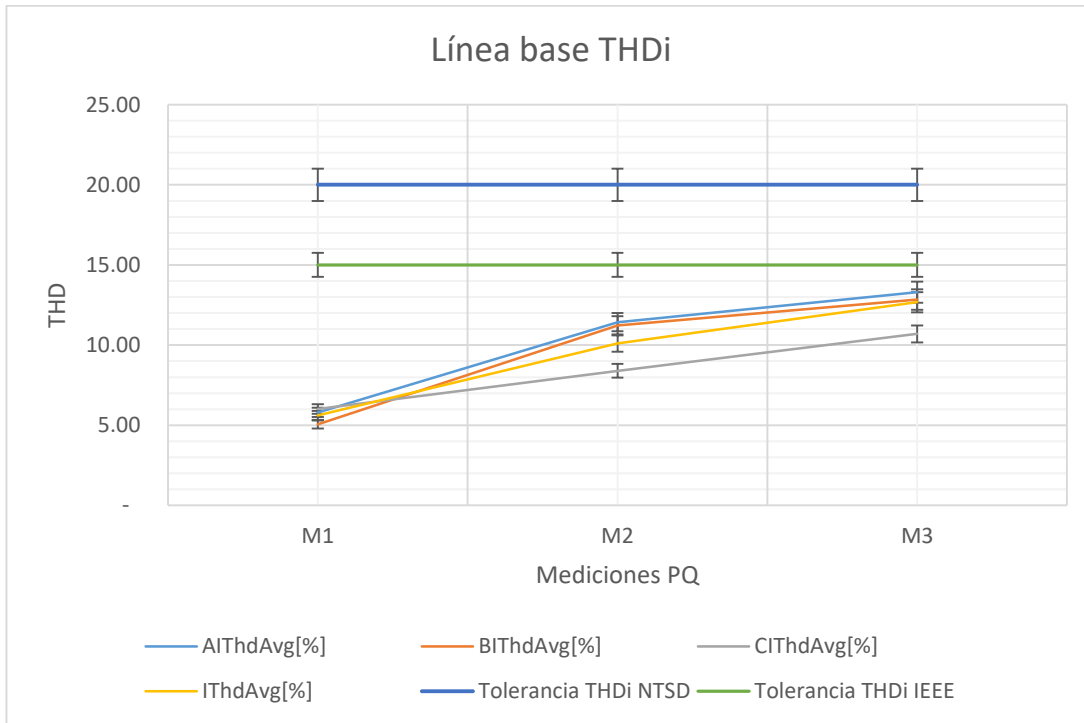
Figura 29. Año base de distorsión armónica de voltaje



Fuente: elaboración propia

La figura 29 refleja un incremento en el indicador de distorsión armónica de voltaje, esto se ve agravado debido a una condición de neutro flotante, luego de realizar un cambio en las operaciones y cambio del transformador. Sin embargo, no se supera la tolerancia de distorsión armónica de voltaje, se registran valores de hasta 3.85 % y su tolerancia es 8 %.

Figura 30. Año base de distorsión armónica de corriente



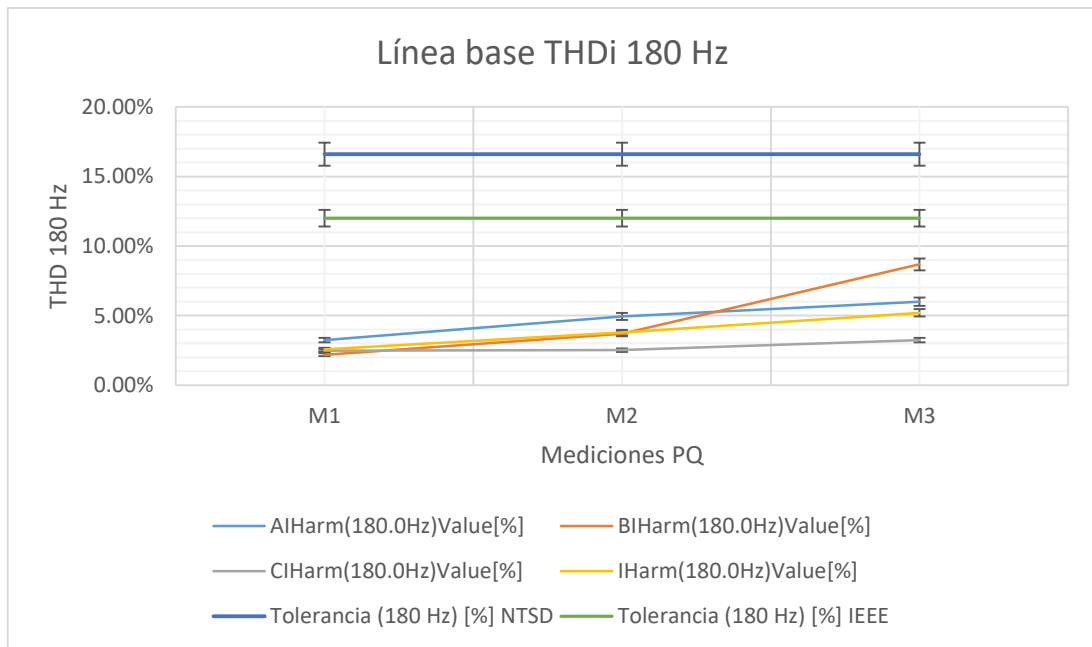
Fuente: elaboración propia.

La figura 30 muestra un incremento en el indicador de distorsión armónica de corriente, esto se ve agravado debido a una condición de neutro flotante, luego de realizar un cambio en las operaciones y cambio del transformador. “Las distorsiones armónicas de corriente deforman la onda de tensión al interactuar con la impedancia del sistema originando la reducción de la vida útil en motores y causando la operación errática de equipos electrónicos”. (Leal, G., 2008, p. 1).

Las corrientes armónicas triples de secuencia cero circulan por el conductor de neutro, sobrecargando las barras de los tableros y sub tableros de distribución a los que se encuentren conectados. Por tanto los armónicos múltiplos de tres (180 Hz, 540 Hz) registrados por el analizador de redes trifásicas DRANETZ pueden estar

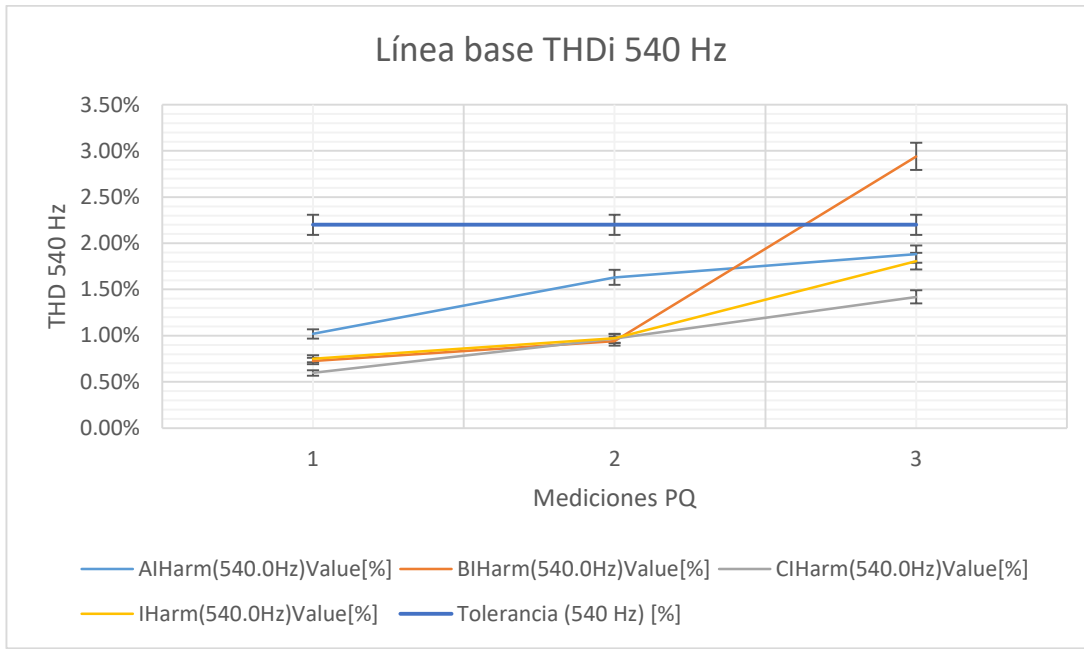
afectando los conductores de neutro de las diversas cargas, produciendo quema de equipos o reducción de la vida útil. Se observan corrientes armónicas de hasta 35 amperios para el tercer armónico, produciendo efectos adversos en el neutro y cuando no existe neutro calentamiento en los conductores de fase (Leal, G., 2008, p. 2).

**Figura 31. Año base de tercer armónico de corriente**



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Año base de noveno armónico de corriente



Fuente: elaboración propia.

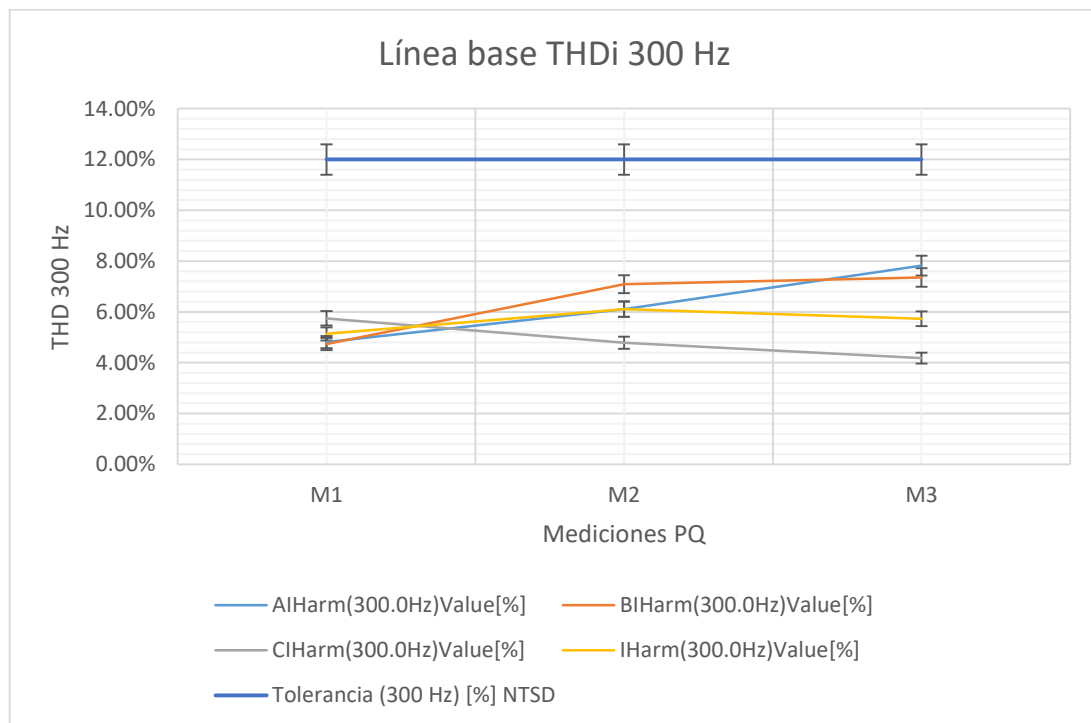
“El conductor de neutro está dimensionado para que, por él circulen corrientes iguales al valor nominal de las corrientes de fase, la distorsión en la onda de tensión y corriente de un sistema trifásico puede sobrecargar fácilmente el cable conductor”. (Leal, G., 2008, p. 2).

Los armónicos triples afectan sistemas balanceados y desbalanceados, sobrecargando los alimentadores de neutro por las excesivas corrientes que fluyen por el mismo, produciendo caídas de tensión que pueden desestabilizar la operación de equipos de cómputo y motores.

Los armónicos producen calentamientos excesivos en motores de inducción, este calentamiento produce pérdidas en los núcleos ferromagnéticos,

además de producir pares parásitos en la flecha del motor, produciendo efectos de freno. El calentamiento y freno en los motores reduce la vida útil del aislante, incrementa las necesidades de mantenimiento, rebobinado y reduce la vida útil de las máquinas.

Figura 33. Año base de quinto armónico de corriente



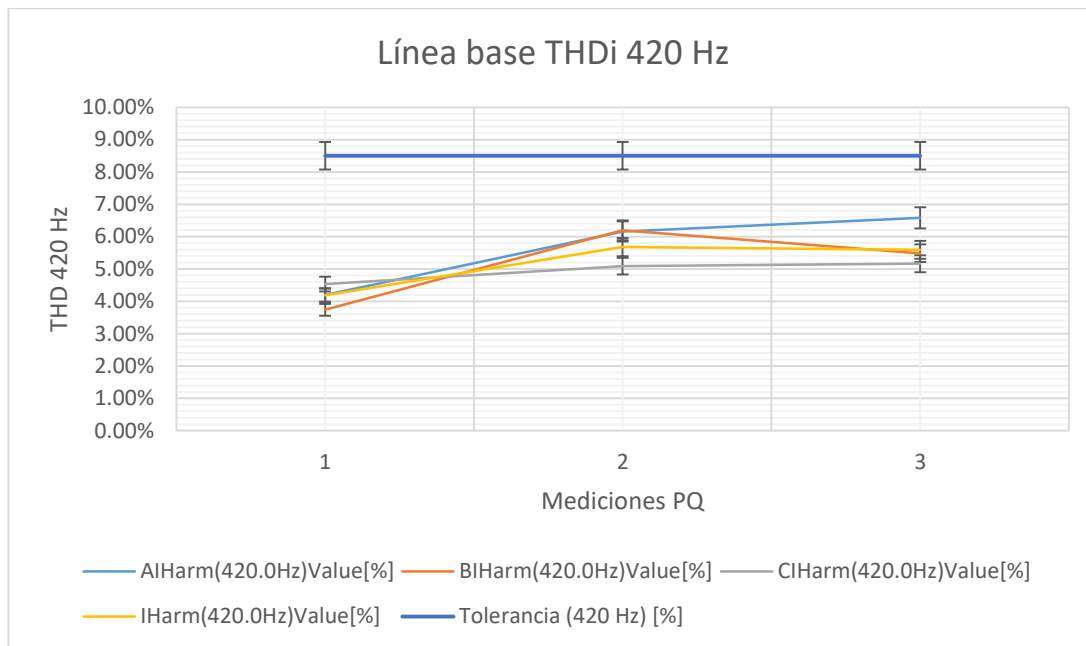
Fuente: elaboración propia.

La figura 33 refleja una onda distorsionada de corriente debido a que el arranque es realizado por medio de la rectificación de 6 pulsos con el variador, además de un alto contenido de armónicos introducidos por este *driver*. Los armónicos introducidos por el variador de frecuencia son el 5to, 7mo, 11vo, 13vo, 17vo, 19, 21, etc., al incrementar las frecuencias del voltaje y corriente se



incrementan las pérdidas en el motor y se produce calentamiento, acelerando el envejecimiento y deterioro del aislante del motor.

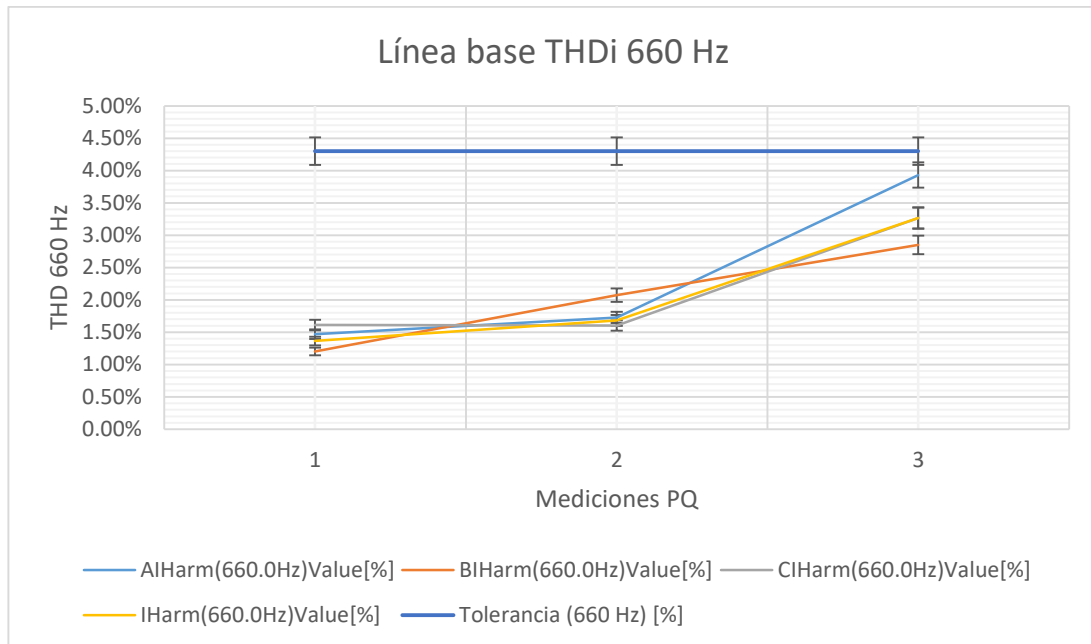
Figura 34. Año base de séptimo armónico de corriente



Fuente: elaboración propia.

Debido al alto contenido armónico se introducen corrientes de secuencia negativa que intentan hacer girar al motor en sentido opuesto, produciendo calentamientos, cabeceo y vibraciones en el eje del motor. “A este tipo de corrientes armónicas se atribuyen la circulación de corrientes por los ejes del motor, sobretudo en ejes no aislados, lo cual se traduce en un daño en los rodamientos conocido como erosión eléctrica en los rodamientos. Esta erosión se observa como picaduras a lo largo de la pista de los rodamientos producidos por corrientes parásitas introducidas por el arrancador suave o variador de frecuencia”. (DRANETZ, 2013, p. 125).

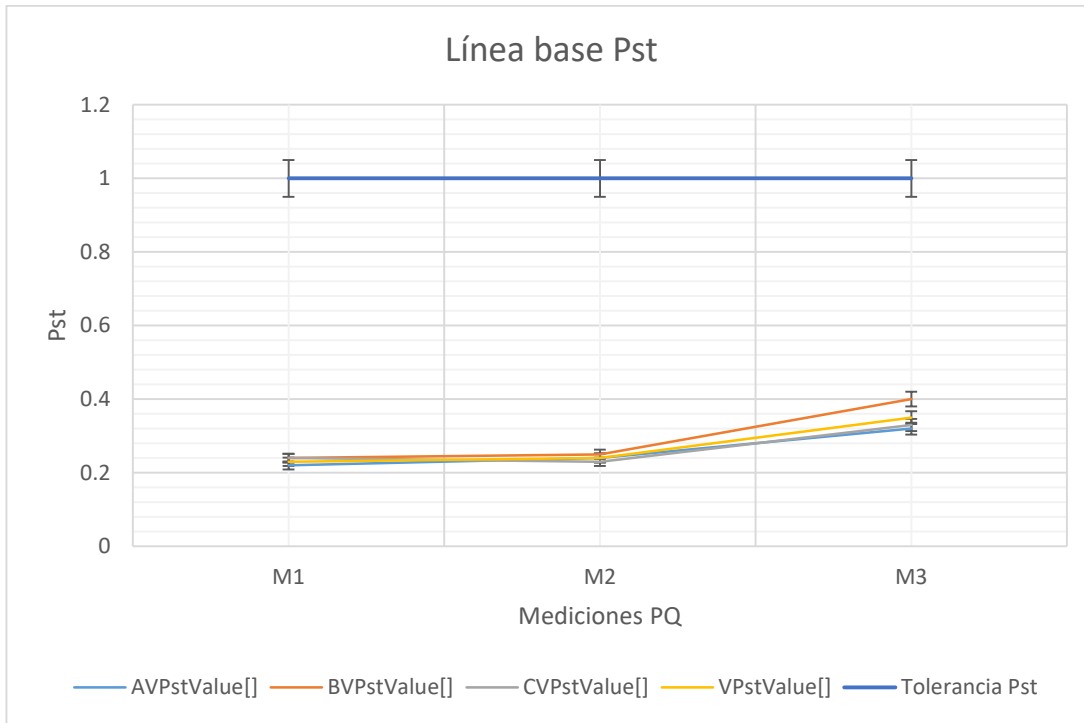
Figura 35. Año base de onceavo armónico de corriente



Fuente: elaboración propia.

La figura 35 muestra un incremento en el indicador de *flicker*, esto se ve agravado debido a una condición de neutro flotante luego de realizar un cambio en las operaciones y cambio del transformador. “Variaciones rápidas de cargas industriales como soldadoras, hornos de arco, laminadoras y otras cargas con altos picos de consumo. Fluctuaciones de tensión originadas por los usuarios conectados a la red cuya demanda no es constante y experimenta variaciones rápidas en su funcionamiento en el tiempo: máquinas de soldadura por resistencia, arranque de motores, molinos trituradores, ventiladores de minas, hornos de arco, compresores, laminadoras, lámparas de descarga, electrodomésticos con regulación automática”. (Leal, G., 2008, p. 2).

Figura 36. Año base de flicker

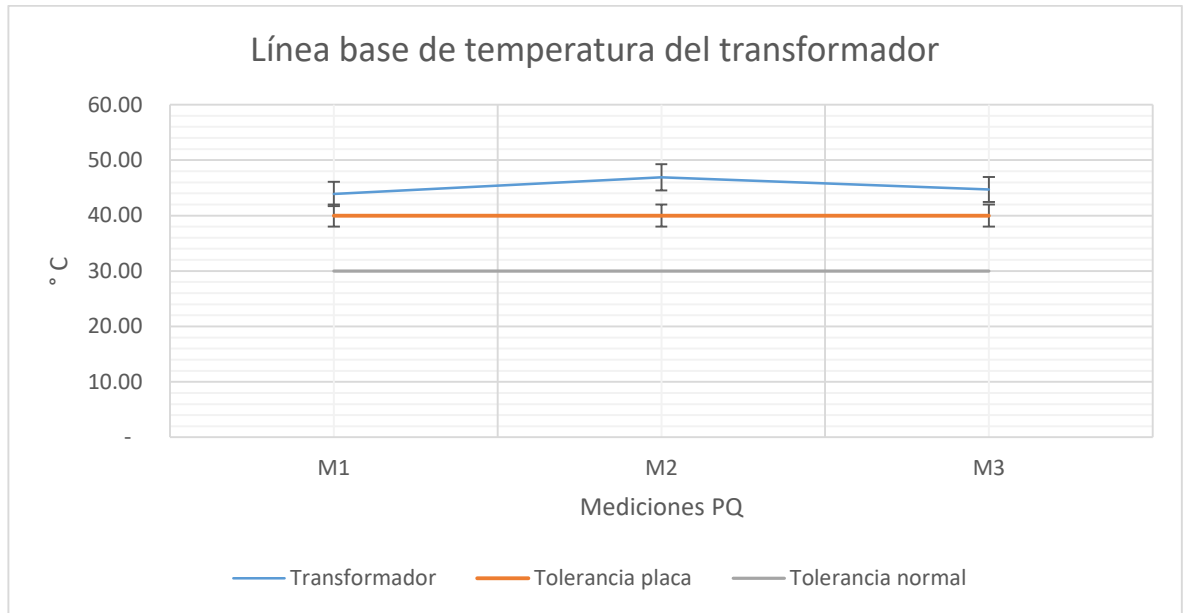


Fuente: elaboración propia.

