



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

**ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA INDUSTRIA TEXTIL DE LA  
CIUDAD DE GUATEMALA, BASADO EN LAS NORMAS TÉCNICAS DEL SERVICIO DE  
DISTRIBUCIÓN DE LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**Miguel Antonio del Cid Torres**

Asesorado por el Ing. Rony Otoniel Castillo García

Guatemala, julio de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA INDUSTRIA TEXTIL DE LA  
CIUDAD DE GUATEMALA, BASADO EN LAS NORMAS TÉCNICAS DEL SERVICIO DE  
DISTRIBUCIÓN DE LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MIGUEL ANTONIO DEL CID TORRES**

ASESORADO POR EL ING. RONY OTONIEL CASTILLO GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, JULIO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	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. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA INDUSTRIA TEXTIL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, BASADO EN LA NORMAS TÉCNICAS DEL SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN DE LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 18 de noviembre de 2015.



**Miguel Antonio del Cid Torres**

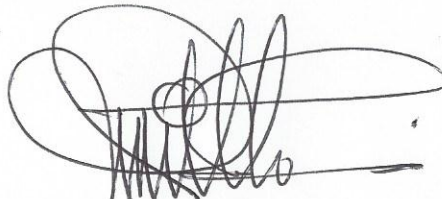
Guatemala, 25 de septiembre de 2017

Ingeniero  
Saúl Cabezas Durán  
Coordinador del Área de Potencia  
Escuela de Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Por medio de la presente me dirijo respetuosamente a usted para informarle que luego de haber revisado el trabajo de graduación: "ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA INDUSTRIA TEXTIL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, BASADO EN LA NORMAS TÉCNICAS DEL SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN DE LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA", elaborado por el estudiante Miguel Antonio del Cid Torres, y realizar las revisiones y correcciones respectivas, considero satisfactorio dicho trabajo.

Por lo tanto, hago de su conocimiento que recomiendo su aprobación para que proceda con el trámite correspondiente

Atentamente,



Rony Otoniel Castillo García  
Ingeniero Electricista  
Colegiado Activo No. 3,293

CC: file

RONY OTONIEL CASTILLO GARCIA  
INGENIERO ELECTRICISTA  
Colegiado No. 3293



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 28.2018.  
24 DE ABRIL 2018.

Señor Director  
Ing. Otto Fernando Andrino González  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
**ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA  
INDUSTRIA TEXTIL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA,  
BASADO EN LAS NORMAS TÉCNICAS DEL SERVICIO DE  
DISTRIBUCIÓN DE LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA** del estudiante; Miguel Antonio del Cid Torres, que  
cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

*[Firma manuscrita]*  
M.B.A. Ing. Saul Cabezas Durán  
Ingeniero Electricista  
Colegiado No. 4648

Ing. Saul Cabezas Durán  
Coordinador de Potencia







REF. EIME 32.2018.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen el Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: MIGUEL ANTONIO DEL CID TORRES titulado: ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA INDUSTRIA TEXTIL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, BASADO EN LAS NORMAS TÉCNICAS DEL SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN DE LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Otto Fernando Andrino González

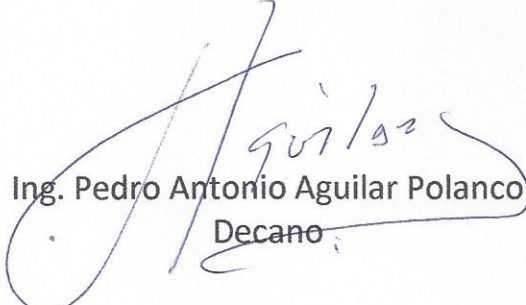


GUATEMALA, 7 DE MAYO 2018.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA INDUSTRIA TEXTIL DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, BASADO EN LAS NORMAS TÉCNICAS DEL SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN DE LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario: **Miguel Antonio del Cid Torres**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, julio de 2018

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Mis padres**

Por su apoyo incondicional en todo momento.

**Mis hermanos**

Por compartir sus experiencias influyentes en mi vida para cumplir esta meta.

**Mis amigos**

A todo aquel que aportó algún consejo o enseñanza que me ayudó a cumplir esta meta.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por brindarme la oportunidad de desarrollarme como profesional.
<b>Biblioteca Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por permitirme el acceso a bibliografía que me permitió mi desarrollo no solo profesional sino también personal.
<b>Rony Castillo</b>	Por su apoyo y enseñanzas durante todo este proceso.
<b>Sports Addiction</b>	Por haberme abierto las puertas a sus instalaciones de forma tan atenta.



1.2.2.5.	Equipos utilizados en el proceso de serigrafía .....	7
1.2.2.6.	Equipos utilizados en el proceso de láser y bordado.....	8
1.2.2.7.	Inventario de cargas de la industria textil por estudiar .....	8
1.3.	Tipos de mercado eléctrico existentes en Guatemala..... 12	
1.3.1.	Tipos de contratos reconocidos por el AMM .....	12
1.3.2.	Administrador del mercado mayorista (AMM) .....	18
1.3.3.	Cobro de factura para los usuarios .....	19
1.4.	Consumo energético en la empresa textil por estudiar .....	
2.	CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA .....	
2.1.	Incidencia del usuario en la calidad del producto .....	
2.1.1.	Distorsión armónica.....	
2.1.1.1.	Mecanismo de generación de armónicas.....	23
2.1.1.2.	Elementos causantes de armónicos.....	
2.1.1.2.1.	Dispositivos electrónicos.....	29
2.1.1.2.2.	Lámparas fluorescentes.....	31
2.1.1.2.3.	Equipos saturados magnéticamente.....	31
2.1.1.2.4.	Hornos y equipo de soldadura por arco eléctrico.....	33
2.1.1.3.	Métodos para mitigación de armónicos.....	
		33



	2.1.1.3.1.	Sobredimensionado de equipos.....	33	
	2.1.1.3.2.	Transformadores .....	33	
	2.1.1.3.3.	Capacitores .....	34	
	2.1.1.3.4.	Conductores .....	34	
	2.1.1.3.5.	Motores .....	36	
	2.1.1.3.6.	Reducción de armónicos en las cargas.....	36	
	2.1.1.3.7.	Filtros.....	37	
2.1.2.	<i>Flicker</i> .....		40	
	2.1.2.1.	Elementos causantes del <i>flicker</i> .....	41	
		2.1.2.1.1.	Hornos de arco..... 41	
		2.1.2.1.2.	Soldadores eléctricos ... 42	
		2.1.2.1.3.	Motores .....	43
		2.1.2.1.4.	Convertidores .....	43
		2.1.2.1.5.	Bancos de capacitores .....	43
	2.1.2.2.	Otros elementos causantes del <i>flicker</i> .....	44	
	2.1.2.3.	Efectos del <i>flicker</i> en el equipo eléctrico .....	44	
	2.1.2.4.	El <i>flicker</i> como sensación de molestia para el ser humano.....	45	
	2.1.2.5.	Estudio del <i>flicker</i> como perturbación ..	46	
	2.1.2.6.	Métodos para corrección del <i>flicker</i> .....	47	
	2.1.2.7.	Equipo para disminuir las fluctuaciones de voltaje y <i>flicker</i> .....	47	

	2.1.2.7.1.	Compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC).....	48
	2.1.2.7.2.	Convertidores de fuente de tensión VSC ..	48
	2.1.2.8.	Otras formas de mitigar el <i>flicker</i> .....	49
2.1.3.		Factor de potencia.....	50
	2.1.3.1.	Compensación de potencia reactiva ....	53
	2.1.3.2.	Compensación centralizada o descentralizada .....	56
2.1.4.		Analizador de calidad de energía eléctrica .....	59
	2.1.4.1.	Características principales .....	60
3.		NORMAS TÉCNICAS DEL SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN.....	63
3.1.		Objetivo, alcance de las normas .....	63
3.2.		Sistemas de control de los usuarios.....	64
	3.2.1.	Sistema de control e identificación .....	64
	3.2.2.	Control de solicitudes y reclamos del usuario .....	64
3.3.		Obligaciones de los usuarios .....	65
3.4.		Incidencia del usuario en la calidad del producto .....	65
	3.4.1.	Distorsión armónica de la corriente generada por el usuario.....	66
	3.4.1.1.	Tolerancias para la distorsión armónica de la corriente de carga .....	67
	3.4.1.2.	Control para la distorsión armónica de la corriente de carga.....	68
	3.4.1.3.	Indemnización por sobrepasar la distorsión armónica en la corriente de carga .....	69

3.4.2.	<i>Flicker</i> generado por el usuario .....	70
3.4.2.1.	Indicador de <i>flicker</i> de corto plazo (Pst) .....	70
3.4.2.2.	Indicador de <i>flicker</i> de largo plazo (Plt) .....	70
3.4.2.3.	Indemnización por <i>flicker</i> generado por el usuario .....	72
3.4.3.	Factor de potencia .....	73
3.4.3.1.	Control para el factor de potencia .....	73
3.4.3.2.	Indemnización por bajo factor de potencia .....	74
4.	ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA BASADO EN LAS NTSD .....	75
4.1.	Planificación .....	75
4.1.1.	Objetivos del estudio .....	75
4.1.2.	Alcance de las actividades .....	75
4.2.	Preparación del estudio .....	78
4.2.1.	Recolección de datos y documentación .....	78
4.2.2.	Historial del establecimiento .....	79
4.2.3.	Registros de eventos del equipo .....	83
4.2.4.	Preparación de las herramientas .....	83
4.2.5.	Inspección visual del establecimiento .....	83
4.2.6.	Inspección física del establecimiento .....	84
4.3.	Monitoreo .....	85
4.3.1.	Colocación del equipo .....	85
4.3.2.	Conexiones para el monitoreo de potencia .....	86
4.4.	Análisis de datos con el software Dran-View Pro versión 5.7 ...	89
4.4.1.	Análisis del factor de potencia en la red .....	90
4.4.2.	Análisis de armónicos en la red .....	95

4.4.3.	Análisis del <i>flicker</i> en la red .....	98
4.5.	Sumario de perturbaciones por nivel de importancia .....	100
5.	CONSIDERACIONES ADICIONALES .....	103
5.1.	Huecos de tensión.....	104
5.1.1.	Profundidad de los huecos de tensión .....	105
5.2.	Interrupción del suministro .....	106
5.3.	Sobretensión .....	107
5.4.	Subtensión .....	108
5.5.	Impulso, sobretensión transitoria .....	109
5.6.	Deformación transitoria de la onda de tensión .....	110
5.7.	Perturbaciones transitorias en la corriente .....	111
5.7.1.	Reconexión de intensidad .....	111
5.7.2.	Sobreintensidad .....	111
5.7.3.	Sobrecorriente transitoria .....	112
5.8.	Interarmónicos .....	112
5.9.	Muestras.....	113
5.10.	Fluctuaciones de tensión.....	113
5.11.	Desequilibrio de tensión .....	114
5.12.	Variación de frecuencia.....	115
5.13.	Equipos de control de perturbaciones en la calidad de energía eléctrica.....	115
5.13.1.	Interruptor de transferencia estática ( <i>Static Transfrer Switch</i> ).....	117
5.13.2.	DSTATCOM .....	118
5.13.3.	<i>Dynamic Voltage Restorer</i> (DVR).....	120
5.13.4.	Compensador unificado de calidad de potencia (UPQC).....	122



5.13.5.	Sistemas de alimentación ininterrumpida estáticos (SAI) .....	123
5.13.6.	Sistemas de alimentación ininterrumpida dinámicos.....	127
5.13.7.	Estabilizadores ferroresonantes .....	127
5.13.8.	Compensador unificado en serie-derivación.....	129
5.13.9.	Protocolo IRIG-B.....	131
CONCLUSIONES .....		133
RECOMENDACIONES .....		135
BIBLIOGRAFÍA .....		137
APÉNDICE.....		141
ANEXOS .....		143



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Diferentes procesos de producción de la industria textil .....	5
2.	Vista del área de confección y oficinas de la empresa.....	11
3.	Descomposición de una onda distorsionada en armónicos .....	25
4.	Simulación de forma de onda al acercarse a los límites establecidos por las NTSD.....	26
5.	Principales tipos de cargas y formas de las corrientes absorbidas .....	27
6.	Distorsión de la corriente debida a cargas no lineales .....	28
7.	Puente rectificador de 6 pulsos .....	30
8.	Curva característica de saturación.....	32
9.	Circulación de corrientes del tercer armónico en transformador con conexión estrella - delta .....	35
10.	Configuraciones de filtros pasivos.....	38
11.	Filtro armónico resonante simple .....	38
12.	Característica de frecuencia del filtro amortiguado .....	39
13.	Aplicación de un filtro activo en una carga no lineal.....	40
14.	Tensión de alimentación representativa de un horno de arco indicando fluctuación de la tensión a la frecuencia de flicker .....	42
15.	Límite de sensibilidad del ojo a las variaciones de iluminación causadas por fluctuaciones de tensión, en lámparas incandescentes .....	46
16.	Triángulo de potencia y la relación entre potencia activa, reactiva y potencia aparente .....	52
17.	Límites teóricos de la corriente .....	53