La temperatura se encuentra por encima de los valores establecidos en las placas de datos de los equipos. A pesar de realizar un cambio de transformador, interruptor principal y cableado de alimentación las temperaturas permanecen altas en la medición 3 (M3) para el caso del transformador, interruptor, capacitor, variador de frecuencia, motor de 5.5 kW y motor de 2.2 kW.

Se presentará únicamente la línea base de temperaturas del transformador, ya que las tendencias del resto de equipos se comportan muy similar.

Figura 37. Año base de temperatura de transformador



Fuente: elaboración propia



## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La auditoría PQ permite evaluar la situación de la empresa y refleja la necesidad de implementar un sistema de gestión de calidad, debido al incremento en la producción. La empresa ingresará su producto a los supermercados grandes de Guatemala y necesita: “establecer una estrategia con metas y objetivos que permitan mejorar el desempeño energético e incrementar la competitividad”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 21).

Los resultados obtenidos reflejan que la implementación del sistema MRV permitirá mejorar la competitividad de la empresa, por medio de la propuesta de modelo de gestión se obtendrán ahorros directos y con bajo riesgo para la empresa, agregará valor, mejorará la competitividad y producirá ahorros en el tiempo. “La propuesta presentada cumple con el principio de conservación de la energía el cual establece que antes de realizar cualquier proyecto de gestión de energía se debe realizar la conservación de la misma. La calidad de energía es muy importante para la conservación de la energía eléctrica dentro de una planta industrial” lo cual se argumenta con base en la (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 17).

En este capítulo se realiza la discusión de resultados, utilizando estadística descriptiva para el análisis de indicadores de calidad de energía: “regulación de voltaje, desbalance de voltaje, desbalance de corriente, armónico de voltaje, armónicos de corriente y *flicker*”. (CNEE, 1999, p. 6). Las tendencias de los indicadores de calidad de energía son el punto de partida del plan de implementación, para reducir las fallas por mala calidad de energía eléctrica en la industria de alimentos.

Se establecen líneas base de los indicadores, utilizando la información de las auditorías energéticas y se consideran medidas de mejora que permitirán reducir las fallas por mala calidad de energía y obtener ahorros en el costo de la energía. Se evalúan dos escenarios el primero considera que la industria continua operando como lo hace comúnmente e ingresando cargas lineales y no lineales de forma desordenada. El segundo escenario plantea un plan de gestión de mantenimiento con enfoque en calidad de energía.

El plan de implementación responde a los objetivos y metas establecidos durante la auditoría PQ; las acciones de mejora propuestas son resultado del análisis modal de fallas, efectos y criticidad. En el apéndice 1 se presentan los consumos de todas las cargas que fueron revisadas durante la auditoría PQ, se asignan factores de utilización y se utiliza el factor de reducción de capacidad registrado por el analizador de redes trifásicas.

Utilizando las pérdidas por armónicos, ahorros por mejora del factor de potencia y los ahorros por la implementación de acciones de mejora se obtiene un plan de priorización proyectado a 10 años.

#### **4.1. Tablero de control de indicadores**

El tablero de control de indicadores permitirá exponer en forma dinámica el resultado de las auditorías PQ, se presenta la información del año base y luego se presentan las líneas base para apoyar la toma de decisiones en función de las acciones establecidas en el modelo de gestión. El tablero de control es la propuesta final de un sistema de medición integrado con una base de datos que permite actualizar los indicadores en forma dinámica.

El sistema integrado de información servirá para llevar un control de la gestión de mantenimiento y llevar una verificación de las medidas de mejora implementadas. “La información presentada tiene la función de informar a la alta dirección de la industria por medio de los indicadores, la marcha o avance de la gestión y el grado de cumplimiento de los objetivos estratégicos, tácticos y operativos”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 22).

#### **4.1.1. Tendencia del voltaje**

Se observa una variación en los registros de voltaje, la medición 1 muestra que los valores de voltaje en la fase AB oscilan entre 227.42 V a 237.54 V, en la fase BC entre 228.94 V a 238.65 V y en la fase CA entre 226.92 V a 236.83 V. El registro de voltaje que más se repite en las fases AB, BC y CA son: 239.96 V, 241.07 V y 234.35 V.

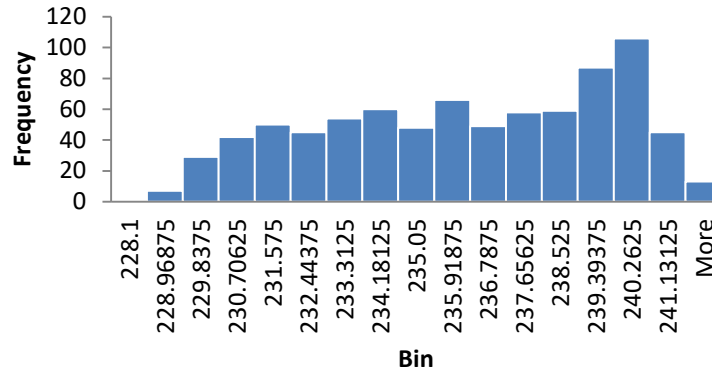
La medición 2 muestra que los valores de voltaje en la fase AB oscilan entre 238.61 V a 242.91 V, en la fase BC entre 237.04 V a 243.38 V y en la fase CA entre 235 V a 242.33 V. El registro de voltaje que más se repite en las fases AB, BC y CA son: 240.17 V, 240.21 V y 238.36 V.

La medición 3 muestra que los valores de voltaje en la fase AB oscilan entre 231.23 V a 246.91 V, en la fase BC entre 214.50 V a 232.72 V y en la fase CA entre 188.34 V a 215.40 V. El registro de voltaje que más se repite en las fases AB, BC y CA son: 241.68 V, 220.58 V y 195.42 V. La condición de neutro flotante provoca que los voltajes superen las tolerancias 228 V a 252 V ( $\pm 5\%$ ) y 220.8 V a 259.2 V ( $\pm 8\%$ ).

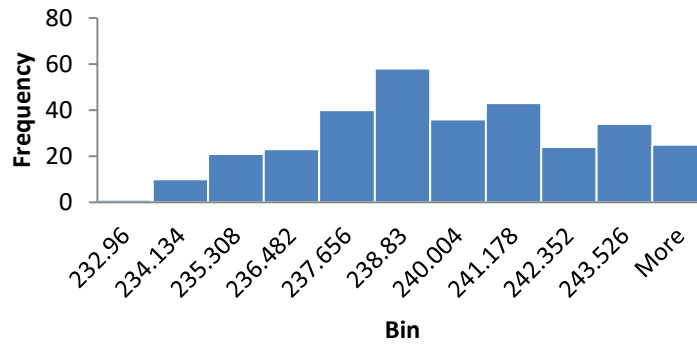


Figura 38. Histogramas de tendencia de voltaje

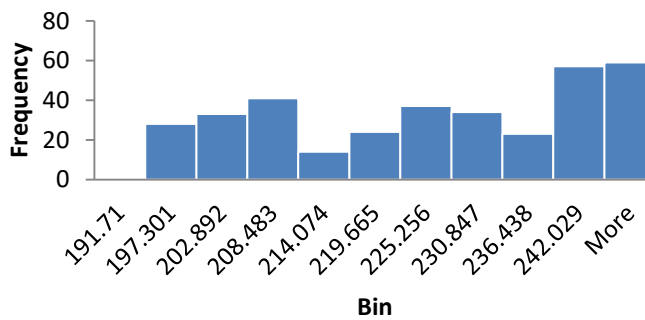
### Voltaje total medición 1



### Voltaje total medición 2



### Voltaje total



Fuente: elaboración propia.

#### **4.1.2. Tendencia de la corriente**

Se muestra un incremento en el desequilibrio de las corrientes de fase y valores altos de corriente circulando por el neutro. Se observa en los histogramas que existen dos valores con una alta frecuencia, esto se debe a que la producción de la línea uno es de día y la línea dos opera de noche.

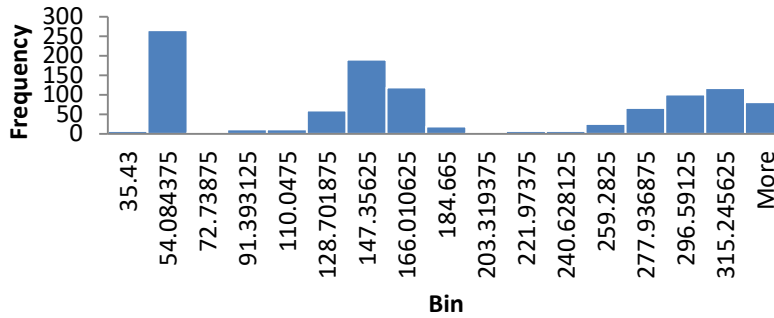
La medición 1 muestra que los valores de corriente en la fase A oscilan entre 75.18 A a 258.87 A, en la fase B entre 85.17 A a 361.43 A, en la fase C entre 81.43 A a 411.38 A y en el neutro entre 35.33 A a 35.68 A. El registro de corriente que más se repite en las fases A, B, C y N son: 305.68 A, 298.12 A, 315.14 A y 35.50 A.

La medición 2 muestra que los valores de corriente en la fase A oscilan entre 35.04 A a 268.59 A, en la fase B entre 39.92 A a 390.00 A, en la fase C entre 39.19 A a 420.51 A y en el neutro entre 0.76 A a 16.83 A. El registro de corriente que más se repite en las fases A, B, C y N son: 171.28 A, 182.87 A, 182.18 A y 1.43 A.

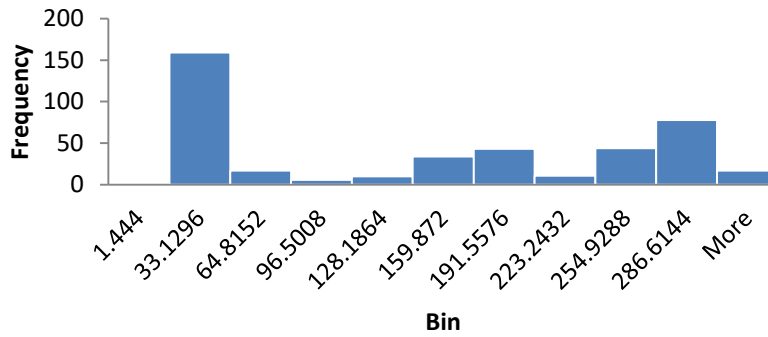
La medición 3 muestra que los valores de corriente en la fase A oscilan entre 61.5 A a 502.5 A, en la fase B entre 65.67 A a 489.90 A, en la fase C entre 27.58 A a 438.08 A y en el neutro entre 3.03 A a 26.03 A. El registro de corriente que más se repite en las fases A, B, C y N son: 82.5 A, 85.87 A, 81.34 A y 3.85. La cargas monofásicas predominantes y la condición de neutro flotante provoca que los valores de corriente presenten un desequilibrio que supera la tolerancia de  $\pm 10\%$ .

Figura 39. Histogramas de tendencia de corriente

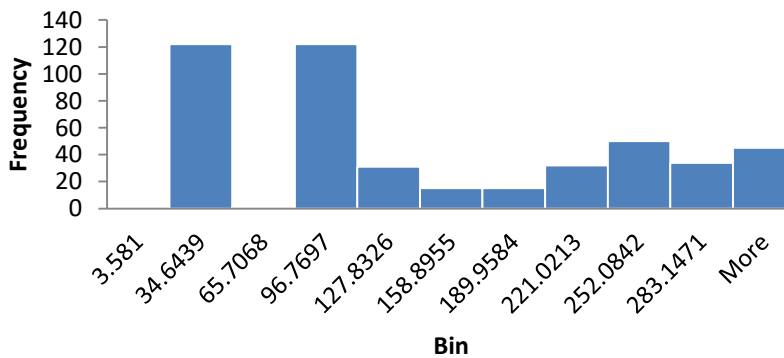
### Corriente total



### Corriente total



### Corriente total



Fuente: elaboración propia.

#### **4.1.1. Tendencia del factor de potencia**

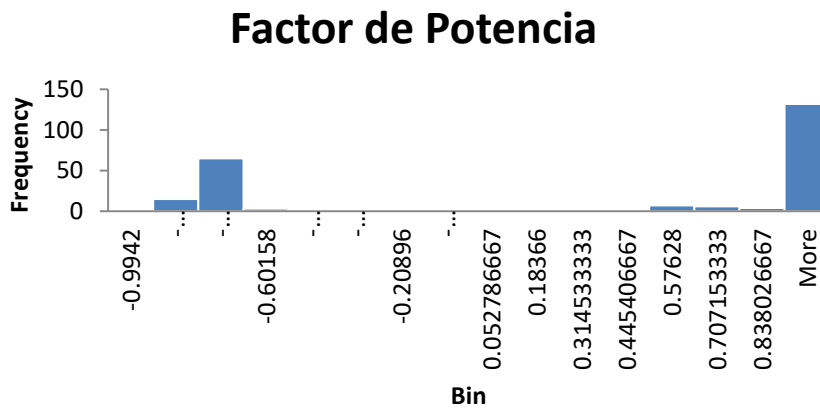
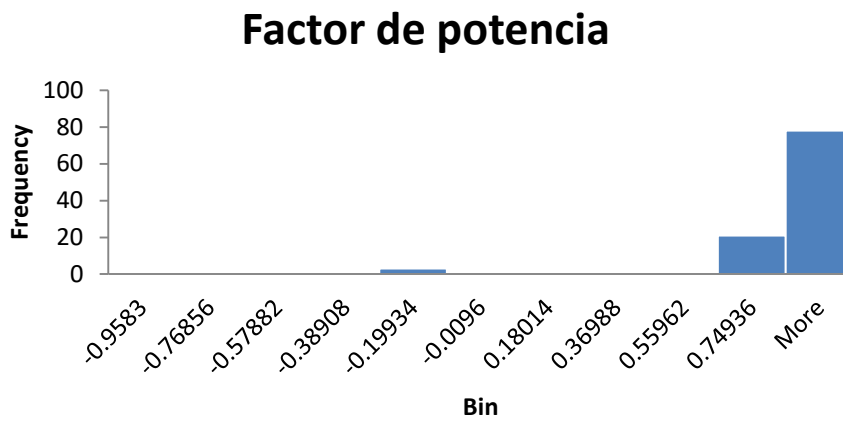
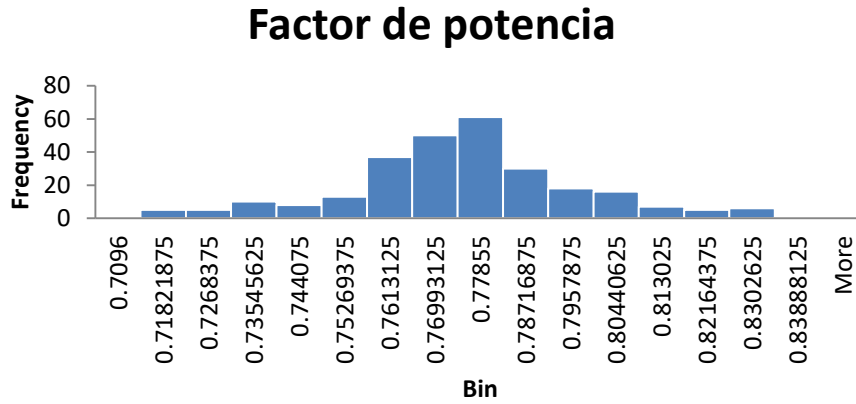
Se observa que el valor de factor de potencia se encuentra fuera de tolerancia para las tres mediciones realizadas en la auditoría PQ. En la medición 2 y 3 el factor de potencia cambia en algunos instantes a valores negativos, lo cual demuestra una compensación anormal en los periodos de baja demanda.

La medición 1 muestra que los valores de factor de potencia en la fase A oscilan entre 0.68 a 0.82, en la fase B entre 0.72 a 0.89, en la fase C entre 0.69 a 0.81. El registro de factor de potencia que más se repite en las fases A, B, C y N son: 0.76, 0.79 y 0.76.

La medición 2 muestra que los valores de factor de potencia en la fase A oscilan entre -0.92 a 0.75, en la fase B entre -0.93 a 0.74, en la fase C entre -0.94 a 0.75. El registro de factor de potencia que más se repite en las fases A, B, C y N son: 0.75, 0.74 y 0.75.

La medición 3 muestra que los valores de factor de potencia en la fase A oscilan entre -0.94 a 0.86, en la fase B entre -0.93 a 0.79, en la fase C entre -0.93 a 0.82. El registro de factor de potencia que más se repite en las fases A, B, C y N son: -0.86, 0.79 y 0.82.

Figura 40. Histogramas de tendencia de corriente



Fuente: elaboración propia.

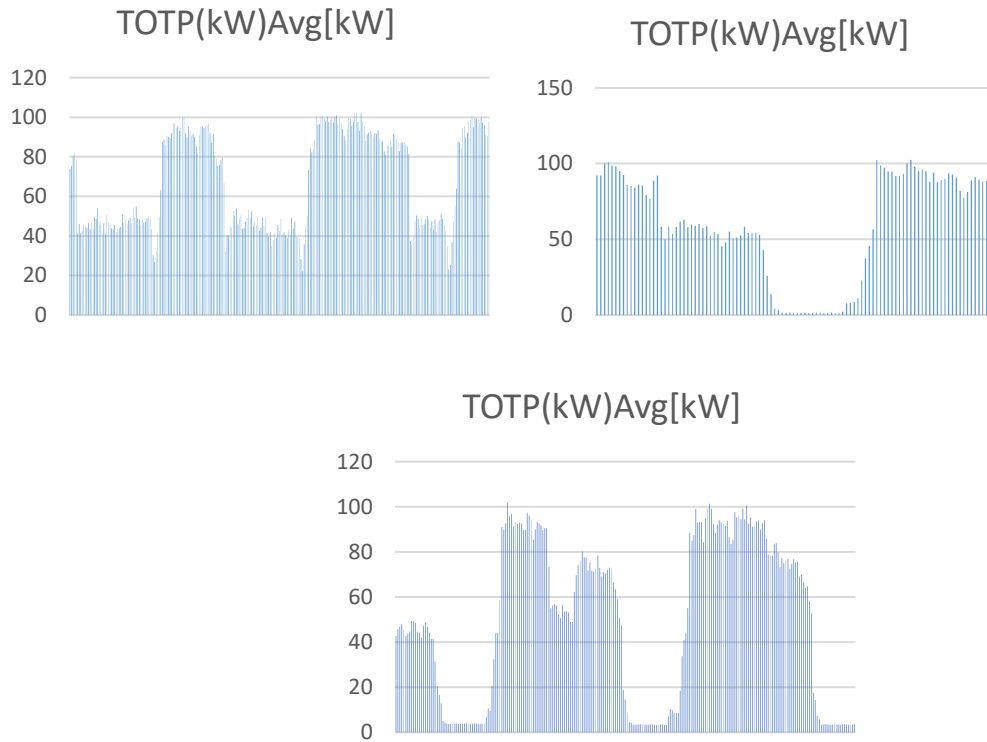
#### **4.1.2. Tendencia de la potencia –perfil de carga**

Se observa en los perfiles de carga registrados con el analizador de redes trifásicas que existe una variación en la operación de las líneas de producción.

La medición 1 muestra que la línea de producción uno opera en forma estable en el horario aproximado de 06:30 a 16:15 y la línea de producción dos opera en manera estable en el horario aproximado de 17:30 a 04:30. La línea de producción dos se apaga en horario de 04:30 a 05:15 y luego arranca la línea de producción uno en horario de 05:15 a 06:30; la línea de producción uno se apaga en horario de 16:15 a 16:45 y luego arranca la línea de producción dos en horario de 16:45 a 17:30.

La medición 2 y 3 muestran que la línea de producción uno opera en forma estable en el periodo de 07:00 a 16:00 y la línea de producción dos opera en forma estable en el periodo de 17:00 a 22:30. Los intervalos de 04:30 a 07:00 corresponde al arranque de los equipos asociados a la línea uno y el intervalo de 16:00 a 17:00 corresponde al arranque de los equipos asociados a la línea dos. En el periodo de 22:30 cuando finalizan los turnos a 04:30 cuando inician nuevamente, existen consumos no asociados a la producción que podrían significar un ahorro en el costo de energía eléctrica.

Figura 41. **Tendencia de la potencia**



Fuente: elaboración propia,

#### 4.1.3. **Tendencia del índice de regulación de tensión**

La figura 42 muestra que la tendencia del índice de regulación de voltaje supera la tolerancia establecida en las NTSD en la medición 3, esto se debe a una condición de neutro flotante, luego de realizar un cambio en las operaciones y cambio del transformador.

En la medición 1 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y cuartil 2, es menor que la caja entre el cuartil 2 y cuartil 3. Esto demuestra que los valores de regulación de voltaje entre el 25 y el 50 % de los registros

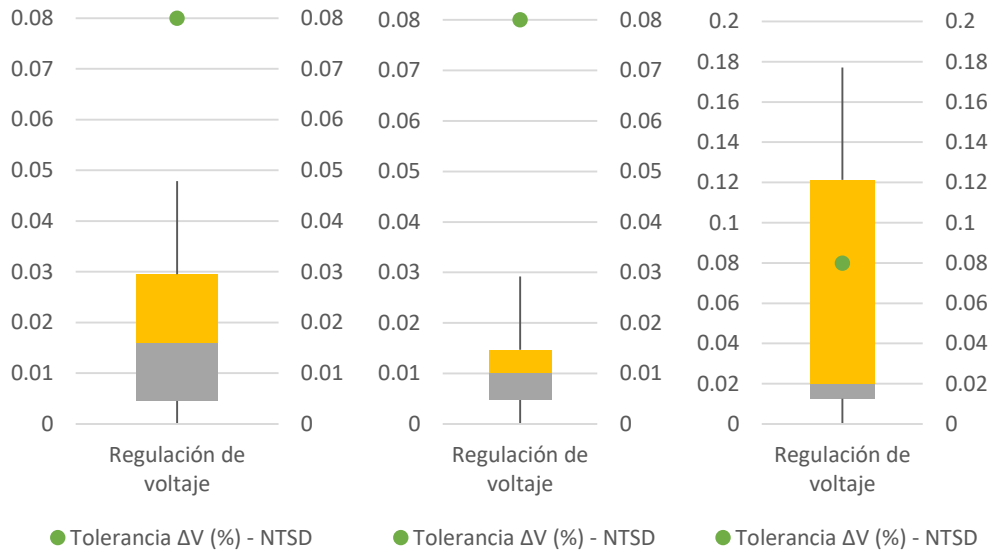
están más concentrados que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 0.5 % del índice de regulación de voltaje. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 2.95 y 4.78 %, lo cual demuestra una mayor dispersión de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 1.60 %, es decir que, el 50 % de los registros están por debajo de este valor.

En la medición 2 se observa una distribución normal de los datos. Esto demuestra que los valores de regulación de voltaje entre el 25 y el 50 % de los registros están distribuidos igual que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 0.5 % del índice de regulación de voltaje. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 1.4 y 3 %, lo cual demuestra una mayor dispersión de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 1 %, es decir que el 50 % de los registros están por debajo de este valor.

En la medición 3 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y cuartil 2, es menor que la caja entre el cuartil 2 y cuartil 3. Esto demuestra que los valores de regulación de voltaje entre el 25 y el 50 % de los registros están más concentrados que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 1.25% del índice de regulación de voltaje. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 12.12 y 17.7 %, lo cual demuestra una mayor dispersión de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 2 %, es decir que el 50 % de los registros están por debajo de este valor.



Figura 42. **Tendencia de regulación de voltaje**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.4. **Tendencia del índice de desbalance de voltaje**

La figura 42 refiere que la tendencia del índice de desbalance de voltaje supera la tolerancia establecida en las NTSD en la medición 3, esto se debe a una condición de neutro flotante, luego de realizar un cambio en las operaciones y cambio del transformador.

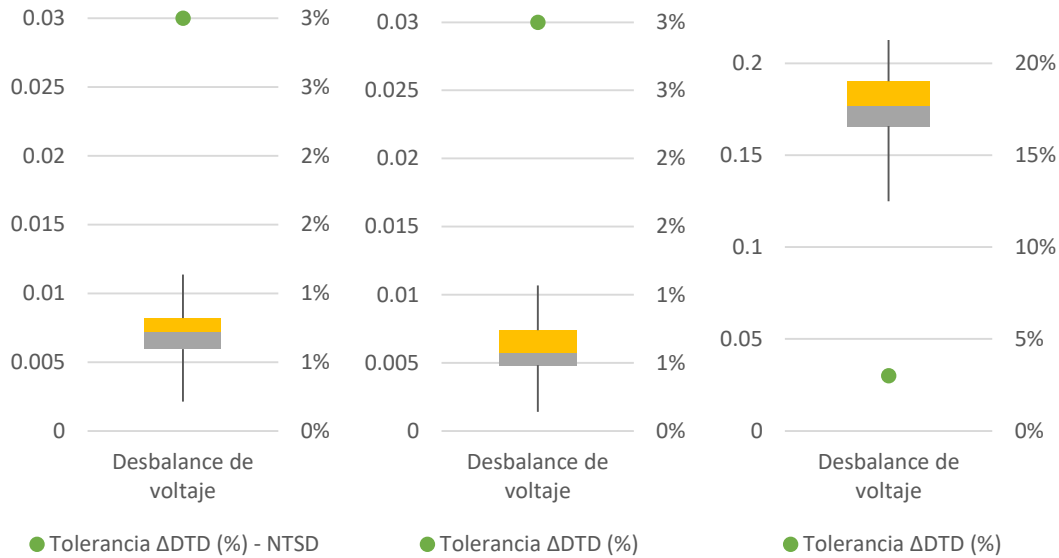
En la medición 1 se observa una distribución normal de los datos. Esto demuestra que los valores de regulación de voltaje entre el 25 y el 50% de los registros están distribuidos igual que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es igual que el superior, el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 0.2 % del índice de desbalance de voltaje. Los valores entre el cuartil

3 y límite superior oscilan entre el 0.8 y 1.13 %, lo cual demuestra que la dispersión de los registros del bigote superior es igual al inferior. El rango intercuartilico se encuentra en 0.72 %, es decir que, el 50 % de los registros están por debajo de este valor.

En la medición 2 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y cuartil 2, es menor que la caja entre el cuartil 2 y cuartil 3. Esto demuestra que los valores de desbalance de voltaje entre el 25 y el 50 % de los registros están más concentrados que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es igual que el superior, el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 0.4 % del índice de desbalance de voltaje. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 0.7 y 1.06 %, lo cual demuestra que la dispersión de los registros del bigote superior es igual al inferior. El rango intercuartilico se encuentra en 0.57 %, es decir que el 50 % de los registros están por debajo de este valor.

En la medición 3 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y cuartil 2, es menor que la caja entre el cuartil 2 y cuartil 3. Esto demuestra que los valores de regulación de voltaje entre el 25 y el 50 % de los registros están más concentrado que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es más largo que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran dispersos entre 12.5 y 16.57 % del índice de desbalance de voltaje. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 19 y 21.26 %, lo cual demuestra una mayor concentración de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 17.67 %, es decir que el 50 % de los registros están por debajo de este valor.

**Figura 43. Tendencia de desbalance de voltaje**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.5. Tendencia del índice de desbalance de corriente

La figura 43 refleja que la tendencia del índice de desbalance de corriente supera la tolerancia establecida en las NTSD en la medición 3, esto se debe a una condición de neutro flotante luego de realizar un cambio en las operaciones y cambio del transformador.

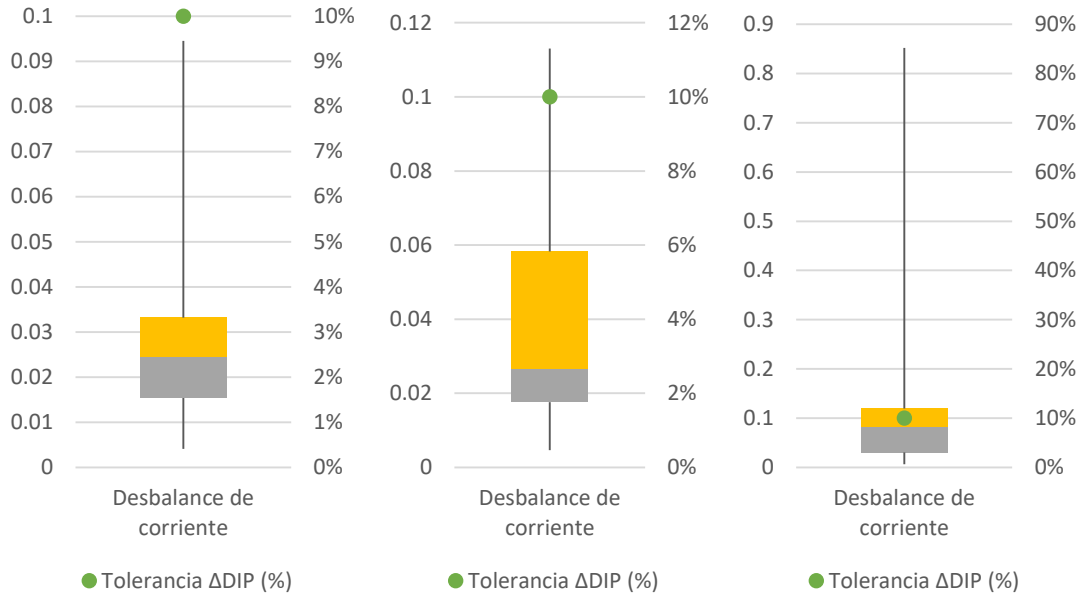
En la medición 1 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y cuartil 2, es igual que la caja entre el cuartil 2 y cuartil 3. Esto demuestra que los valores de desbalance de corriente entre el 25 y el 50 % de los registros están concentrados igual que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 1.53 % del índice de desbalance de corriente. Los valores entre el

cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 3.31 y 9.45 %, lo cual demuestra una mayor dispersión de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 2.45 %, es decir que, el 50 % de los registros están por debajo de este valor.

En la medición 2 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y cuartil 2, es menor que la caja entre el cuartil 2 y cuartil 3. Esto demuestra que los valores de desbalance de corriente entre el 25 y el 50 % de los registros están más concentrados que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 1.75 % del índice de desbalance de corriente. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 5.83 y 11.30 %, lo cual demuestra una mayor dispersión de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 2.66 %, es decir que el 50 % de los registros están por debajo de este valor.

En la medición 3 se observa que la parte superior de la caja entre el cuartil 2 y cuartil 3, es menor que la caja entre el cuartil 1 y cuartil 2. Esto demuestra que los valores de desbalance de corriente entre el 50 y el 75 % de los registros están más concentrados que entre el 25 y el 50 %. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 3.01 % del índice de desbalance de corriente. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 11.95 y 85.19 %, lo cual demuestra una mayor dispersión de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 8.21%, es decir que el 50 % de los registros están por debajo de este valor.

#### 4.1.6. Tendencia de desbalance de corriente



Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.7. Tendencia del índice de distorsión armónica de voltaje

Se observa que la tendencia del índice de desbalance de corriente no supera la tolerancia establecida en las NTSD.

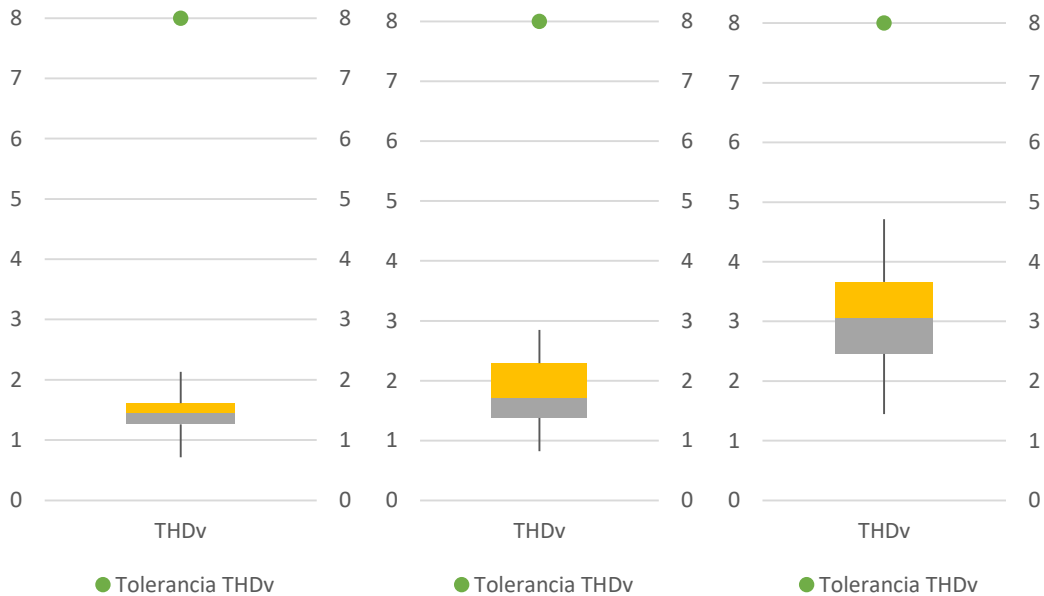
En la medición 1 se observa una distribución normal de los datos. Esto demuestra que los valores de distorsión armónica de voltaje entre el 25 % y el 50% de los registros están distribuidos igual que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es igual que el superior, el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 0.71% del índice de distorsión armónica de voltaje. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 1.61 y 2.13 %, lo cual demuestra que la dispersión de los registros del bigote superior es igual al

inferior. El rango intercuartilico se encuentra en 1.45 %, es decir que el 50 % de los registros están por debajo de este valor.

En la medición 2 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y cuartil 2, es menor que la caja entre el cuartil 2 y cuartil 3. Esto demuestra que los valores de distorsión armónica de voltaje entre el 25 y el 50 % de los registros están más concentrados que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es igual que el superior, el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 0.82 % del índice de distorsión armónica de voltaje. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 2.29 y 2.84 %, lo cual demuestra que la dispersión de los registros del bigote superior es igual al inferior. El rango intercuartilico se encuentra en 1.71 %, es decir que el 50% de los registros están por debajo de este valor.

En la medición 3 se observa una distribución normal de los datos. Esto demuestra que los valores de distorsión armónica de voltaje entre el 25% y el 50% de los registros están distribuidos igual que entre el 50 y el 75%. El bigote inferior es igual que el superior, el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 1.44 % del índice de distorsión armónica de voltaje. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 3.66 y 4.71%, lo cual demuestra que la dispersión de los registros del bigote superior es igual al inferior. El rango intercuartilico se encuentra en 3.06 %, es decir que el 50 % de los registros están por debajo de este valor.

Figura 44. Tendencia de distorsión armónica de voltaje



Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.8. Tendencia del índice de distorsión armónica de corriente

Se observa que la tendencia del índice de desbalance de corriente no supera la tolerancia establecida en las NTSD. Sin embargo, se observa una tendencia a incrementar.

En la medición 1 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y 2, es menor que la caja entre el cuartil 2 y 3. Esto demuestra que los valores de distorsión armónica de corriente entre el 25 y el 50 % de los registros están más concentrados que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 2.11% del índice de distorsión armónica de corriente. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 1.81 y 4.53 %, lo cual demuestra

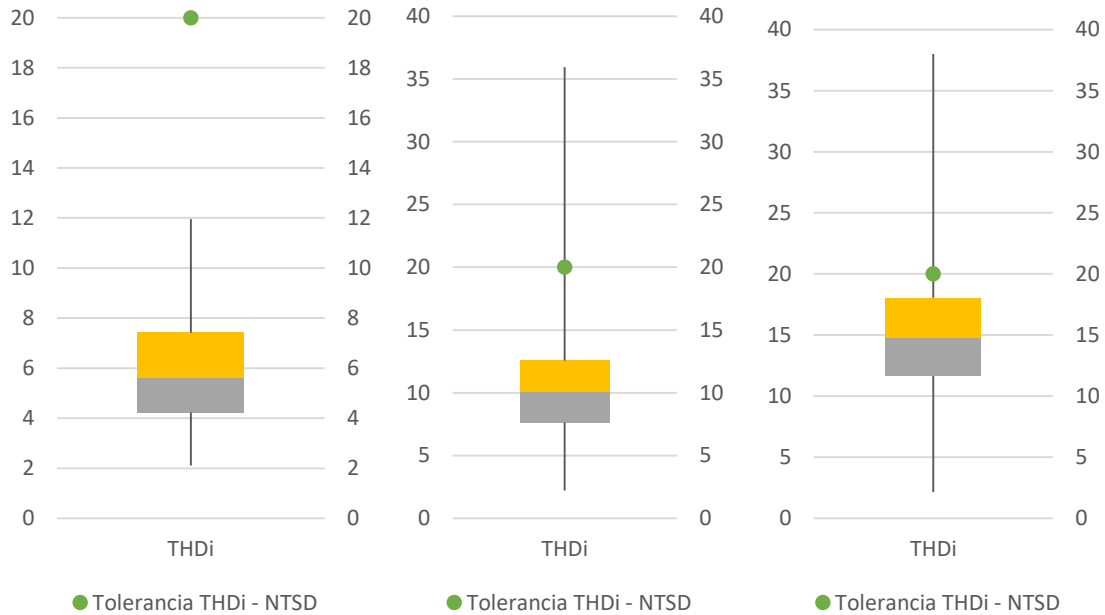
una mayor dispersión de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 1.38 %, es decir que, el 50 % de los registros están por debajo de este valor.

En la medición 2 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y 2, es igual que la caja entre el cuartil 2 y 3. Esto demuestra que los valores de distorsión armónica de corriente entre el 25 y el 50 % de los registros están concentrados igual que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 2.22 % del índice de distorsión armónica de corriente. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 12.56 y 35.94 %, lo cual demuestra una mayor dispersión de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 10.1 %, es decir que, el 50 % de los registros están por debajo de este valor.

En la medición 3 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y 2, es igual que la caja entre el cuartil 2 y 3. Esto demuestra que los valores de distorsión armónica de corriente entre el 25 y el 50 % de los registros están concentrados igual que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 2.13 % del índice de distorsión armónica de corriente. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 15.91 y 35.87 %, lo cual demuestra una mayor dispersión de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 12.67 %, es decir que, el 50 % de los registros están por debajo de este valor.



Figura 45. Tendencia de distorsión armónica de corriente



Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.9. Tendencia del índice de flicker

La figura 45 muestra que la tendencia del índice de flicker no supera la tolerancia establecida en las NTSD.

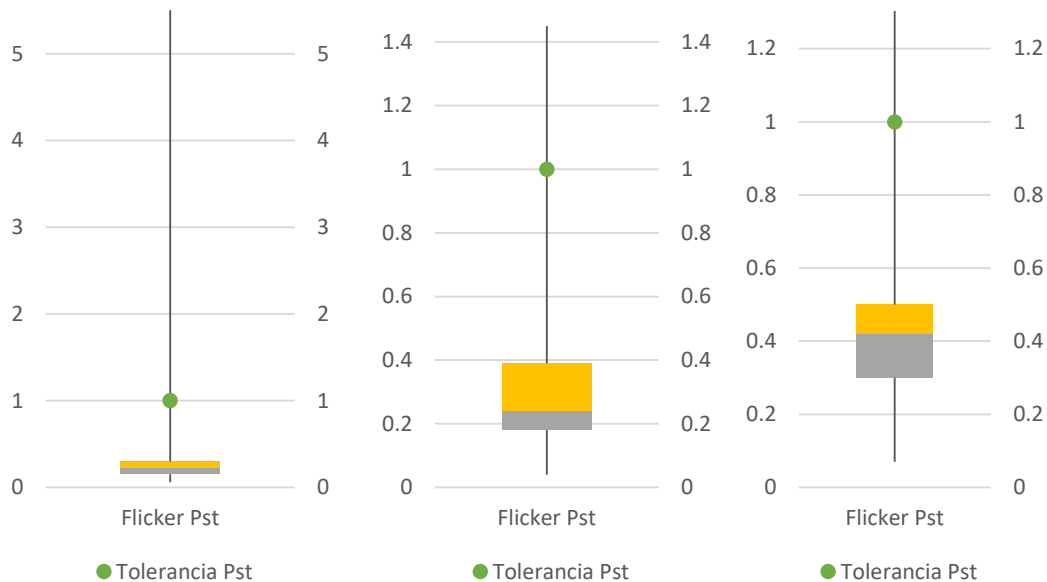
En la medición 1 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y 2, es igual que la caja entre el cuartil 2 y 3. Esto demuestra que los valores de flicker entre el 25 y el 50 % de los registros están concentrados igual que entre el 50y el 75%. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 0.06 del índice de flicker. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 0.30 y 5.5, lo cual demuestra una mayor dispersión de los registros del bigote superior.

El rango intercuartilico se encuentra en 0.23, es decir que, el 50 por ciento de los registros están por debajo de este valor.

En la medición 2 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y 2, es menor que la caja entre el cuartil 2 y 3. Esto demuestra que los valores de *flicker* entre el 25 y el 50 % de los registros están más concentrados que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 de los registros se encuentran concentrados por debajo de 0.04 del índice de *flicker*. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 0.39 y 1.45, lo cual demuestra una mayor dispersión de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 0.24, es decir que, el 50 % de los registros están por debajo de este valor.

En la medición 3 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 2 y 3, es menor que la caja entre el cuartil 1 y 2. Esto demuestra que los valores de *flicker* entre el 50 y el 75 % de los registros están más concentrados que entre el 25 y el 75 %. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 0.07 del índice de *flicker*. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 0.43 y 1.24, lo cual demuestra una mayor dispersión de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 0.35, es decir que, el 50 % de los registros están por debajo de este valor.

Figura 46. Tendencia de *flicker*



Fuente: elaboración propia.

#### 4.2. Análisis de soluciones PQ y equipos de mitigación

La implementación de soluciones a través de equipos que mitiguen los efectos de la mala calidad de energía en la instalación eléctrica, es de considerar si el entorno electromagnético es oportuno para eliminar los problemas de raíz y no afectar la confiabilidad del sistema. Si se instalan filtros de armónicos en un circuito con condiciones de resonancia, la distorsión armónica total se puede incrementar.

- Fenómenos PQ en estado estable

La distorsión armónica de voltaje superior a 5 % requiere instalar filtros de armónicos o se puede mover la carga que produce los armónicos a un circuito

exclusivo, para reducir su efecto en los otros equipos. Si la distorsión armónica produce calentamiento en otros equipos como transformadores y motores, se recomienda reemplazar el transformador por uno con un factor  $k$  adecuado o colocar un transformador sobredimensionado para que la potencia entregada sea igual a la potencia nominal por el factor de reducción de potencia. Se propone realizarlo de forma similar con los motores.

El desbalance de tensión superior a 1 % puede producir calentamiento excesivo en motores, produciendo una reducción de la potencia nominal. Se recomienda realizar mediciones en varios puntos para identificar corrientes excesivas en una o dos fases, luego se debe realizar un balance de cargas monofásicas en las fases. Para proteger de voltajes de secuencia negativa se debe instalar un relé o protección de secuencia inversa que evite rotación inversa de motores.

El desbalance de corriente superior a 10 % tiene efectos similares al desbalance de voltaje, con la excepción de que este problema solo puede estar produciéndolo el usuario. Por lo que, se necesita realizar un balance de cargas monofásicas.

Las muescas en la tensión, también llamados transitorios negativos repetitivos, pueden resultar en un daño al aislamiento de los devanados del motor y fallas en semiconductores de dispositivos de velocidad variable. Si no se puede mitigar el efecto de las muescas ajustando la superposición durante la conmutación se necesitara un motor con un devanado especial para reducir el daño al aislante. En el caso de los semiconductores, se recomienda diseñar un filtro pasivo y colocarlo en la fuente de alimentación del equipo afectado.

- Eventos de larga duración

En un evento de sobrevoltaje mayor a 110 % del voltaje nominal por más de 1 segundo, un supresor de picos de voltaje debe absorber la energía del transitorio. En un evento de bajo voltaje menor a 90 % del voltaje nominal por más de 1 segundo, se puede utilizar un transformador con regulación automática de *TAPS* o un acondicionador de onda de voltaje para compensar la reducción del voltaje. En un evento de bajo voltaje menor a 10 % del voltaje nominal por más de 1 segundo, se recomienda contar con UPS o con un generador de respaldo y transferencia automática.

- Eventos de corta duración

“En un *sag* menor a 90 % del voltaje nominal con una duración de  $\frac{1}{2}$  a 60 ciclos, dependiendo de la magnitud y duración del evento podrá provocar reinicios de CPU, PLC, caída de comunicación, corrupción de datos o disparo de interruptores. Si el evento proviene del suministro se deberá comunicar a la empresa distribuidora de energía eléctrica y es posible que se necesite un UPS para contar con respaldo. Si el evento proviene del usuario por un arranque de un motor grande, se recomienda reubicar el circuito del motor y utilizar un arrancador suave para reducir la corriente arranque que causa el *sag*” (DRANETZ, 2013, p. 125).

“En un *swell* mayor a 110 % del voltaje nominal con una duración de  $\frac{1}{2}$  a 60 ciclos, los supresores de picos de voltaje y las fuentes pueden fallar o dañarse. Se recomienda instalar un UPS para mitigar los efectos del *swell*”. (DRANETZ, 2013, p. 127).

- Soluciones para los fenómenos de calidad de energía

El sistema de tierras físicas diseñado de forma correcta, con base en estándares y normas cumple la función de estabilizar el voltaje de fase para obtener los valores nominales y establecer una referencia sólida a tierra para proveer un camino de baja impedancia ante corrientes de falla. El sistema de tierras protege a las personas y los equipos.

El supresor de picos de voltaje debe ser diseñado para el máximo valor de voltaje que pueda recibir la carga.

Los filtros de armónicos deberán respetar un diseño de ingeniería para establecer el tipo y tamaño del filtro. Pueden ser filtros pasivos, pasa banda y filtros activos.

Los transformadores de aislamiento se colocan del lado de la carga y deben estar aterrizados, una conexión delta-estrella del transformador de aislamiento puede reducir armónicos triplen, transformadores de aislamiento electrostático son usados para reducir el nivel de ruido (funciona como jaula de Faraday) y también pueden ser diseñados para reducir grados de armónicos específicos.