18.	Triángulo general de corrección de factor de potencia .....	55
19.	Diagrama unifilar simplificado de la instalación eléctrica .....	80
20.	Diagrama de conexión de paneles solares de la instalación eléctrica .....	81
21.	Diagrama esquemático de la conexión del devanado secundario en el banco de transformación principal .....	87
22.	Comportamiento de la corriente durante los siete días de la medición .....	90
23.	Comportamiento de la potencia reactiva dependiendo del tipo de carga .....	93
24.	Factor de potencia total frente a tiempo.....	94
25.	Distorsión armónica total, separado por fases.....	96
26.	Pst del flicker frente a tiempo.....	99
27.	Forma de onda de un hueco de tensión en la red.....	105
28.	Forma de onda de una interrupción de suministro.....	107
29.	Forma de onda de una sobretensión .....	108
30.	Forma de onda de una subtensión .....	108
31.	Ejemplo de una sobretensión transitoria tipo impulso en la red.....	109
32.	Ejemplo de una sobretensión transitoria tipo oscilatoria en la red.....	110
33.	Presencia de interarmónicos en la red.....	112
34.	Presencia de muescas en la red.....	113
35.	Fluctuación de tensión en la red .....	114
36.	Desequilibrio de tensión en la red.....	114
37.	Variación de frecuencia en la red .....	115
38.	Diagrama esquemático de un STS .....	118
39.	Diagrama esquemático de un DSTATCOM.....	120
40.	Diagrama esquemático de un DVR.....	121
41.	Diagrama esquemático de un UPQC.....	123
42.	Diagrama esquemático de varios SAI dispuestos en paralelo .....	124



43.	Disposición interactiva con línea de un SAI .....	125
44.	Disposición en doble conversión de un SAI .....	126
45.	Diagrama de un SAI dinámico.....	127
46.	Transformador ferroresonante .....	129
47.	Diagrama de conexión de un USSC.....	131

## TABLAS

I.	Volumen de exportación de los 12 principales productos de exportación.....	2
II.	Potencia instalada aproximada en la industria textil por estudiar .....	8
III.	Diferentes esquemas de participación de grandes usuarios en el mercado mayorista.....	15
IV.	Factores de potencia típicos de industria y comercio.....	20
V.	Datos obtenidos de los paneles solares, cerca de las 11 am, un día con cielo sin mucha nubosidad .....	21
VI.	Especificaciones técnicas del equipo Dranetz 4400, PowerXplorer .....	60
VII.	Tolerancias para la distorsión armónica de la corriente de carga, según la CNEE.....	67
VIII.	Tolerancias para el <i>flicker</i> generado por el usuario.....	71
IX.	Valor mínimo para el factor de potencia.....	73
X.	Horarios de trabajo en la planta .....	82
XI.	Resumen de datos factor de potencia obtenidos .....	91
XII.	Fragmento de hoja de cálculo con los datos de factor de potencia en atraso y adelanto, basado en los kVAR .....	91
XIII.	Fórmulas utilizadas para discriminar corriente en atraso de los datos medidos.....	92
XIV.	Resumen de datos de potencia obtenidos .....	95

XV.	Resultados de porcentaje de excedente de armónicos en la instalación.....	97
XVI.	Equipos de control de perturbaciones de calidad de energía eléctrica y aplicaciones .....	116
XVII.	Comparación de equipos control de calidad de energía eléctrica.....	130

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$\varnothing$	Ángulo de factor de potencia
$\Sigma$	Sumatoria
$\Delta$	Conexión delta
Y	Conexión estrella
%	Porciento
V	Voltios
I	Corriente
R	Resistencia eléctrica
H	Hercio
C	Capacitancia
L	Inductancia
P	Potencia activa
S	Potencia aparente
Q	Potencia reactiva
N	Neutro
T	Tiristor
VA	Voltamperio
VA <sub>r</sub>	Voltamperio reactivo
W	Vatio
FP	Factor de potencia





## GLOSARIO

<b>AGEXPORT</b>	Asociación Guatemalteca de Exportadores, es una entidad privada no lucrativa, fundada con el propósito de promover y desarrollar las exportaciones de Guatemala.
<b>Armónico</b>	Múltiplo de la señal sinusoidal de entrada.
<b>CNEE</b>	Comisión Nacional de Energía Eléctrica, es un ente que dirige y regula el desarrollo de la generación, transporte, distribución y actividades de comercialización de la energía eléctrica en Guatemala.
<b>EN50160</b>	Norma europea que establece las características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.
<b>Factor de potencia</b>	Relación entre la potencia activa y la potencia aparente. Es una medida de la eficiencia del consumo de energía eléctrica en una instalación.
<b><i>Flicker</i></b>	Es una variación rápida de tensión de forma repetitiva, que produce parpadeo en la iluminación, puede ser molesto para el ser humano.

<b>Hilatura</b>	Es el arte de hilar la lana, el algodón y otras materias análogas.
<b>IEC</b>	Comisión electrotécnica internacional, es una organización mundial que publica normas internacionales globalmente pertinentes para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y demás relacionadas.
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, es una organización internacional sin ánimos de lucro, conformada por ingenieros, que es mayormente conocida por desarrollar normas para varios campos de la ingeniería.
<b>Interlock</b>	Es una variante del tejido rib, de punto liso y doble que se ve igual por ambos lados. Se utiliza en playeras, vestidos, ropa de bebé, entre otros.
<b>Inversor fotovoltaico</b>	Es un convertidor que transforma la energía de corriente continua procedente de los paneles solares (generador fotovoltaico) en corriente alterna.
<b>LGE</b>	Ley general de electricidad, es la ley que rige y monitorea las actividades tanto de generación, como de transporte y de distribución de energía en el país. Fue implementada para desarrollar y asegurar el sistema eléctrico de Guatemala.

<b>Mpp</b>	<i>Maximum Power Point.</i> Seguimiento de máximo punto de potencia, es el punto de trabajo en el que los paneles fotovoltaicos transmiten la máxima potencia eléctrica posible.
<b>NTSD</b>	Normas técnicas del servicio de distribución, establecen las tolerancias para ciertas perturbaciones que afectan la calidad del producto suministrado por los distribuidores de energía eléctrica.
<b>Rib</b>	Es un tejido que tiene ambas caras iguales y es elástico.
<b>Vestex</b>	Asociación de la industria del vestuario y textiles, entidad industrial nacional cuyo objetivo es monitorear el mercado de textiles e implementar programas y campañas para mejorar la competitividad regional y propiciar la importación de industrias guatemaltecas.