#### **4.3. Plan de implementación de acciones de mejora**

El plan de implementación es parte de los objetivos y alcances de la auditoría PQ. Se presentaran las líneas base de tendencia para los indicadores de calidad de energía, temperaturas y pérdidas por armónicos. Las líneas base son resultado de la implementación de acciones preventivas y correctivas que se proponen en el plan. Para llevar el seguimiento y medición de las acciones

implementadas se propone efectuar un plan de medición que incluya una aplicación de software capaz de consolidar los datos y entregar análisis automáticos de las auditorías PQ.

El plan de implementación se proyecta para 3 años y se priorizan las acciones de mejora utilizando el tablero de control de indicadores para simular la implementación y su impacto de los indicadores de calidad. El método de priorización también considera la TIR y los tiempos de retorno de las acciones para ser compatible con la norma ISO 50001. Las acciones priorizadas en el modelo de gestión de mantenimiento son las siguientes:

- Año 1
  - Realizar una auditoría PQ y realizar un balance de cargas en los próximos 4 meses.
  - Hacer un estudio de tierras físicas e implementar las acciones de mejora que resulten en un sistema equipotencial. Eliminar la condición de neutro flotante en los próximos 4 meses.
  - Instalar un supresor de picos de tensión en los próximos 4 meses.
  
- Año 2
  - Reemplazar los motores de servicios por motores de alta eficiencia. Los equipos recomendados son: 4 extractores de 5 HP, bomba de aceite de 5 HP y bomba de agua de 2 HP. Realizarlo durante el año.
  - Instalar un filtro economizador de energía para reducir la distorsión armónica total, en 4 meses.
  - Colocar transformadores de aislamiento en la salida de los variadores de frecuencia para reducir las corrientes armónicas en los motores, en los próximos 4 meses.

- Año 3
  - Instalar sistemas de UPS con regulación de voltaje para las líneas de producción 1 y 2. Realizarlo en dos meses antes que ingrese la línea de producción 3.
  - Realizar una auditoría PQ, antes de instalar la nueva línea de producción.
  - Instalación y puesta en operación de la línea de producción 3.
  - Realizar una auditoría PQ, con las tres líneas de producción operando.

Luego de realizar las acciones de mejora se presenta una propuesta para implementar un plan de eficiencia energética en un periodo de 10 años. Esta debe incluir un sistema de medición que registre, analice y presente los resultados de una auditoría en forma automática. El seguimiento, verificación y medición de resultados de la implementación permitirá que el modelo de gestión de mantenimiento para reducir las fallas por mala calidad de energía eléctrica cumpla con el ciclo de mejora continua.

La propuesta de modelo de gestión permitirá obtener ahorros directos y de bajo riesgo para la empresa, agregará valor, mejorará la competitividad y producirá ahorros en el tiempo. “La propuesta cumple con el principio de conservación de la energía o pirámide de energía la cual indica que antes de realizar cualquier proyecto de gestión de energía se debe realizar la conservación de la misma. La calidad de energía es muy importante para la conservación de la energía eléctrica dentro de una planta industrial”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 22).



Tabla XV. Acciones de mejora priorizadas

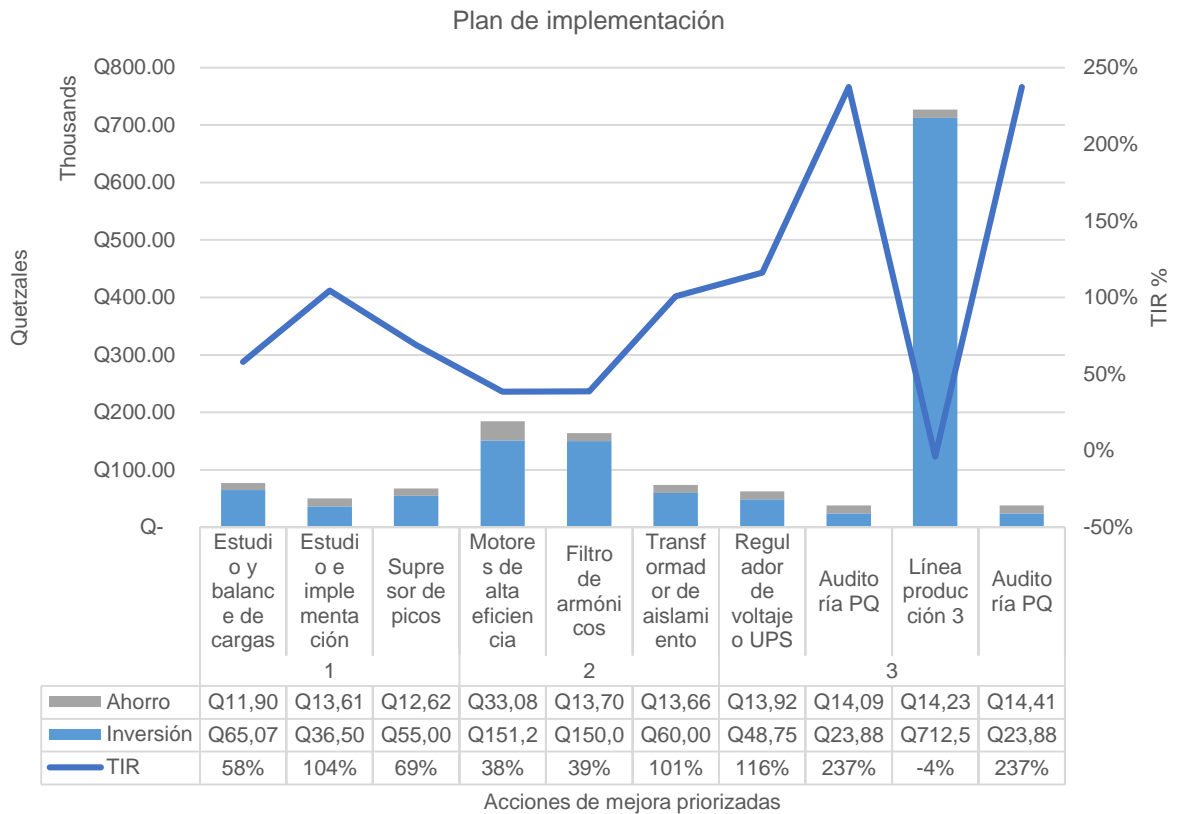
No.	Acción de mejora	Inversión	Ahorro	TR	TIR %	VPN
		Q. SIN IVA	Q./año			
1	Estudio y balance de cargas	Q65,076.00	Q11,900.18	5.5	58	Q126,341.63
	Estudio e implementación	Q36,500.00	Q13,616.85	2.7	104	Q154,917.63
	Supresor de picos	Q55,000.00	Q12,623.33	4.4	69	Q136,417.63
2	Motores de alta eficiencia	Q151,200.00	Q33,089.48	4.6	38	Q152,229.05
	Filtro de armónicos	Q150,000.00	Q13,702.08	10.9	39	Q153,429.05
	Transformador de aislamiento	Q60,000.00	Q13,667.30	4.4	101	Q243,429.05
3	Regulador de voltaje o UPS	Q48,750.00	Q13,924.94	3.5	116	Q235,675.86
	Auditoría PQ	Q23,880.00	Q14,094.12	1.7	237	Q260,545.86
	Línea producción 3	Q712,500.00	Q14,235.36	50.1	-4	-Q428,074.14
	Auditoría PQ	Q23,880.00	Q14,418.03	1.7	237	Q260,545.86

Fuente: elaboración propia.

El cuadro de acciones de mejora considera realizar primero el balance de cargas para reducir el indicador de desbalance de corriente de 11 a 1.5 %, al implementar esta acción los indicadores de regulación de voltaje y desbalance de voltaje presentan una reducción. Sin embargo, el nivel de distorsión armónica total se ve afectado, por lo que es necesario implementar las acciones de mejora del año 2 para reducir este indicador.

Al realizar mejoras en el sistema de tierras físicas se obtiene un resultado positivo, ya que todos los indicadores de calidad de energía se reducen.

**Figura 47. Gráfico de inversión versus ahorro del plan de implementación**

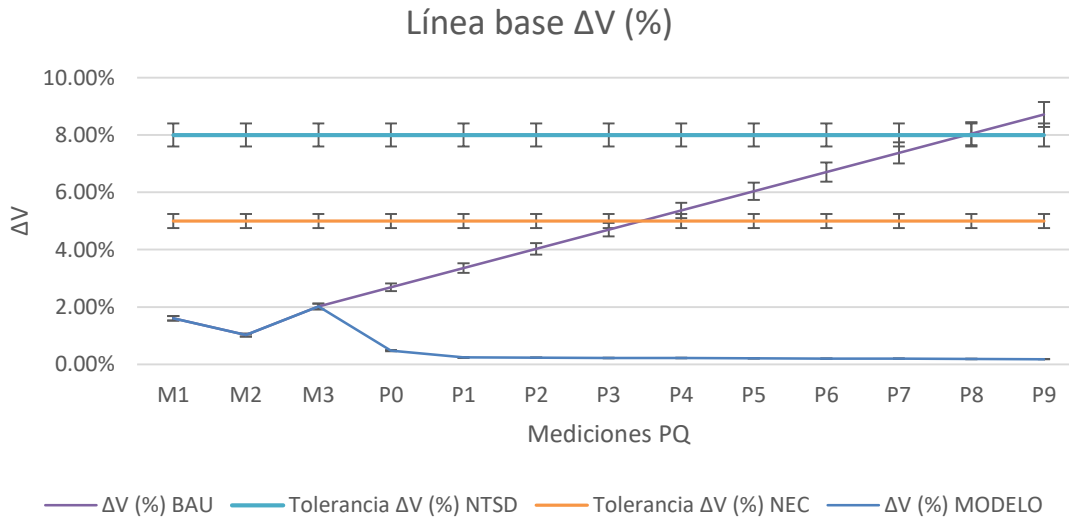


Fuente: elaboración propia.

#### 4.4. Líneas base

Las líneas base serán utilizadas para llevar el seguimiento, verificación y medición de las acciones implementadas. El sistema de medición y el tablero de control de indicadores servirán para evaluar si los objetivos y metas estratégicas se están cumpliendo de acuerdo al plan de implementación.

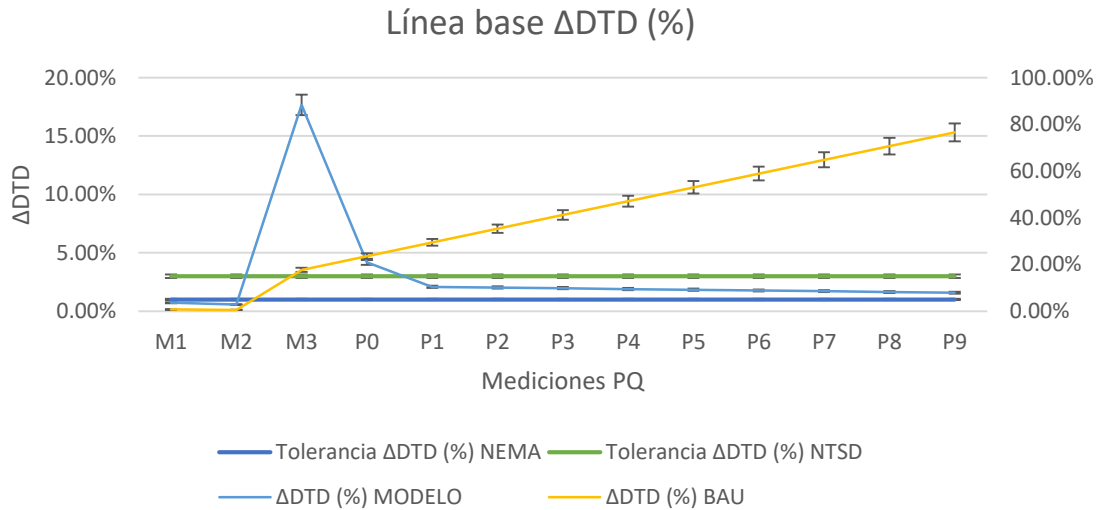
Figura 48. Línea base de regulación de voltaje



Fuente: elaboración propia.

El plan de implementación en el escenario modelo tiene el objetivo de reducir el indicador de regulación de voltaje a un valor cercano a 0.2 %. En caso que no se implemente el plan al año 2, se supera la tolerancia de regulación de voltaje establecido en el NEC; y para el año 3 se supera la tolerancia establecida en las NTSD.

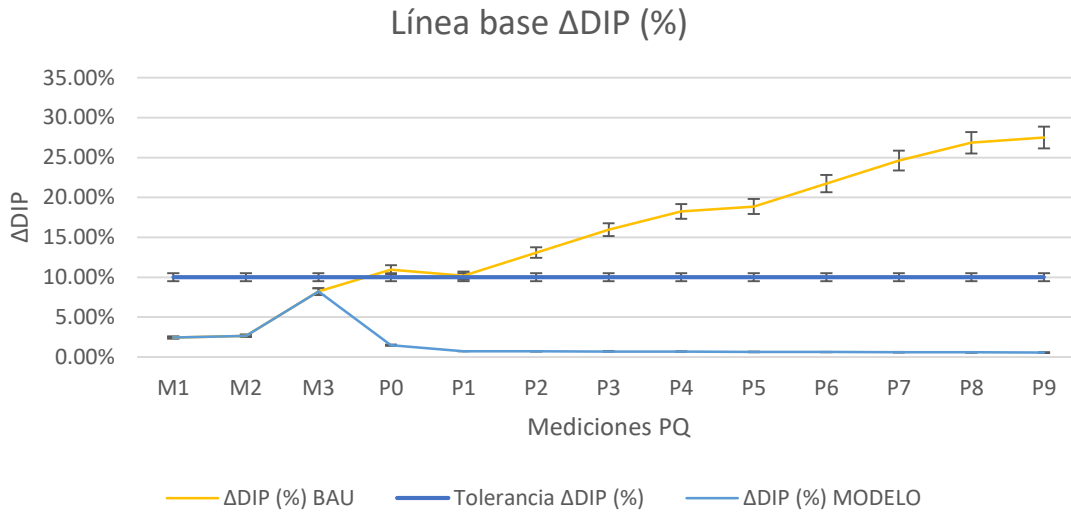
Figura 49. Línea base de desbalance de voltaje



Fuente: elaboración propia.

El plan de implementación en el escenario modelo tiene el objetivo de reducir el indicador de desbalance de voltaje a un valor cercano a 1.6 %. En caso que no se implemente el plan al año 2, se estarían alcanzando valores muy elevados que podrían llegar a afectar, principalmente, a los motores. Se observa que la condición de neutroflotante provocaría un escenario en el que los equipos podrían sufrir daños graves.

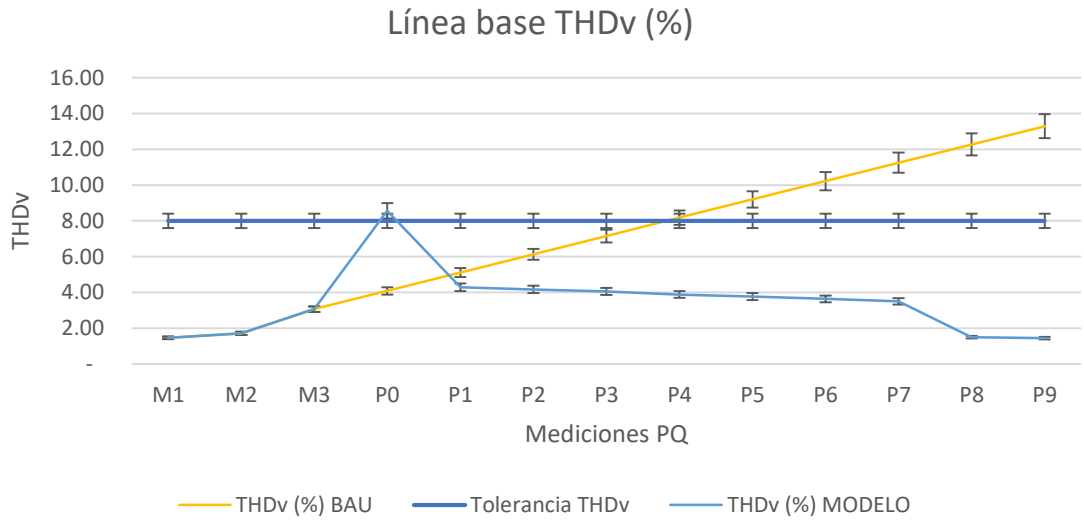
Figura 50. Línea base de desbalance de corriente



Fuente: elaboración propia.

El plan de implementación en el escenario modelo tiene el objetivo de reducir el indicador de desbalance de corriente a un valor cercano a 0.6 %. En caso que no se implemente el plan al año 1, se supera la tolerancia de desbalance de corriente establecida en las NTSD.

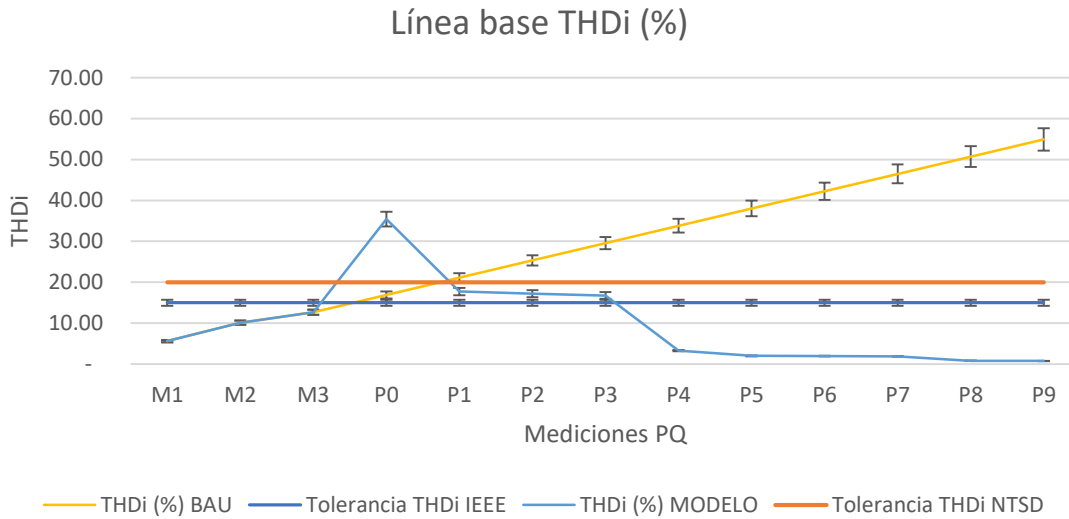
Figura 51. Línea base de distorsión armónica de voltaje



Fuente: elaboración propia.

El plan de implementación en el escenario modelo tiene el objetivo de reducir el indicador de distorsión armónica total de voltaje a un valor cercano a 1.5 %. En caso que no se implemente el plan al año 2 se supera la tolerancia de distorsión armónica total de voltaje establecida en las NTSD.

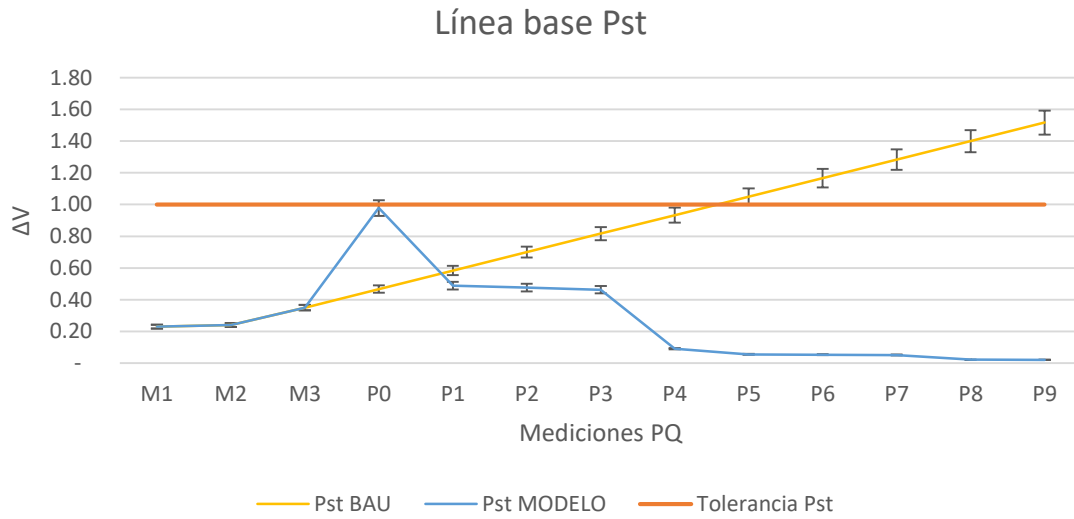
Figura 52. Línea base de distorsión armónica de corriente



Fuente: elaboración propia.

El plan de implementación en el escenario modelo tiene el objetivo de reducir el indicador de distorsión armónica total de corriente a un valor cercano a 0.8 %. En caso que no se implemente el plan al año 1, se supera la tolerancia de distorsión armónica total de corriente establecido en las IEEE y se supera la tolerancia establecida en las NTSD.

Figura 53. Línea base de *flicker*

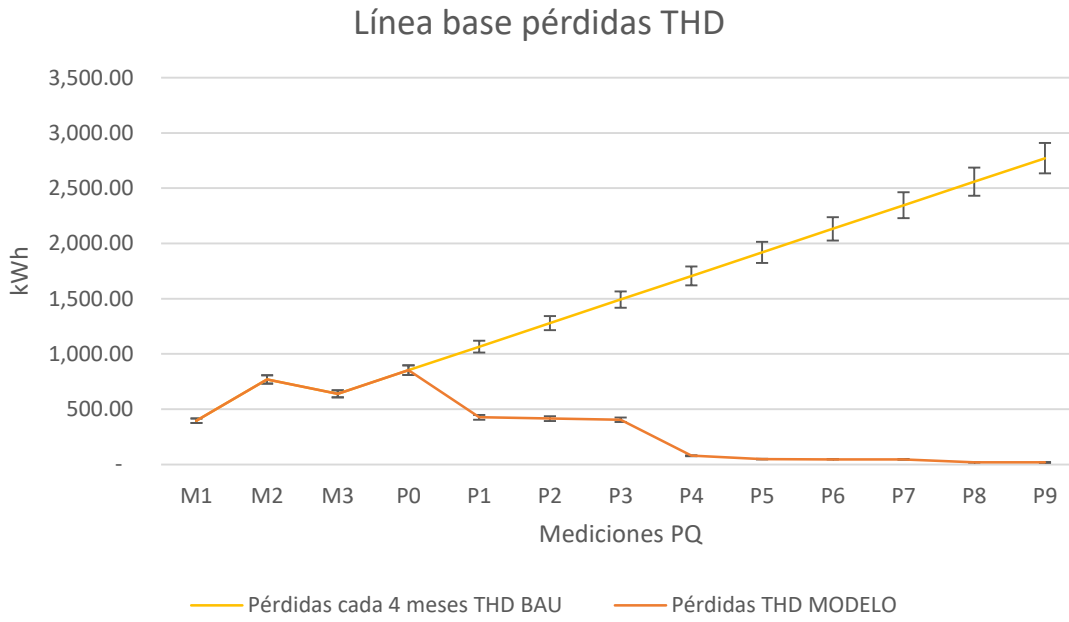


Fuente: elaboración propia.

El plan de implementación en el escenario modelo tiene el objetivo de reducir el indicador de *flicker* a un valor cercano a 0.02. En caso que no se implemente el plan al año 2 se supera la tolerancia de *flicker* establecida en las NTSD.



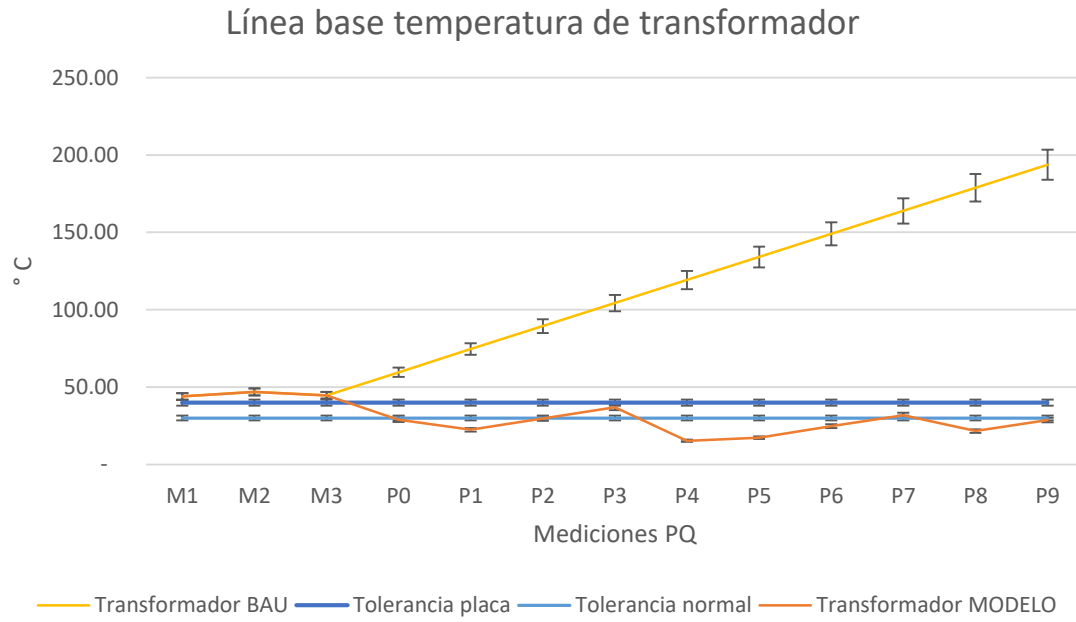
Figura 54. Línea base de pérdidas por armónicos



Fuente: elaboración propia.

El plan de implementación en el escenario modelo tiene como objetivo reducir las pérdidas por armónicos hasta 82 kWh al año. En el año base, las pérdidas por armónicos son aproximadamente de 1800 kWh; se estima que, si no se implementa el plan al año 3 se pueden elevar las pérdidas por armónicos a valores cercanos a los 7,500 kWh al año, 4.5 veces más respecto al año base. Existe un potencial de ahorro de Q5,500.00 al reducir las pérdidas por distorsión armónica para el año 3.

Figura 55. Línea base de temperatura del transformador



Fuente: elaboración propia.

El plan de implementación en el escenario modelo tiene el objetivo de reducir la temperatura del transformador a un valor cercano a 28.74 °C. En caso que no se implemente el plan al año 2 se alcanzarían valores de temperatura muy elevados que pueden dañar el transformador y el resto de quipos dentro de la planta.

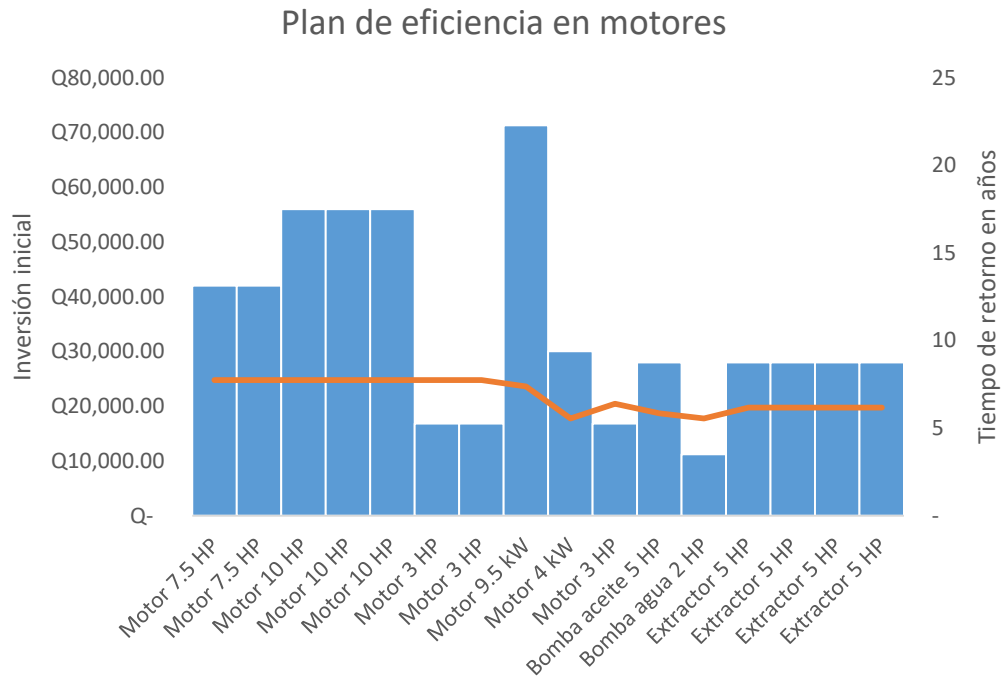
#### **4.5. Desarrollo del modelo de gestión de mantenimiento utilizando un sistema de medición de calidad de energía**

“El sistema de monitoreo de variables e indicadores de calidad de energía será el factor clave para que el sistema de gestión de la energía, cumpla con los objetivos y metas establecidos con la alta dirección”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 8). La implementación de las acciones de mejora resultados de las auditorías PQ, garantizan que los equipos sensibles y significativos dentro de la planta operaran con valores muy cercanos a sus valores nominales de placa. Esto significa que existe una reducción de las pérdidas por efecto joule  $I^2R$  y de los costos de mantenimiento, con lo cual se cumple la meta de realizar la conservación de la energía.

La carga de motores representa entre 60 a 70 % de la carga total de la planta, la capacidad total instalada en motores de inducción es de 80 kW y se estima que operan con un factor de carga diario de 0.55. Asimismo, que el consumo anual de la carga de motores es de aproximadamente 225,500 kWh, lo cual representa un costo de energía sin IVA de Q162,000.00.

Los resultados de la auditoría PQ están orientados a mejorar el desempeño energético de los motores, incrementar su vida útil y se propone un plan de implementación para la conservación de la energía. El plan de eficiencia energética inicia a partir del año 4, las acciones de mejora implementadas durante los siguientes 6 años resultan en una reducción del consumo energético aproximado de 73,000 kWh y un ahorro aproximado de Q53,000.00.

Figura 56. Plan de gestión de potencia en motores



Fuente: elaboración propia.

El sistema de medición será la herramienta principal para realizar una gestión de la energía de forma oportuna. Los medidores instalados en los puntos de consumo significativo y en cargas sensibles, mantendrán actualizada la base de datos a través de software y servirán para que el sistema de reporte y monitoreo cuente con una aplicación automática de actualización de información.

La tabla XVI muestra los costos de los sistemas de medición clasificándolos por su categoría, características y número de salidas o puntos de control. Existen cuatro clasificaciones de acuerdo a su costo y categoría, desde un simple monitoreo hasta un sistema de control de energía total.

- Categoría I: equipos capaces de registrar consumos de energía y registro de alarmas al superar los límites. El éxito de este sistema se basa en que las acciones de control realizadas por el operador sean oportunas.
- Categoría II: es un sistema con equipos capaces de tomar decisiones sobre cuando se deben apagar los equipos, en qué orden y por cuánto tiempo. Las configuraciones del sistema pueden ser cambiadas por el operador utilizando los botones en la parte frontal del controlador. Este tipo de equipos usualmente se utiliza para control de la demanda y los ahorros asociados. Es por ello que se utiliza en edificios comerciales y en industrias que no tienen como prioridad la optimización de sus procesos.
- Categoría III: son equipos de minicomputadoras que tienen la capacidad de control de demanda y energía, así como registros, gráficos de tendencia, alarmas y rutinas de optimización. La capacidad de estos sistemas está limitado únicamente por el tamaño de la memoria y la cantidad de entradas y salidas. Tomar en cuenta que en algunos casos, la programación del software puede igualar o exceder el costo del hardware, especialmente, si el cliente desea realizar la mayor parte del trabajo de desarrollo del sistema.
- Categoría IV: describe un sistema de control de energía total que cuenta con todas las características de los anteriores, y además cuenta con el monitoreo completo y varios miles de puntos. Generalmente usado en plantas muy grandes, edificios grandes de oficinas, universidades o colegios o cualquier aplicación que requiera el control de monitoreo de miles de puntos, usualmente se realiza por métodos multiplex de comunicación de datos.

Tabla XVI. Costo del sistema de monitoreo, verificación y reporte MRV

Categoría	Costo unitario del equipo	Costo unitario de instalación	Salida	Cambios de programación	Características	Observaciones
	\$/unidad	\$/unidad				
I	\$ 1,000.00	\$ 1,000.00	1	No disponibles	Monitoreo de alarmas y almacenamiento en memoria de la demanda.	Confiar en las acciones y decisiones tomadas por el operador.
Monitoreo manual	\$ 4,000.00	\$ 4,000.00				
II	\$ 3,000.00	\$ 300.00	1	Personal de operaciones, uso de botones	Control de alarmas de demanda y conservación de la energía.	El operador puede cambiar la secuencia de prioridades.
Hardware	\$ 15,000.00	\$ 1,000.00	48			
III	\$ 20,000.00	\$ 200.00	48	Personal de operaciones uso de consolas, SCADA, funciones clave	Control de alarmas de demanda y conservación de la energía. Optimización, tendencias, gráficas.	Las características de programación están limitadas únicamente por el tamaño de la memoria.
Minicomputadoras	\$ 80,000.00	\$ 800.00	640			
IV	\$ 100,000.00	\$ 100.00	Miles	Personal de operaciones es uso de consolas, SCADA, funciones clave	Todas las características anteriores, más un sistema de control de monitoreo completo.	Este sistema realiza funciones de monitoreo y optimización e incluye ahorros potenciales en mano de obra.
Control total de energía	\$ 400,000.00	\$ 600.00				

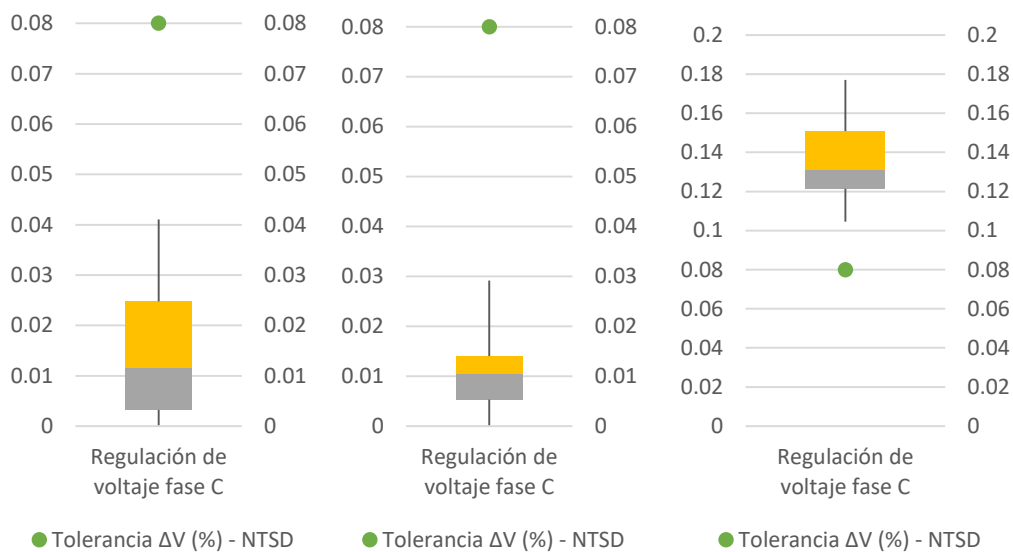
Fuente: (DRANETZ, 2013, p. 16)

Para este estudio se propone una alternativa de alquiler, si se desea contar con un sistema MRV con soporte local. Esta opción puede ser presentada por el distribuidor de energía con la ventaja que cualquier daño, pérdida de datos, corrupción de información o soporte técnico requerido correrá a cuenta de la distribuidora. Otra ventaja adicional es que deberán ofrecer capacitación para el personal de operaciones que tenga relación con el sistema MRV y se podrán personalizar los reportes de las auditorías.

- Costo mensual de medición de calidad de energía y teledatada \$.100.00. Costo anual de \$12,000.00.
- Costo único de instalación por punto \$ 50.00.
- Costo por personalización de reportes, programas de optimización, gráficas de tendencia y control de alarmas \$. 20,000.00 a \$80,000.00. El costo de la personalización del sistema MRV dependerá del tamaño de la instalación.

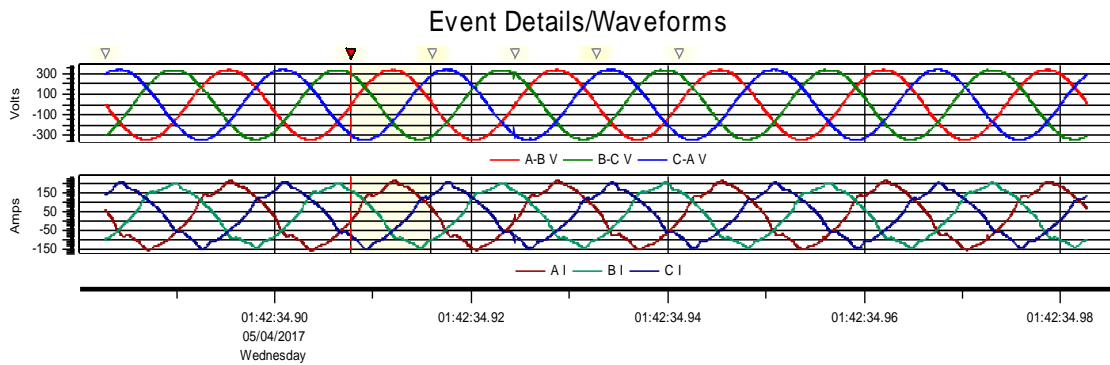
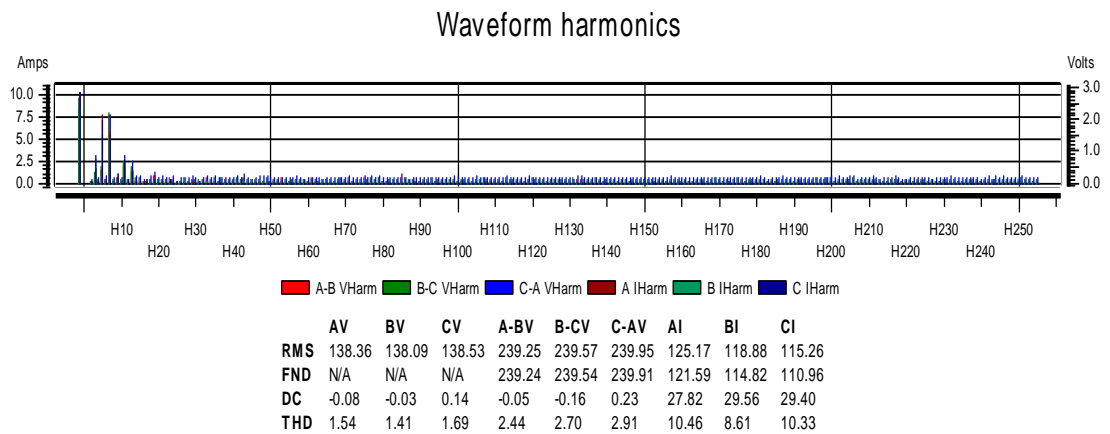
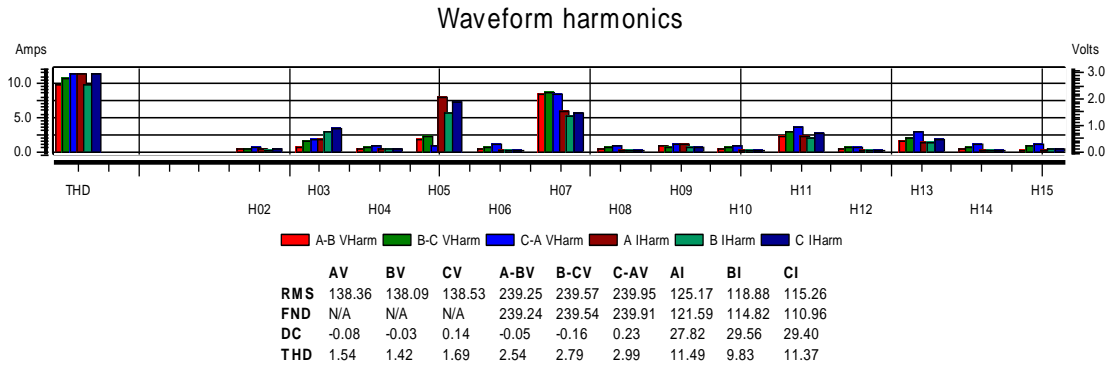
#### 4.6. Análisis del tablero de control de indicadores

Figura 57. Regulación de voltaje fase C M1, M2 y M3



Fuente: elaboración propia.

Figura 58. Espectro de armónicos de voltaje y corriente medición 1



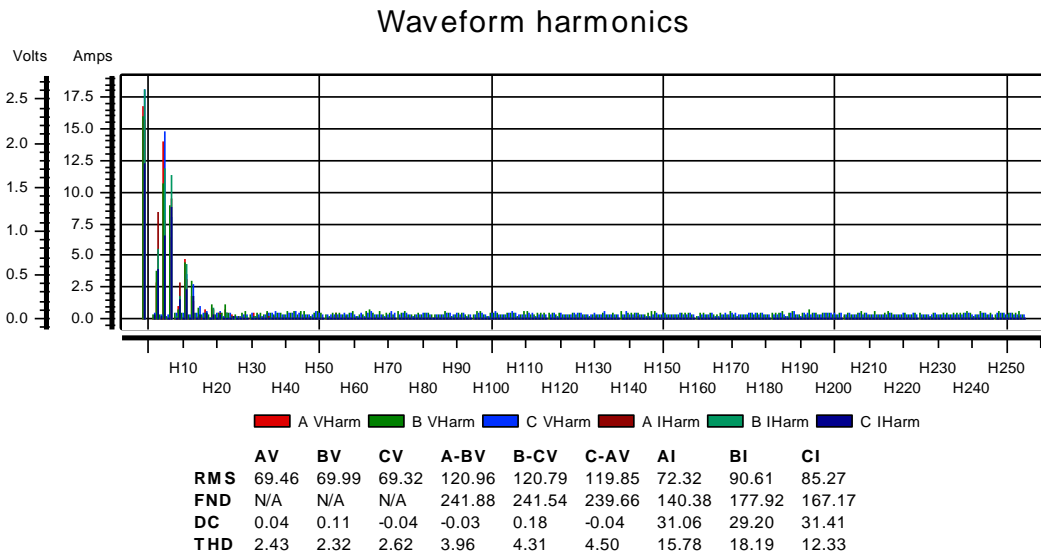
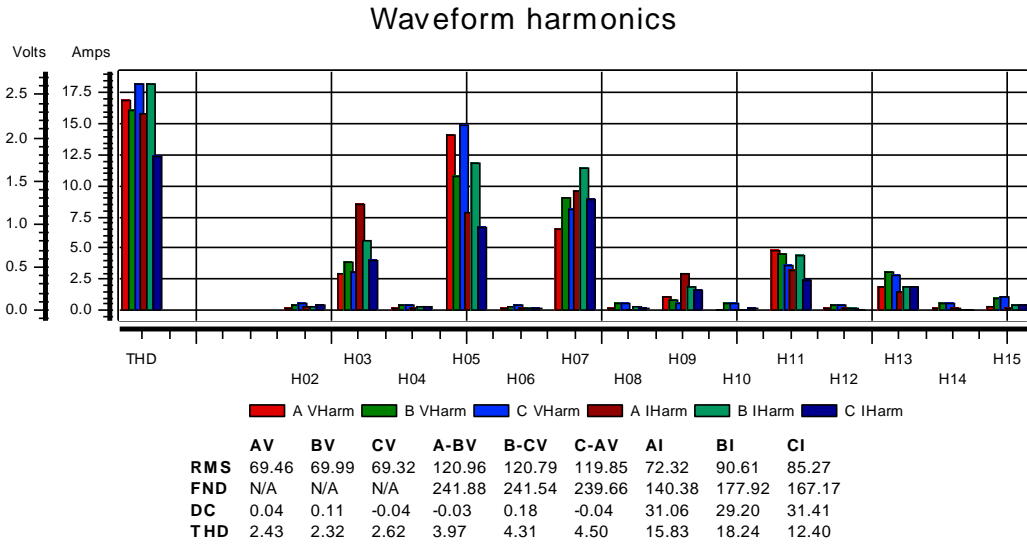
Event #420 at 05/04/2017 01:42:34.907  
A-BV Dropout 1/16 Cyc

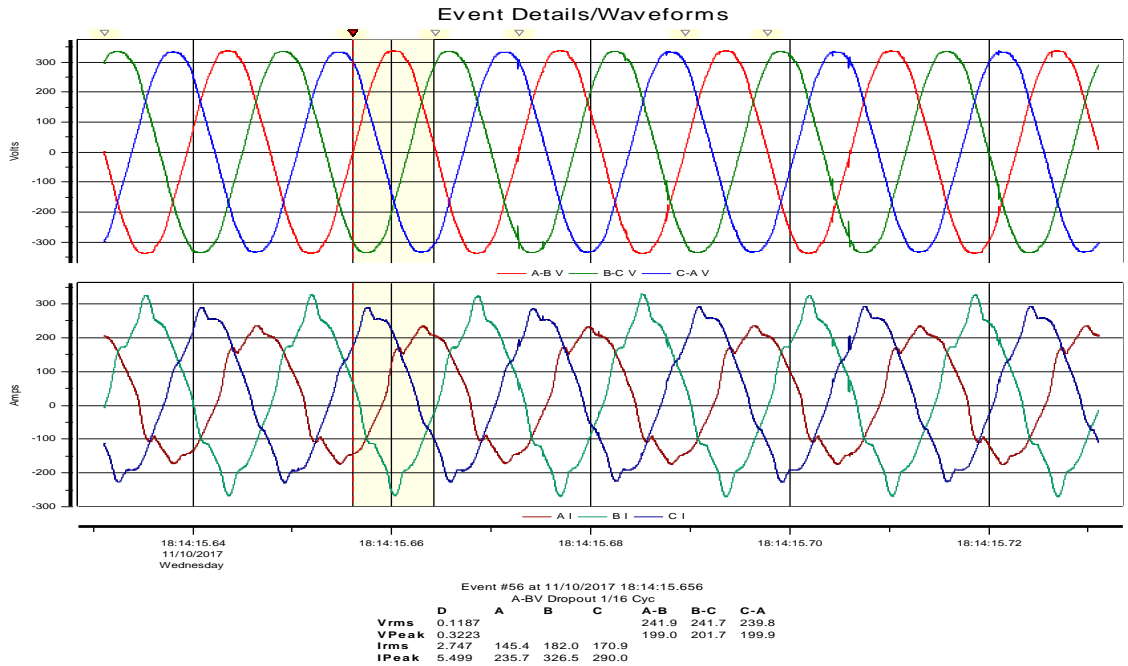
	D	A	B	C	A-B	B-C	C-A
<b>Vrms</b>	0.1114				239.3	239.7	240.1
<b>VPeak</b>	0.3223				196.9	197.9	199.2
<b>Irms</b>	35.51	125.1	119.4	115.4			
<b>IPeak</b>	39.33	214.8	204.1	212.0			

Fuente: elaboración propia.