## **RESUMEN**

Este documento presenta el estudio de las perturbaciones que no están al alcance del instrumento por analizar y que han ocurrido por la no calidad de energía en una industria textil. Se basa en las normas técnicas del servicio de distribución, para luego comparar la teoría aplicable con los resultados obtenidos en la práctica y así determinar las posibles sanciones que reciba la empresa por el distribuidor de energía eléctrica.

Para el análisis se utilizará el equipo clase A, Dranetz 4400, el cual permite realizar un estudio de calidad de energía altamente confiable y con alto detalle. Se mostrarán los aspectos más importantes de las normas nacionales que se consideren relacionadas directamente con el estudio de la instalación eléctrica. Se planificará y ejecutará un estudio de calidad de energía para confirmar que los parámetros estipulados por la NTSD se encuentren dentro de las tolerancias permisibles.

Se indagará en los beneficios de la buena práctica de calidad de potencia eléctrica, así como en los problemas que se puedan presentar por su ausencia.



## OBJETIVOS

### General

Realizar un estudio de calidad de energía eléctrica para determinar que la incidencia del usuario en la calidad del producto se encuentre dentro de los parámetros requeridos.

### Específicos

1. Medir el factor de potencia, *flicker*, distorsión armónica y compararlo con los parámetros establecidos por las normas.
2. Analizar los datos obtenidos durante el estudio haciendo uso del software del equipo medidor de calidad de energía.
3. Determinar si la industria donde se realizó el estudio cumple con los parámetros establecidos en las NTSD del lado del usuario.





## INTRODUCCIÓN

La industria textil en Guatemala es una industria en constante crecimiento, la cual ha llegado a ser un eje económico central a nivel local, regional y nacional, existen en el sistema grandes usuarios de la energía eléctrica. La red de esta industria cuenta con gran número de equipo eléctrico funcionando continuamente para lograr suplir su demanda. El uso de este equipo eléctrico y electrónico, en conjunto, puede producir inestabilidad en la red por la ausencia de calidad de potencia eléctrica.

Un estudio de calidad de energía permite detectar fallos y, a su vez, evitar pérdidas económicas y sanciones para el usuario. El análisis de calidad de energía es un factor determinante en una industria, no solo en la textil, ya que la ausencia de calidad de energía provoca el aumento de los costos de producción y que el equipo sufra interrupciones y/o fallos, alterando también su tiempo de vida útil.

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica emite las normas técnicas del servicio de distribución para establecer obligaciones para los participantes que hacen uso de los sistemas de distribución de energía eléctrica en base a parámetros ahí enunciados. Estos se pueden corroborar con un analizador de calidad de energía eléctrica, para lograr mantener un control y evitar daños a los equipos de generación y transmisión, por medio de valores mínimos de tolerancias aceptados y sanciones económicas a los usuarios que incumplan con lo estipulado.



# **1. LA INDUSTRIA TEXTIL EN GUATEMALA**

## **1.1. Aspectos económicos**

La industria textil en Guatemala se encuentra en constante crecimiento, el sector de vestuario es uno de los productos de mayor exportación del país. Según la Cámara de Industria en Guatemala, de 2016 a 2017 las exportaciones de textiles se han incrementado un 6,6 %.

### **1.1.1. Situación actual**

El presidente de la Comisión de vestuario y textiles de Guatemala, Vestex, afirma que a la fecha el sector de vestuario y textiles está constituido por 153 empresas de confección, 42 textileras y más de 200 empresas de servicio.

La Tabla I, muestra el incremento relativo del volumen de exportaciones entre 2016 y 2017, según los datos obtenidos hasta noviembre del último año. Los materiales textiles (tejidos o telas) han tenido un incremento del 6,6 % entre esos dos años.

**Tabla I. Volumen de exportación de los 12 principales productos de exportación**

Producto exportado	Incremento del 2016/2017 (%)
Máquinas y aparatos mecánicos	26,7
Caucho natural (hule)	19,7
Productos farmacéuticos	16,3
Manufacturas de papel y cartón	14,1
Hierro y acero	13,3
Café	12,2
Aluminio	10,2
Otros productos	8,9
Insecticidas, fungicidas y desinfectantes	8,8
Detergentes y jabones	7,6
Banano	6,6
Materiales textiles (tejidos o telas)	6,6
Bebidas, líquidos alcohólicos y vinagres	6,5

Fuente: *Exportaciones: principales productos de exportación*. <http://cig.industriaguatemala.com/>.

Consulta: diciembre de 2017.

Según la representante de VESTEX, el valor agregado de las prendas guatemaltecas se ha incrementado en estos diez años, pasando de un 34 % en 2006 a un 42,27 % en 2016.

El sector de vestuario y de textiles se considera uno de los más dinámicos en la economía nacional actual, debido a que contribuye al crecimiento económico y al desarrollo del país, representando el 4 % de la producción nacional (PIB) y el 19 % de la producción industrial (PIB industrial).

La industria textil se ha caracterizado de la siguiente manera: 22,39 % en tejido plano de algodón y fibra sintética, mezclas (poliéster y algodón); un 77,61 % de tejido de punto de algodón, sintético y mezclas (*jersey*, *interlock* y *rib*).

### **1.1.2. Entes importantes**

A continuación se muestran las entidades y asociaciones que se consideran importantes para la industria textil en Guatemala.

#### **1.1.2.1. Agexport**

Es una entidad privada, no lucrativa, fundada en 1982 que tiene el propósito de promover y desarrollar las exportaciones de productos y servicios en Guatemala. La Asociación Guatemalteca de Exportadores, agrupa y representa a las empresas guatemaltecas pequeñas, medianas y grandes, brindándoles apoyo para posicionarse y permanecer en el mercado mundial.

El sector de vestuario y textiles (Vestex) se encuentra entre la comisión de empresas fabricantes y exportadoras de productos manufacturados.

#### **1.1.2.2. Vestex**

Es la asociación de la industria de vestuario y textiles. Es un sector conformado por las empresas de confección, textiles, servicios y accesorios, que venden principalmente en el extranjero. Entre los servicios que ofrece Vestex, se encuentran: el laboral, el de mercadeo y promoción, el acceso a mercados, así como servicios y accesorios.

El sitio electrónico de Vestex contiene un directorio que cuenta, a la fecha de su consulta, con 153 empresas de confección, 33 empresas textiles e hilanderas y 250 empresas de servicios y accesorios. Lo anterior hace más fácil la tarea de búsqueda de cualquier industria textil en particular.

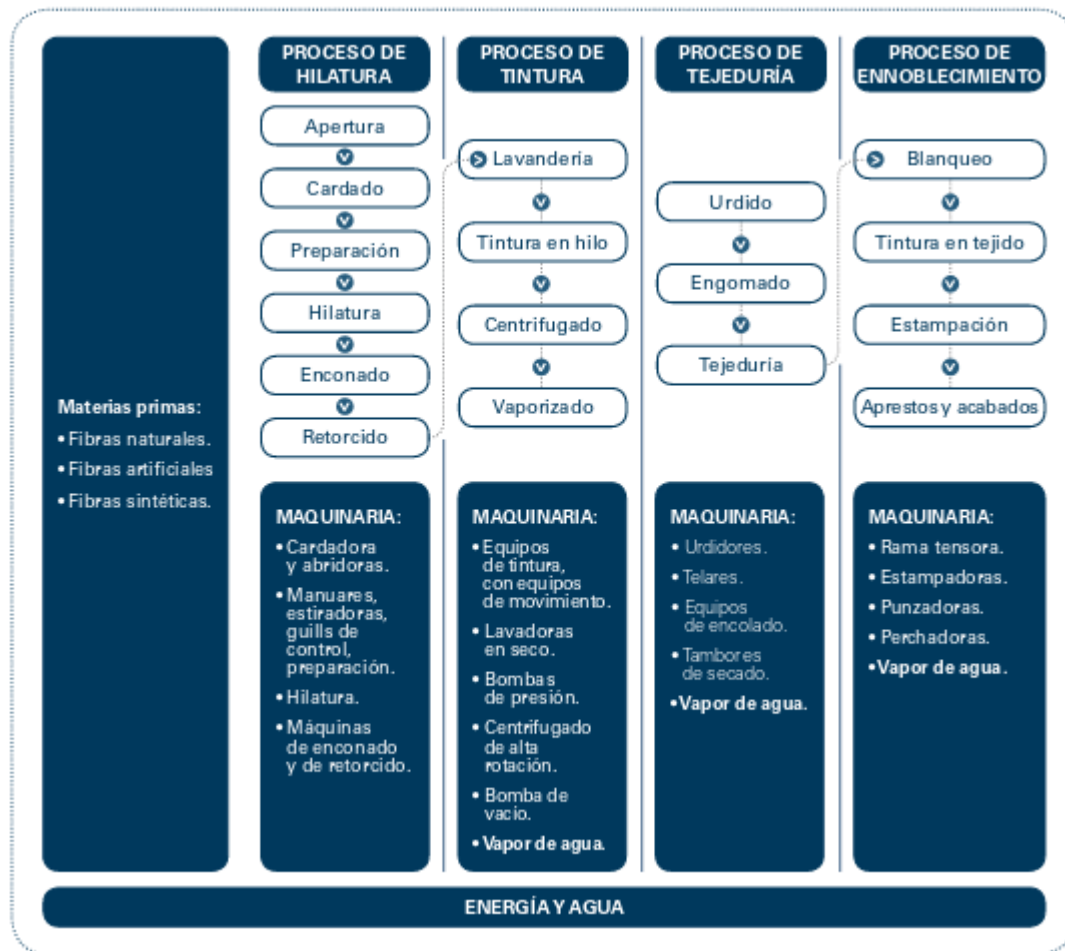
## **1.2. Proceso general de la tela en la industria por estudiar**

En la industria textil se deben considerar varios de los procesos anotados a continuación.

### **1.2.1. Aspectos técnicos**

Para la creación de la tela en la industria textil la materia prima pasa por cuatro procesos principales, los cuales se dividen en procesos intensivos en energía eléctrica (hilatura y tejeduría) y procesos intensivos en energía térmica (teñido y acabados). Se debe tomar en cuenta que no todas las industrias se dedican a los mismos procesos. Por lo que la demanda térmica puede ser mayor que la eléctrica, según sea la especialización de la empresa textil que se observe.

Figura 1. Diferentes procesos de producción de la industria textil



Fuente: *Manual de eficiencia energética para Pymes*. <http://www.planeficienciaenergetica.es>.

Consulta: julio de 2017.

La empresa textil por estudiar, se dedica a la confección, corte y azorado, sublimación, serigrafía, corte láser, bordado y diseño gráfico. Por lo cual se observa que la demanda es mayormente térmica por los procesos de sublimación, serigrafía y corte láser debido a la resistencia interna de los equipos, notando que algunos funcionan desde tempranas horas de la madrugada hasta algunas horas después del final de la jornada laboral.

## **1.2.2. Maquinaria eléctrica en los procesos productivos**

Para cada una de las etapas a las que se somete la tela para concluir el producto se observan diferentes equipos eléctricos y neumáticos conectados a la red de 240 V de la empresa, que en su mayoría son monofásicos, los cuales se listan a continuación.

### **1.2.2.1. Equipos utilizados en el proceso de sublimación**

El diseño impreso en papel especial es llevado a las diferentes máquinas que se encargan de transferirlo a la tela por medio de calor y presión. Dependiendo del tamaño del diseño, se utilizan las máquinas pequeñas o la plancha de sublimación con rodillo giratorio.

### **1.2.2.2. Equipos utilizados en el proceso de confección**

En esta etapa se encuentran máquinas de coser industriales, máquinas para estampar botones y planchas. Existen en la línea de producción algunos equipos para hacer gorras, los cuales funcionan con pequeños motores eléctricos o con vapor.

### **1.2.2.3. Equipos utilizados en el proceso de corte y azorado**

En esta sección se encuentran sierras, cortadoras de tela tubular, enrolladoras y equipos de uso manual. Para cuando existe demanda de fabricación de gorras, se encuentra una cortadora de viseras. Adicional a esto



se encuentra una máquina de corte automático de tela, llamada calandra, que se espera configurar correctamente y poner en marcha en los próximos meses luego del estudio de calidad de energía.

#### **1.2.2.4. Equipos utilizados en el proceso de diseño gráfico**

En esta parte de la empresa se concentran plotters, varios ordenadores e impresoras para realizar los diseños que se transferirán directamente a la tela en el proceso de sublimación.

#### **1.2.2.5. Equipos utilizados en el proceso de serigrafía**

El diseño deseado se imprime en marcos especiales en un cuarto oscuro con ayuda de una reveladora. Luego el marco se lleva al siguiente paso para transferir la tinta a la tela con ayuda de máquinas manuales y automáticas llamadas pulpos, los cuales permiten que la tela se posicione y se estire para transferir los colores deseados, para luego calentar la tela por medio de un horno con banda transportadora o pequeñas unidades de pre secado y conseguir que la tinta se adhiera de mejor manera.

Los marcos finalizados se almacenan a cierta temperatura en una bodega con un deshumidificador, para que no se deterioren los diseños que se encuentran impresos en la tela especial.