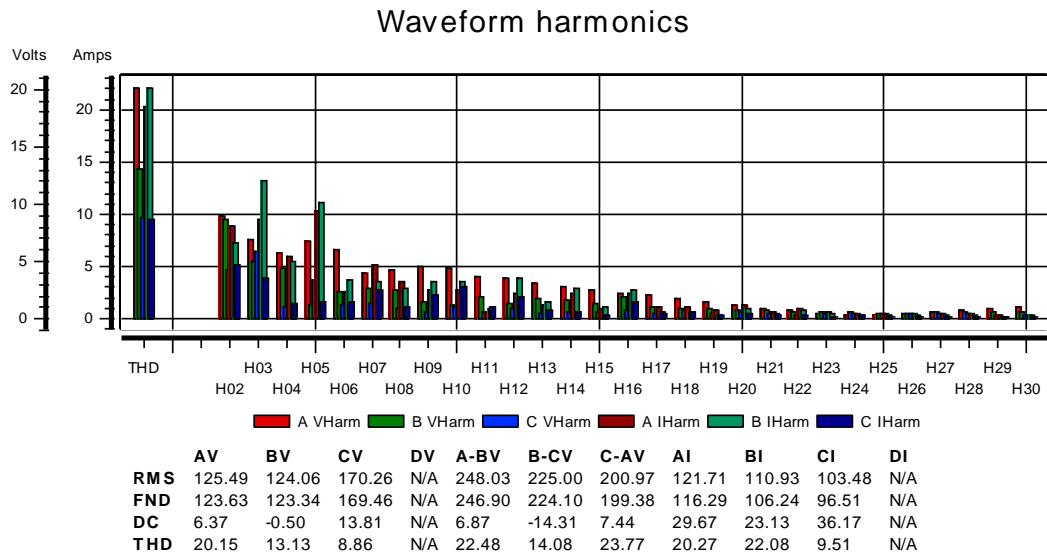
Figura 59. Espectro de armónicos de voltaje y corriente medición 2



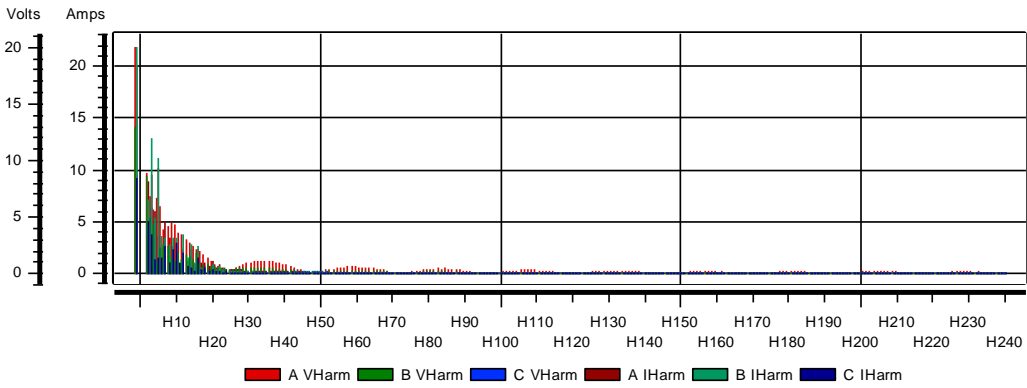


Fuente: elaboración propia.

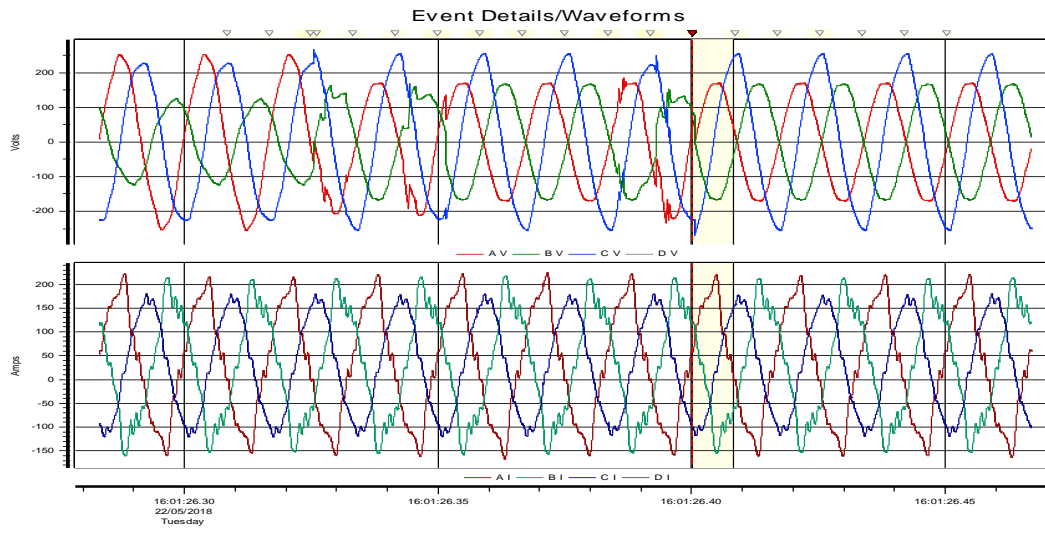
Figura 60. Espectro de armónicos de voltaje y corriente medición 3



## Waveform harmonics



	AV	BV	CV	DV	A-BV	B-CV	C-AV	AI	BI	CI	DI
<b>RMS</b>	125.49	124.06	170.26	N/A	248.03	225.00	200.97	121.71	110.93	103.48	N/A
<b>FND</b>	123.63	123.34	169.46	N/A	246.90	224.10	199.38	116.29	106.24	96.51	N/A
<b>DC</b>	6.37	-0.50	13.81	N/A	6.87	-14.31	7.44	29.67	23.13	36.17	N/A
<b>THD</b>	20.15	13.13	8.85	N/A	22.48	14.08	23.77	20.15	21.97	9.26	N/A

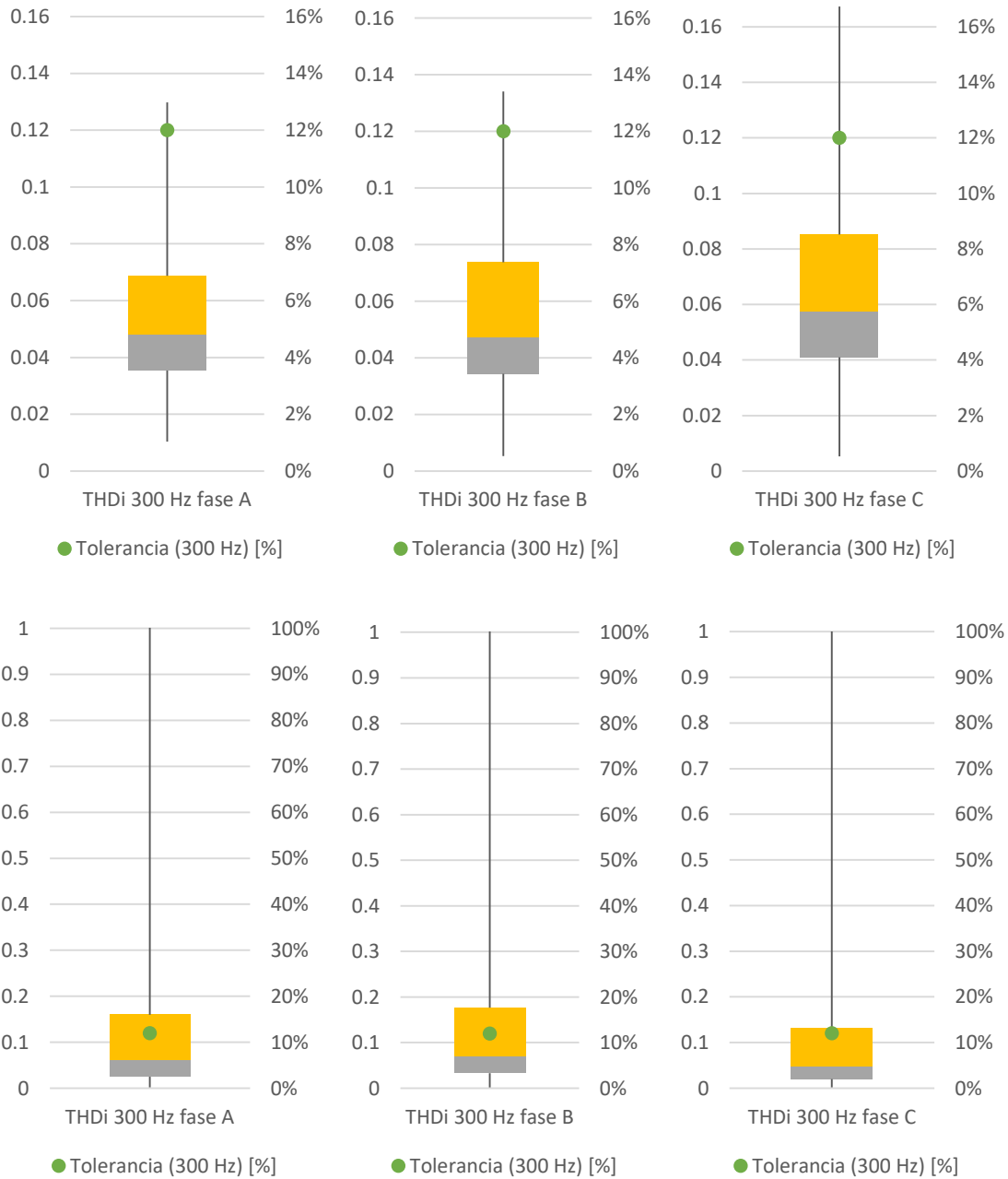


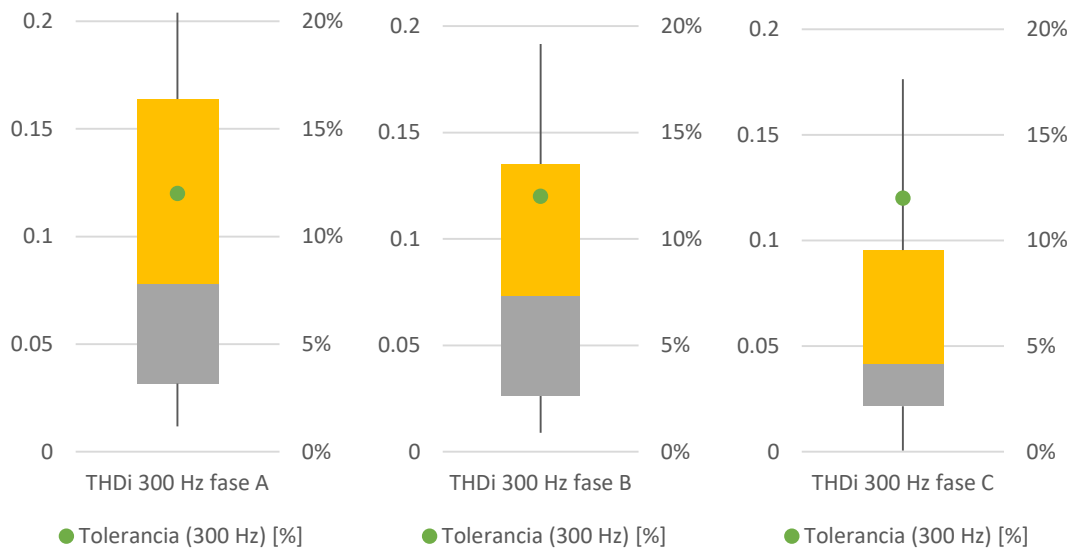
Event #84 at 22/05/2018 16:01:26.400

	A	B	C	D	A-B	B-C	C-A
<b>Vrms</b>	138.6	113.8	170.2	36.80	243.6	231.6	212.9
<b>VPeak</b>	234.9	168.1	270.5	66.73			
<b>Irms</b>	118.2	112.7	103.0	3.984			
<b>IPeak</b>	220.3	213.4	179.7	8.326			

Fuente: elaboración propia.

Figura 61. Quinto armónico de corriente





Fuente: elaboración propia.

El tablero de control de indicadores refleja los resultados de las mediciones de la auditoría PQ, la condición de neutro flotante tiene un efecto negativo en el resto de indicadores y se ve reflejado en el tablero de tendencias. El nivel de armónicos incrementa significativamente,

El sistema de medición de variables de calidad de energía registra, monitorea, genera gráficos de tendencia, alarmas, rutinas de optimización y almacena información en tiempo real. El sistema integrado deberá ser capaz de discriminar este tipo de fallas y prevenirlas.

A continuación se analiza el algoritmo, por medio del cual el sistema MRV detecta una condición anormal e interpreta que existe un riesgo para el variador de frecuencia por un nivel elevado de armónicos de corriente. El operador deberá tomar una decisión por las alertas registradas en el SCADA.

En la medición 1 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y 2, es menor que la caja entre el cuartil 2 y 3. Esto demuestra que los valores de distorsión armónica de corriente entre el 25 y el 50 % de los registros están más concentrados que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 0.5 % del índice de distorsión armónica de corriente. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 8.52 y 16.73 %, lo cual demuestra una mayor dispersión de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 5.74 %, es decir que, el 50 % de los registros están por debajo de este valor. Se generan alarmas por superar la tolerancia establecida en las Normas IEEE de 12 % en las tres fases.

En la medición 2 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y 2, es menor que la caja entre el cuartil 2 y 3. Esto demuestra que los valores de distorsión armónica de corriente entre el 25 y el 50 % de los registros están más concentrados que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran concentrados por debajo de 0.1 % del índice de distorsión armónica de corriente. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 17.7 % y más de 100 %, lo cual demuestra una mayor dispersión de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 7.09 %, es decir que, el 50 % de los registros están por debajo de este valor. Se generan alarmas por superar la tolerancia establecida en las Normas IEEE de 12 % en las tres fases.

En la medición 3 se observa que la parte inferior de la caja entre el cuartil 1 y 2, es menor que la caja entre el cuartil 2 y 3. Esto demuestra que los valores de distorsión armónica de corriente entre el 25 y el 50 % de los registros están más concentrados que entre el 50 y el 75 %. El bigote inferior es más corto que el superior, esto significa que el 25 % de los registros se encuentran concentrados

por debajo de 1.18 % del índice de distorsión armónica de corriente. Los valores entre el cuartil 3 y límite superior oscilan entre el 16.38 y 20.39 %, lo cual demuestra una mayor dispersión de los registros del bigote superior. El rango intercuartilico se encuentra en 7.82 %, es decir que, el 50 % de los registros están por debajo de este valor. Se generan alarmas por superar la tolerancia establecida en las Normas IEEE de 12 % en las tres fases y las tolerancias establecidas en las NTSD en la fase a.

Los espectros y oscilografías ayudan a determinar qué armónicos tienen mayor impacto en las fallas y pérdidas registradas por el sistema MRV. En la tercera medición se observa que la distorsión armónica total THD se amplifica. Se sospecha de resonancia en el banco de capacitores.

#### 4.7. Plan de eficiencia energética

Las acciones de mejora recomendadas en los primeros tres años son resultado de la auditoría PQ, del año 4 al 10 se realizan las acciones priorizadas de acuerdo a un plan de eficiencia energética resultado de una auditoría energética.

Tabla XVII. **Priorización de medidas de mejora**

Acción de mejora	Inversión	Ahorro	T. R.	TIR %	VPN
	Q SIN IVA	Q/año			
<b>Mejoras a la instalación eléctrica</b>	Q156,576.00	Q38,140.36	4	77	Q417,676.90
<b>Instalación de soluciones PQ (armónicos)</b>	Q361,200.00	Q60,458.86	6	59	Q549,087.14
<b>Ingreso de línea de producción 3</b>	Q809,010.00	Q56,672.44	14	56	Q328,693.46
<b>Gestión de la potencia</b>	Q28,880.00	Q15,391.40	2	53	Q48,365.87

<b>Cambio de motores 10 HP L1</b>	Q168,000.00	Q21,722.07	8	5	-Q58,981.95
<b>Cambio de motores 7.5 HP L1</b>	Q84,000.00	Q10,861.04	8	5	-Q29,490.98
<b>Cambio de motores 3 HP L1</b>	Q33,600.00	Q4,344.41	8	5	-Q11,796.39
<b>Cambio de motor 9.5 kW L2</b>	Q71,313.67	Q9,676.19	7	6	-Q22,751.13
<b>Cambio de motor 4 kW L2</b>	Q30,026.81	Q5,405.96	6	12	-Q2,895.52
<b>Cambio de motor 3 HP L2</b>	Q16,800.00	Q2,627.23	6	9	-Q3,614.52

Fuente: elaboración propia.

Las acciones de mejora del plan de eficiencia energética están priorizadas de acuerdo al tiempo de retorno de la inversión y a la tasa interna de retorno. Las acciones de mejora son las siguientes:

- Auditoría PQ acciones de conservación de la energía
  - Año 1: realizar mejoras en la instalación eléctrica de la planta balance de cargas, mejora del sistema de tierras e instalar un supresor de picos.
  - Año 2: hacer el cambio de 7 motores de uso continuo por motores de alta eficiencia (4 extractores de 5 HP, bomba de aceite de 5 HP y bomba de agua de 2 HP), instalar filtro de armónicos y transformadores de aislamiento a la salida de los variadores de frecuencia.
  - Año 3: efectuar una auditoría PQ antes y después de instalar la nueva línea de producción.
- Auditoría energética, acciones de eficiencia energética



- Año 4: cambio de tres motores de 10 HP por motores de alta eficiencia en la línea de producción uno.
- Año 5: cambio de dos motores de 7.5 HP por motores de alta eficiencia en la línea de producción uno.
- Año 6: cambio de dos motores de 3 HP por motores de alta eficiencia en la línea de producción uno.
- Año 7: cambio de tres motores de 10 HP por motores de alta eficiencia en la línea de producción uno.
- Año 8: cambio de un motor de 9.5 kW por un motor de alta eficiencia en la línea de producción dos.
- Año 9: cambio de un motor de 4 kW por un motor de alta eficiencia en la línea de producción dos.
- Año 10: cambio de un motor de 3 HP por un motor de alta eficiencia en la línea de producción dos.

Tabla XVIII. Plan de eficiencia energética

A	Acción de mejora	Consumo actual año (kWh)	Ahorro anual (kWh)	Consumo esperado (kWh)	Q./k Wh	Costo anual de energía Q	Ahorro anual Q
1	Mejoras a la instalación eléctrica	346,880.00	2,820.77	344,059.23	0.72	248,523.99	-
2	Instalación de soluciones PQ (armónicos)	344,059.23	33,375.94	310,683.29	0.72	224,415.57	24,108.41
3	Ingreso de línea de producción 3	310,683.29	5,298.41	305,384.88	0.72	220,588.38	3,827.19
4	Gestión de la potencia	305,384.88	-	305,384.88	0.72	220,588.38	-
5	Cambio de motores 10 HP L1	305,384.88	28,995.58	276,389.30	0.72	199,644.03	20,944.35
6	Cambio de motores 7.5 HP L1	276,389.30	14,497.79	261,891.51	0.72	189,171.85	10,472.18
7	Cambio de motores 3 HP L1	261,891.51	5,799.12	256,092.39	0.72	184,982.98	4,188.87
8	Cambio de motor 9.5 kW L2	256,092.39	12,916.20	243,176.18	0.72	175,653.23	9,329.75
9	Cambio de motor 4 kW L2	243,176.18	7,216.12	235,960.06	0.72	170,440.82	5,212.41
10	Cambio de motor 3 HP L2	235,960.06	3,506.95	232,453.11	0.72	167,907.64	2,533.17

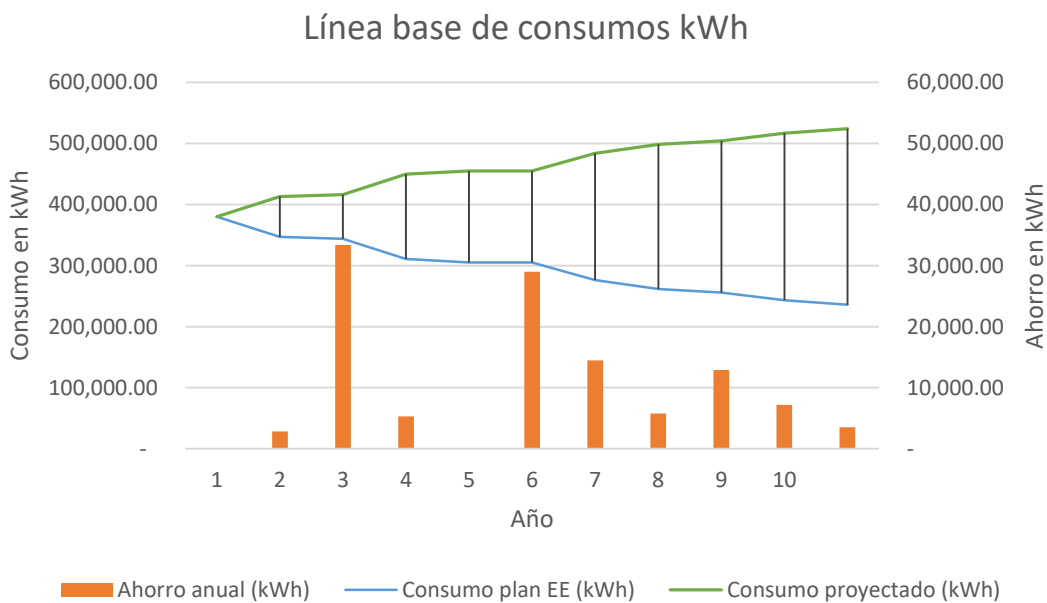
Fuente: elaboración propia.

La implementación de acciones de la auditoría PQ permitirá reducir las fallas por mala calidad de energía, las pérdidas en el sistema eléctrico. La implementación de acciones de eficiencia energética posibilitará optimizar la gestión de la energía.