### 1.2.2.6. Equipos utilizados en el proceso de láser y bordado

En esta sección se encuentran nueve bordadoras de uso industrial, las cuales se encargan de crear los diseños que se les transfiera por medio digital a su memoria. Existe también una máquina que permite hacer cortes láser en la tela de forma automática. Para garantizar la calidad y continuidad de la producción, se tiene un UPS destinado a garantizar la continuidad de suministro eléctrico para las unidades de bordado automático.

### 1.2.2.7. Inventario de cargas de la industria textil por estudiar

En el cuadro siguiente se listan los equipos instalados por área. Su uso no es constante, debido a que los pedidos resultan ser distintos y se genera una demanda variada mientras se cumple con la producción.

Tabla II. **Potencia instalada aproximada en la industria textil por estudiar**

Área de serigrafía		
Cantidad	Descripción	Potencia (W)
1	Ordenador	300,00
3	Hotflash (presecado)	3 000,00
1	Horno con banda transportadora	39 000,00
2	Pulpos automáticos (11 motores c/u)	25 500,00
1	Aspiradora 5 galones	840,00
3	Ventiladores	2 200,00
1	Compresor Kaeser 10hp	7 500,00

Continuación de la tabla II.

32	Lámparas de 70W	2 400,00
1	Quemadora/reveladora	500,00
1	Deshumidificador	1 000,00
	<b>Total:</b>	<b>82 240,00</b>
<b>Cargas 2do.nivel (área de corte y azorado)</b>		
4	Sierras verticales	4 840,00
2	Sierras de disco	200,00
2	Ordenadores	260,00
1	Impresora	150,00
2	Ventiladores	2 200,00
1	Ventiladores	2 400,00
1	Motor 3Hp de enrolladora	2,20
1	Motor 3Hp de enrolladora	2,20
1	Máquina de cortar tela tubular	400,00
1	Motor ½ Hp	200,00
1	Cortadora de gorras	300,00
27	Lámparas	1 400,00
	<b>Total:</b>	<b>12 35440</b>
<b>Área de confección</b>		
16	Ventiladores de 70W	1 120,00
1	Máquina de sublimación	6 500,00
1	Calandra	1 880,00
40	Máquinas de coser, máquinas de <i>overlock</i> y botoneras	26 000,00
	<b>Total:</b>	<b>35 500,00</b>
<b>Área de diseño gráfico e impresión</b>		
5	Ordenadores	1 500,00
3	<i>Plotters</i>	1 320,00
1	<i>Plotter</i>	480,00
1	Ups NT-501	250,00
1	Impresora Ink-jet	59,00

Continuación de la tabla II.

1	Láser Jet Color	295,00
1	<i>Plotter</i> de corte	65,50
1	<i>Plotter</i> Ink-jet	60,00
1	<i>Plotter</i> Ink-jet	54,00
8	Lámparas de 2 c/u	280,00
6	Lámparas para traspaso	240,00
1	Aire acondicionado 60 000 BTU/h	355,00
	<b>Total:</b>	4 958,50
<b>Área de bordado</b>		
9	Bordadoras	500,00
1	Cortadora láser	60,00
1	UPS 6000VA	4 800,00
3	Ordenadores	450,00
	<b>Total:</b>	5 810,00
<b>Oficinas administrativas</b>		
6	Ordenadores portátiles	900,00
13	Ordenador	4 550,00
1	Inkjet <i>plotter</i>	120,00
1	Hipo Jet	60.,00
1	UPS 750 VA	450,00
1	Impresora Ink-jet	10,00
	<b>Total:</b>	6 090,00
<b>Área de sublimación</b>		
1	Cortadora de papel	750,00
1	Máquina de sublimación	30,00
2	Máquinas transfer No.2	1 800,00
1	Máquinas transfer	1 200,00
	<b>Total:</b>	3 780,00
<b>Taller</b>		

Continuación de la tabla II.

1	Esmeril	375,00
1	Esmeril	200,00
	Herramientas varias	400,00
	<b>Total:</b>	<b>975,00</b>
<b>Oficinas 2do nivel</b>		
7	Servidores	1 050,00
2	Interruptor Ethernet	26,00
1	<i>Router</i>	10,00
5	<i>Access Point</i>	150,00
2	Ordenadores	300,00
	Iluminación	600,00
1	Bomba de agua de 2 ½ Hp	1 900,00
	<b>Total:</b>	<b>4 036,00</b>
<b>Sumatoria de potencias:</b>		<b>155 743,90</b>

Fuente: elaboración propia.

Figura 2. **Vista del área de confección y oficinas de la empresa**



Fuente: empresa Sports Adiction.

### **1.3. Tipos de mercado eléctrico existentes en Guatemala**

Basado en el inventario de cargas, se puede observar que la suma de todas las potencias instaladas es mayor a 100kW. Debido a la generación de los paneles solares se disminuye la lectura de la demanda de potencia eléctrica en la instalación visto desde el medidor de la empresa distribuidora.

Según la Ley Eléctrica Nacional, se diferencian dos tipos de mercados: el regulado y el libre. Dentro del mercado regulado se encuentran todos aquellos usuarios con una demanda menor a 100kW, en el cual se cuenta con seguridad de suministro, precios regulados, derechos y obligaciones por ley.

Dentro del mercado libre se ubican todos los usuarios con una demanda superior a 100 kW, registrados ante la CNEE y el Ministerio de Energía y Minas, los cuales gozan de precios competitivos en sus tarifas, derechos y obligaciones por acuerdo entre comercializador y usuario, dependiendo del esquema bajo el que un gran usuario interactúe con el mercado mayorista.

Los grandes usuarios no se encuentran sujetos a regulación de precio y las condiciones de suministro con las que operan, se encuentran libremente pactadas con la distribuidora o la comercializadora por medio de un contrato. Únicamente se define el pago máximo por el uso de la red de transporte denominado peaje en función del transportista.

#### **1.3.1. Tipos de contratos reconocidos por el AMM**

En la Norma de Coordinación Comercial No. 13, se detallan los lineamientos y definiciones de los tipos de contratos declarados en el AMM por los participantes del mercado mayorista. El mercado a término es el conjunto de

transacciones de compra-venta de electricidad, pactados a plazo entre agentes del mercado mayorista mediante contratos.

Está constituido por contratos entre participantes del mercado mayorista, con precios, cantidades y duración pactados entre las partes, los cuales deben estar enmarcados dentro de lo preceptuado por la ley, sus reglamentos y las normas de coordinación. Los primeros cuatro contratos, listados a continuación, son los de abastecimiento, mientras que los siguientes son:

- Por diferencias con curva de carga: se define una curva de carga y la energía de dicha curva, pasa a ser del comprador, independiente de su demanda.
- Potencia sin energía asociada: se utiliza cuando el comprador únicamente cubre su demanda de potencia, y la energía la debe comprar del mercado de oportunidad.
- De opción de compra de energía: cuando el precio de oportunidad de la energía, también llamado precio SPOT, es más caro que el precio del contrato, se asigna energía del contrato, de otra manera se toma energía del denominado mercado de oportunidad, que es el mecanismo de cierre de las transacciones y aplica para las que no fueron incluidas en el mercado a término.
- Contrato por diferencias por la demanda faltante: el vendedor cubre toda la demanda del comprador hasta la potencia comprometida.
- Contratos existentes: son los suscritos antes de la entrada en vigencia de la ley.

- Contrato de energía generada: cuando un generador vende toda la energía generada.
- Contrato de reserva de potencia: aplica cuando se vende disponibilidad de una unidad a otro generador.
- Contrato de respaldo de potencia: cuando un productor vende a otro productor potencia.
- Contratos de exportaciones e importaciones: regulan las transacciones que se efectúen en el mercado eléctrico regional o con otros mercados o países con los que el sistema nacional interconectado tenga algún enlace. Las regulaciones se encuentran en la Norma de Coordinación Comercial No. 10.
- Contratos de oferta firme eficiente para cubrimiento de transacciones internacionales de corto plazo: contrato en con el cual un agente comercializador de generación, puede realizar transacciones internacionales de corto plazo. En el contrato no se incluye la energía, la cual no puede ser utilizada para cubrir demanda firme a través de contratos.



Tabla III. **Diferentes esquemas de participación de grandes usuarios en el mercado mayorista**

	Gran usuario participante	Gran usuario con representación
Participación en el mercado mayorista	Directa	A través de un contrato de comercialización con un comercializador
Suministro	Por medio de contratos a término y en el mercado de oportunidad	A través de un comercializador
Cobertura de demanda firme	Obligatoria con contratos de potencia	El comercializador que asume las responsabilidades del gran usuario deberá cubrir en todo momento la demanda firme de cada uno de sus clientes
Garantía de pago	Contar con una garantía de pago a través de una línea de crédito en el banco liquidador, por un monto inicial establecido por el AMM de acuerdo con lo indicado en la Norma de Coordinación Comercial No.12 (Resolución 157-09 del AMM)	El comercializador debe presentar una garantía de pago
Acceso al sistema informático del AMM	Perfil de acceso mediante <i>token</i> , el cual es un dispositivo electrónico necesario para acceder al sistema <i>direct@mm</i> , por medio del cual se presentan al AMM las planillas de contratos e información para la coordinación de la operación	Acceso a <i>direct@mm</i> mediante código para ingresar las planillas correspondientes (comercialización, representantes y delegados ante el AMM)
Pago de cuota por operación y administración para financiar presupuesto anual del AMM	Pagadera de forma directa	Pagadera por su comercializador y trasladada según acuerdo privado

Fuente: PONCIANO, Juan. *Perfil energético de Guatemala: introducción al sector eléctrico*. p.

51.

El directorio de declaraciones electrónicas AMM (Direct@MM) es un servicio ofrecido en el sitio web del AMM, en el cual se permite observar planillas de mercado, planillas de operación, planillas de intercambio, entre otras aplicaciones, como la carga de lectura de canales y la actualización de bases de contactos de participantes.

Para hacer transacciones en el mercado mayorista y hacer uso del servicio `direct@mm` se debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Poseer una demanda de potencia superior a 100 kW.
- Estar inscrito como gran usuario en el registro de agentes y grandes usuarios del MEM.
- Estar habilitado comercialmente como gran usuario por el AMM.
- Contar con un usuario, contraseña y un *token* que se solicita al departamento de informática del AMM, tal como se detalla en la Tabla III.

Luego de que una instalación eléctrica pasa a registrarse como gran usuario, según lo estipulado por las NTSD, esta se puede ubicar en una posición diferente de las tablas de tolerancias que se mostrarán más adelante. De esta manera se genera un estudio de forma diferente como se haría para un usuario regulado. Ya que estas normas establecen tolerancias para los usuarios, según su consumo de potencia, así como el voltaje suministrado por el comercializador.

Los agentes y grandes usuarios registrados tienen el derecho de operar libremente en el mercado mayorista. De conformidad con la ley y sus reglamentos, cuentan con acceso a la información sobre los modelos y metodología utilizados por el administrador del mercado mayorista para la programación y el despacho, así como el derecho de recibir del administrador del mercado mayorista información sobre la programación de la operación y despacho, y sobre los resultados de la operación.

Entre las obligaciones que deben cumplir los agentes y grandes usuarios, se encuentran:

- Mantenerse dentro del marco de la Ley Eléctrica Nacional y sus reglamentos.
- Cumplir con las normas emitidas por la CNEE y normas emitidas por el mercado mayorista.
- Contar con un contrato de potencia que permita cubrir sus requerimientos de demanda firme.
- Cumplir con los requisitos mínimos de su inscripción inicial, demanda mínima de 100 kW, por lo menos en dos meses de cada trimestre consecutivo dentro del año estacional vigente para mantenerse en el registro de agentes y grandes usuarios del mercado mayorista del Ministerio de Energía y Minas y conservar la calidad de gran usuario.
- Cumplir con la declaración de la información solicitada en la norma comercial No.2 del AMM, que servirá como base para efectuar el cálculo de la demanda firme de los distribuidores, grandes usuarios y exportadores del SNI.

Cabe destacar que un usuario no conectado al sistema nacional interconectado no está sujeto a las NTSD debido a que las perturbaciones en las que incida esta instalación eléctrica afectarán únicamente a la fuente de generación, transmisión y usuarios que se encuentran conectados a esta red.

Una instalación eléctrica que sobrepasa los límites establecidos de potencia para un usuario regulado, al momento de registrarse como gran usuario, tiene la flexibilidad de elegir una tarifa de las opciones brindadas por la CNEE en los pliegos tarifarios. Para un gran usuario existe la ventaja de que la

distribuidora le puede aplicar una tarifa adecuada a su tipo de consumo, el cual representa el máximo beneficio para su instalación, determinado con base en sus características de consumo. Las normas que rigen la operación de un gran usuario se encuentran en la ley general de electricidad.

### **1.3.2. Administrador del mercado mayorista (AMM)**

Según la Ley General de Electricidad, el objetivo del administrador del mercado mayorista es asegurar el correcto funcionamiento del sistema nacional interconectado y de las interconexiones por medio del despacho o programación de la operación, dentro de los requerimientos de calidad de servicio y seguridad, así como el posdespacho y la administración de las transacciones comerciales del mercado mayorista.