#### 4.8. Línea base del plan de eficiencia energética

En cualquier sistema de gestión de la energía es necesario considerar realizar una auditoría de calidad de energía eléctrica, antes de realizar inversiones altas en un sistema de control y optimización para obtener ahorros energéticos. La justificación económica para implementar un sistema MRV varía de un establecimiento a otro, especialmente cuando se consideran otras formas de lograr los mismos resultados.

Figura 62. Línea base de consumos del plan de eficiencia energética

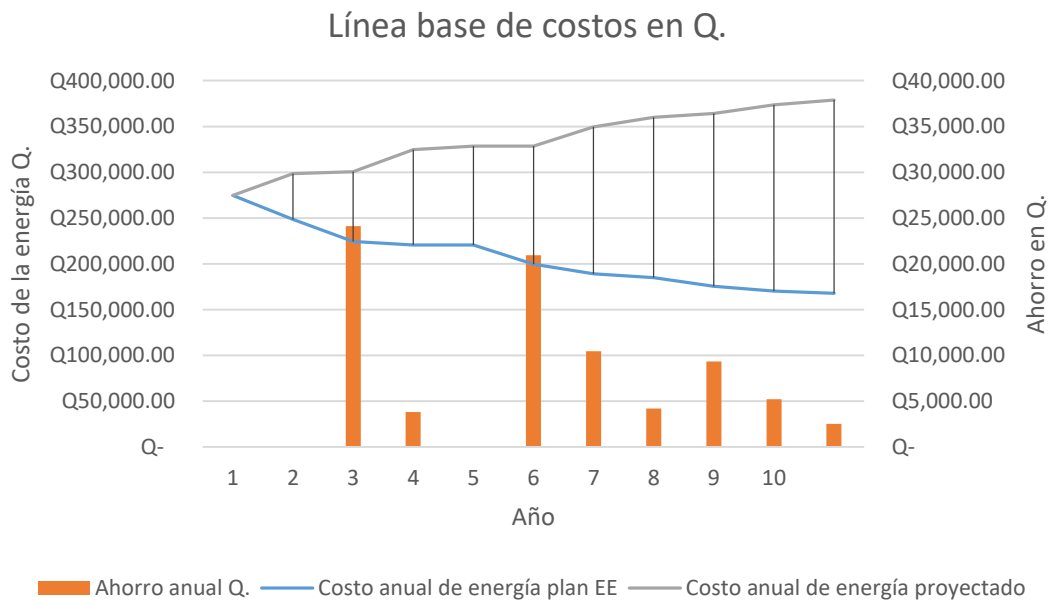


Fuente: elaboración propia.

En la figura 62 se muestra que la línea base de consumos de energía refleja un potencial de ahorro energético de 12,000 kWh al año. El plan de eficiencia energética tiene como objetivo reducir un 3% el consumo anual de

energía eléctrica. La implementación de acciones de mejora del año 1 al año 3, resultan en una reducción de pérdidas I<sup>2</sup>R y una reducción de las fallas por mala calidad de energía. La implementación de acciones de mejora del año 4 al año 10, resultan en un ahorro energético por el cambio a motores de alta eficiencia.

Figura 63. Línea base de costos del plan de eficiencia energética



Fuente: elaboración propia.

Frecuentemente es difícil comprobar los retornos de inversión de un sistema de monitoreo, verificación y reporte MRV, ya que el rendimiento energético y la demanda son variables en el tiempo. Es primordial que el sistema MRV cuente con un sistema de medición de variables de calidad de energía que permita modelar la demanda con respecto al tiempo de por lo menos un ciclo completo de operación de la industria. Si contamos con un sistema de medición que abastece de información a una base de datos, y a su vez, se cuenta con un software que permite optimizar,

graficar tendencias, controlar alarmas; lograremos cumplir con el ciclo de mejora continua en el sistema de gestión (DRANETZ, 2013, p. 15)

La línea base de costos refleja un potencial de ahorro promedio de Q9,000.00 al año. El plan de eficiencia energética tiene como objetivo reducir un 3 % los costos totales de energía eléctrica.

Para el presente estudio no se están incluyendo dentro de los indicadores o ratios las tasas de falla por equipo y tampoco se considera la reducción de costos por daños, repuestos o paros de producción. Al considerar todos estos costos dentro del potencial de ahorro, implementar el plan de eficiencia energética, se obtienen tiempos de retorno muy buenos y sí se justifica la implementación de un sistema MRV para la gestión del mantenimiento.

“El sistema MRV es crítico para llevar el seguimiento, medición y verificación del cumplimiento de los objetivos y metas estratégicas, técnicas y operativas establecidos por la empresa con el apoyo de la alta dirección”. (Norma Internacional ISO 50001, 2011, p. 18).

De acuerdo a lo que establece el estándar IEEE-446 1987, si se asume un daño de un diodo en la etapa rectificadora de un variador de frecuencia por la presencia de altas corrientes armónicas, hay que considerar lo siguiente:

- Número de empleados: 50.
- Salario base de empleados afectados: \$. 2.00 por hora.
- Salario por tiempo extra de los empleados afectados: \$. 4.00 por hora.
- Duración total de la interrupción: 24 horas.
- Cantidad de unidades que se dejan de producir: 200,000.
- Utilidad por unidad producida: \$10.00.

- Tiempo para arrancar nuevamente: 1 hora.
- Número de empleados involucrados en arranque: 5.

Tabla XIX. **Costo total de falla por mala calidad de energía**

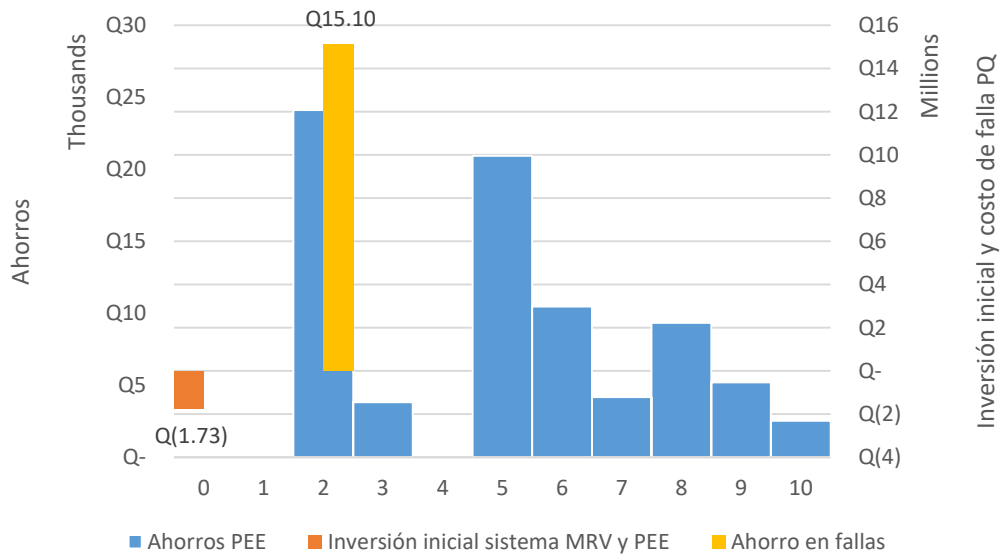
<b>Costo de mano de obra de trabajadores afectados</b>	<b>\$8,400.00</b>	<b>USD</b>
<b>Pérdida de utilidad por unidades que se dejaron de producir</b>	<b>\$2,000,000.00</b>	<b>USD</b>
<b>Costo del nuevo arranque</b>	<b>\$30.00</b>	<b>USD</b>
<b>Costo total de la interrupción de suministro</b>	<b>\$2,008,430.00</b>	<b>USD</b>
<b>Costo del equipo dañado</b>	<b>\$5,200.00</b>	<b>USD</b>
<b>Costo total debido al paro no deseado</b>		<b>\$2,013,630</b>

Fuente: elaboración propia.

Justificar la implementación del sistema MRV para reducir las fallas por mala calidad de energía eléctrica y considerar que en el escenario base, todos los indicadores de calidad de energía superan las tolerancias en el año 2, se asume que en este momento se presentará una falla que puede costar \$. 2, 013,630.00 a la empresa.

Si se implementa el sistema de medición y las acciones de mejora del plan de eficiencia energética se obtendrán los resultados que se muestran en la figura 64.

Figura 64. Flujo neto al implementar el sistema MRV y plan de eficiencia energética



Fuente: elaboración propia.

Por medio de la figura 64 se puede justificar la inversión en el sistema MRV y la implementación del plan de eficiencia energética.

En el eje primario se presentan los ahorros anuales al implementar el plan de eficiencia energética. En el secundario se presenta la inversión inicial que incluye el sistema de medición y la implementación de acciones de mejora del plan y el costo de una falla por altas corrientes armónicas que dañan la etapa de rectificación del variador de frecuencia de la línea de producción uno.

Se asume una falla en el año 2, ya que en las líneas base de indicadores de calidad de energía presentada en el capítulo anterior se observa que, en caso

de no implementar las acciones de mejora resultado de la auditoría PQ, se estarían superando las tolerancias establecidas en las normas.

En este escenario se da una justificación técnica y económica para implementar el sistema MRV, que permita desarrollar un modelo de gestión de mantenimiento predictivo para reducir las fallas por mala calidad de energía eléctrica en una industria de alimentos con una demanda máxima de 150 kW.

Los resultados del análisis económico presentan una TIR por encima del 100 %, ya que el costo de falla por mala calidad de energía supera 9 veces la inversión inicial. Se estima que en este escenario el periodo de retorno del sistema MRV es de aproximadamente 1 año, porque se considera que la falla ocurrida se pudo prevenir realizando las acciones del plan de conservación de la energía en los años 1 al 3.

Tabla XX. **Valor presente, TIR y tiempo de retorno del sistema MRV**

<b>VPN</b>	Q 9,729,675.60
<b>TIR</b>	196 %
<b>TR</b>	0.11
<b>Periodo</b>	10 años
<b>Tiempo retorno</b>	1

Fuente: elaboración propia.

El sistema MRV se justifica, incluso si ocurriera una falla en el año 2 que represente un costo estimado de \$. 300,000 presentando una TIR de 15 % y un tiempo de retorno de inversión de 7 años.





## CONCLUSIONES

1. El modelo de gestión de mantenimiento desarrollado para reducir las fallas por mala calidad de energía eléctrica en una de industria de alimentos, incrementa la eficiencia general y mejora la confiabilidad de los equipos al implementar las acciones del plan de conservación de la energía.
2. Se estableció que las tolerancias para los indicadores utilizados en el control y optimización del sistema de monitoreo, verificación y reporte son  $\pm 5 \%$  en regulación de voltaje, 3 % en desbalance de voltaje, 10 % en desbalance de corriente, 8 % en armónicos de voltaje, 12 % en armónicos de corriente, 1 en *flicker* y 40 °C de temperatura.
3. El método de análisis modal de fallas, efectos y criticidad responde a las necesidades del modelo de gestión de mantenimiento predictivo para reducir las fallas por mala calidad de energía en equipos críticos.
4. La implementación de acciones de mejora establecidas en las metas y objetivos de la auditoría de calidad de energía, presentan una tasa interna de retorno superior a la tasa mínima de rentabilidad exigida en los proyectos de inversión.
5. Se implementó un sistema de monitoreo, verificación y reporte de indicadores de calidad de energía que cumple con los requisitos de la Norma ISO 50001, iniciando con un plan para la conservación de la energía y luego se realiza un plan de eficiencia energética.



## RECOMENDACIONES

1. Evaluar en un estudio posterior los consumos no asociados a la producción, y así lograr identificar oportunidades de ahorro en los tiempos muertos de operación de la planta.
2. Establecer tendencias para los indicadores de tiempo medio entre fallas, disponibilidad y costos de mantenimiento para incluir dentro del modelo.
3. Desarrollar árboles de mantención para esquematizar los modos de falla y probabilidades de ocurrencia de eventos.
4. Realizar las líneas base para los indicadores de tiempo medio entre fallas, disponibilidad y costos de mantenimiento e incluirlos en el sistema MRV.
5. Desarrollar un software de adquisición de datos en tiempo real con telemedida y sistema SCADA para el control de los indicadores de calidad.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Administrador del Mercado Mayorista AMM - Resolución 157-15. (2013). Norma de coordinación operativa No. 4. Guatemala. Calvo, V. S. (2017). Calidad de Suministro Eléctrico. Madrid, España.
2. Leal, G. M. (22 de 10 de 2008). Calidad de la energía eléctrica: camino a la normalización. Nuevo León, México.
3. Centro Nacional de Metrología - CENAM. (2005). Compatibilidad electromagnética (emc) y normalización. México. Obtenido de <https://www.cenam.mx/dme/pdf/compatibilidad%20electromagnetic-a-sep30-2005.pdf>.
4. CIG. (s.f.). Cámara de Industria de Guatemala. Obtenido de Cámara de Industria de Guatemala: <http://cig.industriaguatemala.com/institucional/historia/>.
5. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (1999). Normas técnicas del servicio de distribución ntsd - Resolución CNEE-09-99. Guatemala.
6. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (1999). Normas técnicas de calidad del servicio de transporte y sanciones NTCSTS - Resolución CNEE-50-99. Guatemala.
7. Altmann, C. (2017). RELIABILITYWEB. Obtenido de Reliabilityweb.com: <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/el-mantenimiento-y-la-eficiencia-energetica>.

8. Administrador del Mercado Mayorista AMM - Resolución 157-15. (2013). Norma de coordinación operativa no. 4. Guatemala.
9. Antech El Salvador. (2017). Calidad de energía, armónicos y mantenimiento predictivo. El Salvador. Obtenido de <http://www.antechsv.com/search/?q=calidad+de+energia&submit=Search>
10. Avella, J. C. (2004). Calidad de la energía eléctrica. Obtenido de <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/calidad.pdf>.
11. Bethel, N. P. (2017). PdMA Corporation. Recuperado el 18 de 07 de 2017, de [www.PdMA.com](http://www.pdma.com): [http://www.pdma.com/pdfs/Articles/Analisis\\_de\\_Zonas\\_de\\_Falla.pdf](http://www.pdma.com/pdfs/Articles/Analisis_de_Zonas_de_Falla.pdf).
12. Dranetz. (1997). Handbook of power signatures. New Durham Road: Dranetz.
13. DRANETZ. (2003). The Dranetz-BMI field handbook for: power quality analysis. New Jersey: DRANETZ-BMI.
14. DRANETZ. (2013). The Dranetz field handbook for electrical energy management. New Durham Road: Dranetz technologies, Inc.

15. DRANETZ. (14 de octubre de 2017). Analizador de calidad de la energía integrable de vigilancia. Obtenido de Direct Industry: <http://www.directindustry.es/prod/dranetz/product-68717-1642812.html>
16. Eléctrica, C. N. (27 de agosto de 2002). Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Obtenido de Informe de Labores 1997 - 2002: <http://www.cnee.gob.gt/xhtml/memo/informe-1semestre2002.pdf>.
17. Eléctrica, C. N. (2012). Calidad . Fiscalización y control de calidad de los servicios de distribución y transmisión de energía eléctrica. Guatemala, Guatemala, Guatemala.
18. FLIR. (2011). Guía de termografía para mantenimiento predictivo. Estados Unidos. Obtenido de [www.flir.com](http://www.flir.com).
19. FLUKE Corporation. (2005). Detección de desequilibrios y sobrecargas eléctricas. Madrid, España.
20. FLUKE Corporation. (2005). Inspección de motores eléctricos. Madrid, España.
21. FLUKE. (10 de 2011). (T. I. B1A, Ed.) Obtenido de Fluke Corporation: <http://www.fluke.com/fluke/uses/products/calidad-energia-electrica>.
22. Facilities management. (2001). Manual del ingeniero de mantenimiento - gestión moderna del mantenimiento. Mexico.
23. IECOR. (2016, p.6). IECOR. Obtenido de IECOR: <https://www.iecor.com/calidad-de-energia-electrica/>



24. KOBAN. (2017). Análisis de potencia, armónicos y perturbaciones de red en sistemas trifásicos de distribución. En KOBAN, Calidad de la Energía Eléctrica. Grupo Temper.
25. Mirla Crespo, L. S. (2015). Guía para el manejo de instrumentos de medición utilizados en las auditorías energéticas. Venezuela.
26. Organización Intenacional de Normalización. (2011). Siatemas de Gestión de la energía, norma internacional ISO 50001. Suiza: Primera Edición.
27. Palencia, O. G. (21 de marzo de 2017). Gestión integral de mantenimiento basada en confiabilidad. Obtenido de RELIABILITY WEB: [reliabilityweb.com/sp/articles/entry/gestion-integral-de-mantenimiento-basada-en-confiabilidad](http://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/gestion-integral-de-mantenimiento-basada-en-confiabilidad).
28. Peña, J. B., & Mercado, V. (enero-marzo de 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. Recuperado el 12 de julio de 2017, de <http://www.redalyc.org/pdf/4277/427746276011.pdf>.
29. Ramírez Castaño, S., & Cano Plata, E. A. (junio de 2003). Calidad del servicio. Colombia. Recuperado el 12 de July de 2017, de <http://www.manizales.unal.edu.co/index.php/servicios/publicaciones-impresas/product/view/29/39>.
30. Schneider Electric. (2000). Correccion del factor de potencia. Barcelona.

31. Schneider Electric. (marzo de 2000). Cuaderno técnico No. 149 - La CEM: la compatibilidad electromagnética. España.
32. Schneider Electric. (2000). Manual didáctico compatibilidad electromagnética cem. Barcelona.
33. Schneider Electric. (octubre de 2004). Cuaderno técnico no. 199: la calidad de la energía eléctrica. Barcelona, España.
34. UNE-EN 50160:2011. (2011). Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.
35. Urbina, G. B. (2001). Evaluación de proyectos. En G. B. Urbina, evaluación de proyectos (pp. 212-229). México: Mcgraw-Hill.
36. Villagran, J. L., Martínez, D. A., & Carrera, Z. C. (junio de 2008). Factores que afectan la calidad de la energía y su solución. México.



# APÉNDICES

## Apéndice 1. Potencia de las cargas

Auditoría PQ		Potencia medida (kW)	Factor de potencia	Factor de utilización	Potencia calculada (kW)
Industria de alimentos	Interruptor principal	39.81	0.84		
Secado de pastas ( <i>Chao Mein</i> )		22.23	0.64		
	<b>Four Star</b>	0.75	0.64	0.50	0.37
	Motor 1/2 HP	0.37	0.64	0.50	0.19
	Motor 1/2 HP	0.37	0.64	0.50	0.19
	<b>Flow Pack</b>	0.75	0.64	0.50	0.37
	Motor 1/2 HP	0.37	0.64	0.50	0.19
	Motor 1/4 HP	0.19	0.64	0.50	0.09
	Motor 1/4 HP	0.19	0.64	0.50	0.09
	<b>TAYI YEH DE GOYA</b>	0.56	0.64	0.50	0.28
	Motor 1/4 HP	0.19	0.64	0.50	0.09
	Motor 1/4 HP	0.19	0.64	0.50	0.09
	Motor 1/4 HP	0.19	0.64	0.50	0.09
	<b>TUG Four Star</b>	0.19	0.64	0.50	0.09
	Motor 1/4 HP	0.19	0.64	0.50	0.09
	<b>TUG Flow Pack</b>	0.19	0.64	0.50	0.09
	Motor 1/4 HP	0.19	0.64	0.50	0.09
	<b>Transportadora de codificación</b>	0.37	0.64	0.50	0.19
	Motor 1/2 HP	0.37	0.64	0.50	0.19
	<b>Transportadora de GOYA</b>	0.37	0.64	0.50	0.19
	Motor 1/2 HP	0.37	0.64	0.50	0.19
	<b>TUG codificación</b>	0.37	0.64	0.50	0.19
	<b>Túnel de encogimiento GOYA</b>	2.06	0.64	0.50	1.03
	Motor 3/4 HP	0.37	0.64	0.50	0.19
	Motor 1 HP (Banda)	0.37	0.64	0.50	0.19
	Motor 1 HP (Ventilador)	0.37	0.64	0.50	0.19
	<b>Transportadora de moldeo</b>	0.41	0.64	0.50	0.21
	Motor 0.55 HP	0.41	0.64	0.50	0.21

Auditoria PQ		Potencia medida (kW)	Factor de potencia	Factor de utilización	Potencia calculada (kW)
	Ventiladores báscula	0.18	0.64	0.60	0.11
	Motores línea secado	38.05	0.64	0.60	22.83
	Motor 7.5 HP	5.60	0.64	0.50	2.80
	Motor 7.5 HP	5.60	0.64	0.50	2.80
	Motor 10 HP	7.46	0.64	0.50	3.73
	Motor 10 HP	7.46	0.64	0.50	3.73
	Motor 10 HP	7.46	0.64	0.50	3.73
	Motor 3 HP	2.24	0.64	0.50	1.12
	Motor 3 HP	2.24	0.64	0.50	1.12
	<b>TOTAL</b>	<b>44.24</b>	<b>0.64</b>	<b>0.51</b>	<b>25.94</b>
	Banco de capacitores	Capacitor 1	-	-	-
Capacitor 2		-	-	-	-
Capacitor 3		-	-	-	-
Capacitor 4		-	-	-	-
Capacitor 5		-	-	-	-
Capacitor 6		-	-	-	-
<b>TOTAL</b>		<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
Servicios	Caldera 30 HP	3.40	0.84	0.30	1.02
Producto terminado	Empaque	1.28	0.84	0.50	0.64
Línea tablero 2 sopas	Medición	-	0.84		
	<b>TAYI YEH DE SOPAS</b>	<b>0.56</b>	<b>0.84</b>	<b>0.30</b>	<b>0.17</b>
	Motor 1/4 HP	0.19	0.84	0.30	0.06
	Motor 1/4 HP	0.19	0.84	0.30	0.06
	Motor 1/4 HP	0.19	0.84	0.30	0.06
	<b>Túnel de encogimiento charola</b>	<b>0.37</b>	<b>0.84</b>	<b>0.30</b>	<b>0.11</b>
	Motor 1/4 HP	0.19	0.84	0.30	0.06
	Motor 1/4 HP	0.19	0.84	0.30	0.06
	<b>Túnel de encogimiento pajillas</b>	<b>1.87</b>	<b>0.84</b>	<b>0.30</b>	<b>0.56</b>
	Motor 3/4 HP	0.56	0.84	0.30	0.17
	Motor 3/4 HP	0.56	0.84	0.30	0.17
	Motor 3/4 HP	0.75	0.84	0.30	0.22
	<b>Bomba de aceite 5 HP</b>	<b>3.73</b>	<b>0.84</b>	<b>0.65</b>	<b>2.42</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>6.53</b>	<b>0.84</b>		<b>3.26</b>
Producción	Moldeo	5.32	0.84	0.40	2.13
Tablero No. 3 sopas	Medición	0.11	0.84		

Auditoria PQ		Potencia medida (kW)	Factor de potencia	Factor de utilización	Potencia calculada (kW)
	<b>Mezcladora</b>	<b>9.50</b>	<b>0.84</b>	<b>0.30</b>	<b>2.85</b>
	Motor 9.5 kW	9.50	0.84	0.30	2.85
	<b>Formadora de lienzo</b>	<b>6.20</b>	<b>0.84</b>	<b>0.30</b>	<b>1.86</b>
	Motor 4 kW	4.00	0.84	0.30	1.20
	Motor 3 HP	2.24	0.84	0.30	0.67
	<b>Motor 1 (llenado)</b>	<b>0.50</b>	<b>0.84</b>	<b>0.25</b>	<b>0.13</b>
	Motor 1/2 HP	0.37	0.84	0.25	0.09
	<b>Motor 2 (llenado)</b>	<b>0.50</b>	<b>0.84</b>	<b>0.25</b>	<b>0.13</b>
	Motor 1/2 HP	0.37	0.84	0.25	0.09
	<b>TOTAL</b>	<b>16.70</b>	<b>0.84</b>		<b>4.96</b>
<b>Servicios</b>	<b>Compresor</b>	<b>4.50</b>	<b>0.84</b>	<b>0.60</b>	<b>2.70</b>
Tablero No. 1 sopas	<b>TOTAL</b>		<b>0.84</b>		
	<b>Ventiladores (8)</b>	<b>2.96</b>	<b>0.84</b>	<b>0.30</b>	<b>0.89</b>
	Motor 1/2 HP	0.37	0.84	0.30	0.11
	Motor 1/2 HP	0.37	0.84	0.30	0.11
	Motor 1/2 HP	0.37	0.84	0.30	0.11
	Motor 1/2 HP	0.37	0.84	0.30	0.11
	Motor 1/2 HP	0.37	0.84	0.30	0.11
	Motor 1/2 HP	0.37	0.84	0.30	0.11
	Motor 1/2 HP	0.37	0.84	0.30	0.11
	Motor 1/2 HP	0.37	0.84	0.30	0.11
	<b>Forrado de vaso</b>	<b>0.75</b>	<b>0.84</b>	<b>0.30</b>	<b>0.22</b>
	Motor 1/2 HP	0.37	0.84	0.30	0.11
	Motor 1/4 HP	0.19	0.84	0.30	0.06
	Motor 1/4 HP	0.19	0.84	0.30	0.06
	<b>Producción</b>	<b>Laminado</b>	<b>8.20</b>	<b>0.84</b>	
Condimentos	Medición	<b>0.03</b>	<b>0.84</b>	<b>0.30</b>	<b>0.01</b>
	Multiplast 1	1.75	0.84	0.50	0.88
	Multiplast 2	1.75	0.84	0.30	0.53
	Empacadora (sal mágica)	1.17	0.84	0.50	0.58
	Empacadora (líquidos)	1.17	0.84	0.40	0.47
	Mezcladora de condimentos	2.92	0.84	0.30	0.88
	<b>TOTAL</b>	<b>8.76</b>	<b>0.84</b>		<b>3.33</b>
Servicios	<b>Taller de mantenimiento</b>	<b>5.00</b>	<b>0.84</b>	<b>0.15</b>	<b>0.75</b>
	<b>Llenado</b>	<b>0.37</b>	<b>0.84</b>	<b>0.50</b>	<b>0.19</b>
	<b>Extractor 1 5 HP</b>	<b>3.13</b>	<b>0.84</b>	<b>0.70</b>	<b>2.19</b>
	<b>Extractor 2 5 HP</b>	<b>3.13</b>	<b>0.84</b>	<b>0.70</b>	<b>2.19</b>

Auditoría PQ		Potencia medida (kW)	Factor de potencia	Factor de utilización	Potencia calculada (kW)
	Extractor 3 5 HP	3.13	0.84	0.70	2.19
	Extractor 4 5 HP	3.13	0.84	0.70	2.19
	Lámparas de techo	1.80	0.84	0.20	0.36
	Iluminación exterior	0.60	0.84	0.40	0.24
	Caldera 100 HP	5.25	0.84	0.65	3.41
	Oficinas	4.50	0.84	0.50	2.25
	Bomba de agua 2 HP	1.49	0.84	0.70	1.04
	Lavadoras	3.43	0.84	0.50	1.71
	Secadoras	4.15	0.84	0.50	2.08
Producción		94.73			45.18
Servicios		47.01			24.52
TOTAL		141.74			69.70

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Indicadores año base

	Año Base		
	Ninguna	Cambio operación	Cambio de transformador
PQ	M1	M2	M3
$\Delta V_a$ (%)	1.78%		1.52%
$\Delta V_b$ (%)	1.81%		1.40%
$\Delta V_c$ (%)	1.16%		13.13%
$\Delta V$ (%)	1.61%		2.01%
Tolerancia $\Delta V$ (%) NEC	5.00%		5.00%
Tolerancia $\Delta V$ (%) NTSD	8.00%		8.00%
$\Delta DTD$ (%)	0.72%		17.68%
Tolerancia $\Delta DTD$ (%) NEMA	1.00%		1.00%
Tolerancia $\Delta DTD$ (%) NTSD	3.00%		3.00%
$\Delta DIP$ (%)	2.45%		8.21%
Tolerancia $\Delta DIP$ (%)	10.00%		10.00%
A-BVThdAvg[%]	1.43		2.65
B-CVThdAvg[%]	1.57		2.71

	Año Base		
	Ninguna	Cambio operación	Cambio de transformador
PQ	M1	M2	M3
C-AVThdAvg[%]	1.43	1.84	3.85
<b>ThdAvg[%]</b>	<b>1.46</b>	<b>1.71</b>	<b>3.07</b>
<b>Tolerancia THDv</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>
A-BVHarm(180.0Hz)Value[%]	0.22%	0.28%	0.35%
B-CVHarm(180.0Hz)Value[%]	0.32%	0.29%	0.43%
C-AVHarm(180.0Hz)Value[%]	0.30%	0.20%	3.11%
<b>VHarm(180.0Hz)Value[%]</b>	<b>0.28%</b>	<b>0.25%</b>	<b>0.51%</b>
<b>Tolerancia (180 Hz) [%]</b>	<b>5.00%</b>	<b>5.00%</b>	<b>5.00%</b>
A-BVHarm(300.0Hz)Value[%]	1.07%	1.15%	1.87%
B-CVHarm(300.0Hz)Value[%]	1.02%	1.32%	1.90%
C-AVHarm(300.0Hz)Value[%]	0.92%	1.59%	2.42%
<b>VHarm(300.0Hz)Value[%]</b>	<b>1.01%</b>	<b>1.31%</b>	<b>2.11%</b>
<b>Tolerancia (300 Hz) [%]</b>	<b>6.00%</b>	<b>6.00%</b>	<b>6.00%</b>
A-BVHarm(420.0Hz)Value[%]	1.00%	1.17%	1.99%
B-CVHarm(420.0Hz)Value[%]	1.21%	1.25%	1.81%
C-AVHarm(420.0Hz)Value[%]	1.11%	1.08%	1.68%
<b>VHarm(420.0Hz)Value[%]</b>	<b>1.09%</b>	<b>1.17%</b>	<b>1.85%</b>
<b>Tolerancia (420 Hz) [%]</b>	<b>5.00%</b>	<b>5.00%</b>	<b>5.00%</b>
A-BVHarm(540.0Hz)Value[%]	0.15%	0.15%	0.32%
B-CVHarm(540.0Hz)Value[%]	0.10%	0.11%	0.49%
C-AVHarm(540.0Hz)Value[%]	0.12%	0.14%	0.46%
<b>VHarm(540.0Hz)Value[%]</b>	<b>0.13%</b>	<b>0.13%</b>	<b>0.42%</b>
<b>Tolerancia (540 Hz) [%]</b>	<b>1.50%</b>	<b>1.50%</b>	<b>1.50%</b>
A-BVHarm(660.0Hz)Value[%]	0.34%	0.35%	0.85%
B-CVHarm(660.0Hz)Value[%]	0.33%	0.38%	0.80%
C-AVHarm(660.0Hz)Value[%]	0.35%	0.38%	0.73%
<b>VHarm(660.0Hz)Value[%]</b>	<b>0.34%</b>	<b>0.37%</b>	<b>0.77%</b>
<b>Tolerancia (660 Hz) [%]</b>	<b>3.50%</b>	<b>3.50%</b>	<b>3.50%</b>
AIThdAvg[%]	5.80	11.43	13.30
BIThdAvg[%]	5.05	11.23	12.84
CIThdAvg[%]	6.02	8.40	10.70
<b>IThdAvg[%]</b>	<b>5.61</b>	<b>10.10</b>	<b>12.68</b>
<b>Tolerancia THDi IEEE</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>
<b>Tolerancia THDi NTSD</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>



	Año Base		
	Ninguna	Cambio operación	Cambio de transformador
	M1	M2	M3
<b>PQ</b>			
AlHarm(180.0Hz)Value[%]	3.24%		6.00%
BIHarm(180.0Hz)Value[%]	2.19%		8.68%
CIHarm(180.0Hz)Value[%]	2.48%		3.25%
<b>IHarm(180.0Hz)Value[%]</b>	<b>2.57%</b>		<b>5.20%</b>
<b>Tolerancia (180 Hz) [%] IEEE</b>	<b>12.00%</b>		<b>12.00%</b>
<b>Tolerancia (180 Hz) [%] NTSD</b>	<b>16.60%</b>		<b>16.60%</b>
AlHarm(300.0Hz)Value[%]	4.81%		7.83%
BIHarm(300.0Hz)Value[%]	4.74%		7.35%
CIHarm(300.0Hz)Value[%]	5.75%		4.18%
<b>IHarm(300.0Hz)Value[%]</b>	<b>5.14%</b>		<b>5.73%</b>
<b>Tolerancia (300 Hz) [%] NTSD</b>	<b>12.00%</b>		<b>12.00%</b>
AlHarm(420.0Hz)Value[%]	4.20%		6.58%
BIHarm(420.0Hz)Value[%]	3.74%		5.49%
CIHarm(420.0Hz)Value[%]	4.53%		5.16%
<b>IHarm(420.0Hz)Value[%]</b>	<b>4.18%</b>		<b>5.59%</b>
<b>Tolerancia (420 Hz) [%]</b>	<b>8.50%</b>		<b>8.50%</b>
AlHarm(540.0Hz)Value[%]	1.02%		1.88%
BIHarm(540.0Hz)Value[%]	0.73%		2.94%
CIHarm(540.0Hz)Value[%]	0.60%		1.42%
<b>IHarm(540.0Hz)Value[%]</b>	<b>0.75%</b>		<b>1.81%</b>
<b>Tolerancia (540 Hz) [%]</b>	<b>2.20%</b>		<b>2.20%</b>
AlHarm(660.0Hz)Value[%]	1.47%		3.93%
BIHarm(660.0Hz)Value[%]	1.20%		2.85%
CIHarm(660.0Hz)Value[%]	1.61%		3.27%
<b>IHarm(660.0Hz)Value[%]</b>	<b>1.36%</b>		<b>3.27%</b>
<b>Tolerancia (660 Hz) [%]</b>	<b>4.30%</b>		<b>4.30%</b>
AVPstValue[]	0.22		0.32
BVPstValue[]	0.24		0.40
CVPstValue[]	0.24		0.33
<b>VPstValue[]</b>	<b>0.23</b>		<b>0.35</b>
<b>Tolerancia Pst</b>	<b>1</b>		<b>1</b>
<b>Temperatura</b>			
Transformador	43.90		44.70
<b>Interrupctor</b>	<b>64.50</b>		<b>40.80</b>

	Año Base		
	Ninguna	Cambio operación	Cambio de transformador
PQ	M1	M2	M3
Capacitores	53.72	57.39	54.70
Variador de frecuencia	82.05	54.44	51.90
Motor 5.5 kW	55.59	59.39	56.60
Motor 7.5 kW	58.18	38.60	36.80
Motor 2.2 kW	61.19	65.37	62.30
Tolerancia placa	40	40	40
Tolerancia normal	30	30	30
Pérdidas THD (kWh)	9.69	6.85	17.14
Periodo medido (horas)	68.00	26.00	60.00
Promedio día kWh	3.29	6.41	5.33
Estimación mes kWh	98.74	192.22	159.90
Cuatrimstral kWh	394.95	768.86	639.60
Costo mensual	Q 72.84	Q 125.72	Q 119.79
Costo cuatrimstral	Q 291.37	Q 502.88	Q 479.16
Ahorros en energía FP	0.79	0.79	0.75
Penalización FP	Q 11,588.73	Q 13,379.42	Q 14,091.52
Ahorro pérdidas THD	Q -	Q -	Q -
Ahorros potenciales	Q -	Q -	-Q 10,889.94
Inversiones BAU	Q 1,750.00	Q 217,500.00	Q 1,750.00
Inversiones MODELO	Q 1,750.00	Q 217,500.00	Q 1,750.00
Producto o servicio	Estudio	transformador, cable e interruptor	estudio
Flujo	Q 13,338.73	Q 230,879.42	Q 4,951.58

Fuente: elaboración propia.



# ANEXOS

## Anexo 1. Hoja de auditoría a transformadores

AUDITORÍA PQ TRANSFORMADOR															
Instalación:				Ubicación:				Fecha:							
Identificación del transformador:				Observación:											
Tipo	Aislamiento:			Aislamiento debilitado:			Se co:	Aceite:	Pad Mounted:						
Número de unidades:			kVA en cada unidad:	Fases:			Impedancia:								
Cambiador de TAP			Automático:	Manual:			Ninguno:								
Sistema de enfriamiento (O/A/FA/etc.)			Factor de potencia en placa:			Factor K de placa:									
Factor de potencia medido:			Factor de potencia de desplazamiento:			Factor K medido:									
Voltajes en el devanado primario (media tensión)						Voltajes en el devanado secundario (baja tensión)									
Voltaje de placa:						V								V	
Corriente de placa:						A								A	
Tipo de conexión:						(D/Y /GY)								(D/Y /GY)	
Voltajes en el devanado primario (media tensión)						Voltajes en el devanado secundario (baja tensión)									
Voltaje medido:		VA-N	VB-N	VC-N	VN-T	VA-B	VB-C	VA-C							
Voltajes en el devanado primario (media tensión)						Voltajes en el devanado secundario (baja tensión)									
Voltaje armónico:														THD	
														3	
															5

AUDITORÍA PQ TRANSFORMADOR													
													7
													9
													11
Corriente medida:	<b>Corriente en el devanado primario (media tensión)</b>						<b>Corriente en el devanado secundario (baja tensión)</b>						
	VA-N	VB-N	VC-N	VN-T	VA-B	VB-C	VA-C						
Corriente armónica:	<b>Corriente en el devanado primario (media tensión)</b>						<b>Corriente en el devanado secundario (baja tensión)</b>						
													THD
													3
													5
													7
													9
													11
Conductores de entrada	<b>Devanado primario (media tensión)</b>						<b>Devanado secundario (baja tensión)</b>						
	Fases	MCM	Número de conductores por fase:			Fases	MC	Número de conductores por fase:					
	Neutro	MCM	Número de conductores de neutro:			Neutro	MC	Número de conductores de neutro:					
	Tierra	MCM	Número de conductores de tierra:			Tierra	MC	Número de conductores de tierra:					
Temperatura	Rango de temperatura en el devanado:				°C	Rango de temperatura de barra:				°C			
	Temperatura del envolvente:				°C								
Condición física	En buena condición:		Dañado:		Corrosión:			Fuga de aceite:					
	Estado del aislante:		Espacio adecuado:		Necesita mantenimiento:								
	Se observa calentamiento o quemones (cambio en el color):												
Sistema de tierras	¿La barra de tierra está aislada del tablero?				Si	No	¿O está conectada al tablero?		Si	No			
	¿Aterrizado con metales o carcasa?				Si	No	¿O aterrizado con cables?		Si	No			
	¿La barra de tierra está unida a la barra de tierra?				Si	No							
	¿Cada circuito cuenta con neutro separados?				Si	No	¿Y conductor de tierra?		Si	No			
	Medición de corriente de tierra				A	Resistencia		Ω					
	Realice un bosquejo del sistema de tierras, si es necesario												

AUDITORIA PQ TRANSFORMADOR

Deficiencias encontradas	Auditoría 1:
	Auditoría 2:
	Auditoría 3:
Problemas o fallas registradas	Auditoría 1:
	Auditoría 2:
	Auditoría 3:

AUDITORÍA PQ TRANSFORMADOR	
Interés del departamento de mantenimiento	Auditoría 1:
	Auditoría 2:
	Auditoría 3:
Notas:	Auditoría 1:
	Auditoría 2:
	Auditoría 3:

Fuente: DRANETZ, 2013, p. 210.

## Anexo 2. Hoja de auditoría a tableros de distribución

AUDITORÍA PQ TABLERO DE DISTRIBUCIÓN O TABLERO PRINCIPAL (1 INTERRUPTOR)													
Instalación:	Industria de alimentos	Ubicación:	Guatemala	Fecha:	3/04/2017								
<b>Identificación del panel:</b>		TD-1		Observación: interruptor principal de 500 A y frecuencia 50 Hz									
Fabricante:			CNC			Tipo de panel:		Caja metálica con tornillo de tierra aterrizado a la carcasa					
Voltaje:		400 V		Corriente:		500 A		Fases:		3		Cables por fase:	1
<b>Interruptor principal</b>			Tipo/modelo:		YCM1-630L/3300		Capacidad:		500 A		Rango de ajuste:	N/A	
Voltajes medidos:		VA-B:	239.96	V	VB-C:	241.07	V	VC-A:	234.35	V	VN-T:	V	
		VA-T:	Delta pierna alta	V	VB-T:	Delta pierna alta	V	VC-T:	Delta pierna alta	V	Delta pierna alta	V	
Onda de sinodal de voltaje		VA-N			VB-N			VC-N			VN-T		
Distorsión armónica de voltaje		VTHD A-N:	1.42	%	VTHD B-N:	1.57	%	VTHD C-N:	1.43	%	VTHD N-T:	%	
		V3THD A-N:	0.22	%	V3THD B-N:	0.31	%	V3THD C-N:	0.3	%	V3THD N-T:	%	



**AUDITORÍA PQ TABLERO DE DISTRIBUCIÓN O TABLERO PRINCIPAL (1 INTERRUPTOR)**

V5THD A-N:	1.06	%	V5THD B-N:	1.02	%	V5THD C-N:	0.92	%	V5THD N-T:		%
V7THD A-N:	1	%	V7THD B-N:	1.21	%	V7THD C-N:	1.11	%	V7THD N-T:		%
V9THD A-N:	0.15	%	V9THD B-N:	0.09	%	V9THD C-N:	0.12	%	V9THD N-T:		%
V11THD A-N:	0.33	%	V11TH D B-N:	0.32	%	V11TH D C-N:	0.34	%	V11TH D N-T:		%

Corrientes medidas:	IA:	305.68	I	IB:	298.12	I	IC:	315.14	I	IN:	35.5	I
---------------------	-----	--------	---	-----	--------	---	-----	--------	---	-----	------	---

Onda de sinodal de voltaje	IA			IB			IC			IN		

Distorsión armónica de voltaje	ITHD A:	5.79	%	ITHD B:	5.04	%	ITHD C:	6.02	%	ITHD N:		%
	I3THD A:	3.24	%	I3THD B:	2.19	%	I3THD C:	2.48	%	I3THD N:		%
	I5THD A:	4.81	%	I5THD B:	4.73	%	I5THD C:	5.74	%	I5THD N:		%
	I7THD A:	4.19	%	I7THD B:	3.73	%	I7THD C:	4.53	%	I7THD N:		%
	I9THD A:	1.02	%	I9THD B:	0.72	%	I9THD C:	0.59	%	I9THD N:		%
	I11THD A:	1.46	%	I11TH D B:	1.2	%	I11TH D C:	1.61	%	I11TH D N:		%

Factor de potencia	FP:	0.78	Factor de potencia de desplazamiento:	0.16
--------------------	-----	------	---------------------------------------	------

Sistema de tierras	¿La barra de tierra está aislada del tablero?		Si	X	No	¿O está conectada al tablero?		X	Si		No
	¿Aterrizado con metales o carcaza?	X	Si		No	¿O aterrizado con cables?			Si	X	No

**AUDITORÍA PQ TABLERO DE DISTRIBUCIÓN O TABLERO PRINCIPAL (1 INTERRUPTOR)**

¿La barra de tierra está unida a la barra de neutro?		Si	X	No																
¿Cada circuito cuenta con neutro separados?		Si	X	No	¿Y conductor de tierra?								Si	X	No					
Medición de corriente de tierra		35.5		A	Resistencia															Ω

Realice un bosquejo del sistema de tierras, si es necesario

Temperatura	Rango de temperatura en las barras:	56	°C	Rango de temperatura de conductores	63	°C			
	¿Alguno de los interruptores de los circuitos de derivación es mayor a 39°C?	Si							
Conductores de entrada	Fases	350	MCM	Número de conductores por fase:	1	X	2		> 3
	Neutro	2/0	MCM	Número de conductores de neutro:	1	X	2		> 3
	Tierra	N/A	MCM	Número de conductores de tierra:	1	X	2		> 3

Pararrayos	Fabricante:	N/A	Tipo:	N/A	Nivel de voltaje:	N/A
------------	-------------	-----	-------	-----	-------------------	-----

**Deficiencias encontradas**

Auditoría 1: La termografía demuestra que los conductores están sobrecalentados, deterioro del aislamiento y corrientes que superan la capacidad nominal del conductor. Las mediciones de calidad de energía demuestran que la distorsión armónica total de corriente es alta, ambas líneas de producción operan con variadores de frecuencia.

Auditoría 2: La termografía demuestra que los conductores están sobrecalentados, deterioro del aislamiento y corrientes que superan la capacidad nominal del conductor. Las mediciones de calidad de energía demuestran que la distorsión armónica total de corriente es alta, ambas líneas de producción operan con variadores de frecuencia.

<b>AUDITORÍA PQ TABLERO DE DISTRIBUCIÓN O TABLERO PRINCIPAL (1 INTERRUPTOR)</b>	
	Auditoría 3: La termografía demuestra que los conductores están sobrecalentados, deterioro del aislamiento y corrientes que superan la capacidad nominal del conductor. Las mediciones de calidad de energía demuestran que la distorsión armónica total de corriente es alta, ambas líneas de producción operan con variadores de frecuencia. Existe una condición de neutro flotante.
Problemas o fallas registradas	Auditoría 1: 5 motores dañados hace 5 años, 3 tarjetas electrónicas de codificadoras quemadas y el variador de frecuencia de la línea dos se quemó.
	Auditoría 2: 2 motores de la enfriadora de la línea dos dañados, daño en capacitores de formadoras automáticas de termo encogido y parpadeo de luminarias.
	Auditoría 3: quema del controlador del banco de capacitores y capacitores, quema del motor de 2 extractores por punto caliente y daño en el aislamiento del cable y corrupción de datos y daño a equipos sensibles.
Interés del departamento de mantenimiento	Auditoría 1: no tienen conocimiento de los problemas y las causas de falla.
	Auditoría 2: se contrató un estudio de calidad de energía y termografía.
	Auditoría 3: cambio del transformador, interruptor principal, alimentador principal y banco de capacitores.
Notas:	Auditoría 1: existe calentamiento y problemas de calidad de energía, actualmente operan una línea de día y otra de noche.
	Auditoría 2: Cambio de operación

AUDITORÍA PQ TABLERO DE DISTRIBUCIÓN O TABLERO PRINCIPAL (1 INTERRUPTOR)	
Auditoría 3:	

Fuente: DRANETZ, 2013, p. 200.