El mercado mayorista está conformado por generadores, distribuidores, transportistas, comercializadores y grandes usuarios. La relación directa para una industria textil se tiene entre comercializadores y grandes usuarios, debido a que los primeros son los intermediarios en la compra y venta de bloques de energía eléctrica y sin participación ni intermediación en la generación, transporte, distribución y consumo. Por medio de un comercializador es que se pueden obtener mejores tarifas por medio de un acuerdo entre las dos partes.

Un comercializador debe cumplir con el límite, establecido en la LGE, de comprar o vender bloques de energía asociados a una oferta firme eficiente o demanda firme de por lo menos dos megavatios (2 MW). Los mismos límites son aplicables a los importadores y exportadores, debido a que también son considerados dentro de este grupo.

### **1.3.3. Cobro de factura para los usuarios**

Las tres empresas que emiten factura eléctrica son la Empresa Eléctrica de Guatemala S.A. (EEGSA), Distribuidoras de Energía Eléctrica de Oriente S.A. (Deorsa) y de Occidente S.A (Deocsa) en las que se incluyen cobros por distribución, de la siguiente manera:

- Cargo fijo por cliente, en función de la empresa que presta el servicio.
- Tasa municipal (en función de la municipalidad que preste el servicio).
- Impuesto al Valor Agregado (IVA: 12 %).
- Bajo factor de potencia (aplicable únicamente a la industria y no al sector domiciliario).
- Exceso de demanda contratada (aplicable casi exclusivamente a la industria, aunque se aplique en algunos casos al sector domiciliario).
- Cargos por pago moroso (1,1 % mensual).
- El total de la factura eléctrica es la suma de todos los cargos arriba mencionados incluyendo las penalizaciones incurridas durante el mes por incumplimiento de las normas técnicas del servicio de distribución (NTSD).

Otro posible escenario se presenta para un gran usuario con representación, dependiendo de las tarifas que se establezcan entre el gran usuario y el comercializador en el contrato así será el cobro de la energía eléctrica. Este tipo de usuario está obligado a cubrir su demanda firme mediante contratos de potencia, según la Ley General de Electricidad, de lo contrario, se le emitirá una sanción por incumplimiento.

Según la Tabla IV, el factor de potencia típico que se encuentra en la industria textil es alrededor de 0,65 a 0,75. El cual puede perjudicar el cobro en

la factura mensual de energía eléctrica para esta instalación eléctrica, sin importar el tipo de distribuidor, ya que esta perturbación afecta la transmisión y la generación de la energía, tal como se expone en el capítulo siguiente.

Tabla IV. **Factores de potencia típicos de industria y comercio**

Sector	Factor de potencia fp
Bancos	0.96 -0.99
Plantas de corrugados	0.82 -0.98
Centros comerciales	0.80 – 0.95
Imprenta de periódicos	0.79 – 0.95
Hoteles	0.75 – 0.94
Hornos de arco	0.70 – 0.90
Industria textil	0.65 – 0.75
Química	0.65 – 0.75
Maquinaria	0.40 -0.65
Hornos de inducción	0.15 -0.40

Fuente: PONCIANO, Juan. *Perfil energético de Guatemala: introducción al sector eléctrico*. p. 73.

#### 1.4. Consumo energético en la empresa textil por estudiar

Tomando como muestra facturas correspondientes a los últimos doce meses previos al estudio, se obtiene que la potencia promedio demandada es de 89,8 kW.

La generación de potencia de los paneles solares se muestra en la Tabla V, donde se observa que la potencia de corriente alterna total generada por los nueve inversores en el momento de la lectura es de 66,965 kW, lo que resulta

ser una potencia muy cercana a la que registra el contador principal de la Empresa Eléctrica, haciendo más evidente que la instalación eléctrica tiene en total una demanda de potencia mayor a 100 kW.

Según datos de la empresa a cargo de la instalación de los paneles solares, la potencia máxima de generación es de 108 kW, dividido en 9 inversores, los cuales están conformados por 3 series de 16 paneles solares cada uno, haciendo un total de 432 paneles solares de silicón policristalino instalados.

**Tabla V. Datos obtenidos de los paneles solares, cerca de las 11 am, un día con cielo sin mucha nubosidad**

Inversor	Potencia AC (W)	Voltaje Generado (V)	Energía Generada durante el día(kWh)	Modo de Operación de las celdas	Tipo de Red 240V	
					L1 (V)	L2 (V)
1	7 541	408	26,1	Mpp	124	127
2	7 700	425	26,58	Mpp	125	127
3	7 394	425	26,54	Mpp	123	124
4	7 315	425	26,28	Mpp	124	125
5	7 254	407	26,33	Mpp	123	123
6	7 585	417	27,48	Mpp	123	123
7	7 178	396	31,64	Mpp	123	123
8	7 544	413	33,21	Mpp	123	123
9	7 454	430	32,8	Mpp	123	124
<b>Total:</b>	66,965 kW					

Fuente: elaboración propia.





## **2. CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Debido a que la industria textil se considera como un usuario, se describe a continuación la incidencia del usuario en la calidad del producto de las normas técnicas del servicio de distribución.

### **2.1. Incidencia del usuario en la calidad del producto**

Las normas técnicas del servicio de distribución establecen los límites de medición de tres parámetros para evitar sanciones por parte del distribuidor de energía eléctrica. Los cuales son: distorsión armónica, *flicker* y factor de potencia.

#### **2.1.1. Distorsión armónica**

Las perturbaciones armónicas casi siempre son generadas por las cargas no lineales. Debido al incremento del uso de equipo electrónico dentro de la industria, la distorsión armónica se ve en aumento. Actualmente, las cargas no lineales representan un gran porcentaje de las cargas totales en la industria, por lo que puede llegar a ser peligroso para el sistema eléctrico debido al aumento de la distorsión armónica total; conocida por sus siglas en inglés THD.

En una planta industrial se trata fundamentalmente las corrientes armónicas, mientras que en redes de distribución se refiere a tensiones armónicas que, producidas por determinadas cargas del sistema, pueden afectar a otros usuarios.

Se trata de ondas periódicas distorsionadas, que pueden representarse matemáticamente como suma de formas de onda senoidales. La expresión que define los armónicos, según lo formuló el matemático francés Jean Baptiste Fourier es de la siguiente forma:

$$V(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t) + V_2 \sin(2\omega t) + V_3 \sin(3\omega t) + \dots + V_n \sin(n\omega t) \\ + V_{n+1} \sin((n+1)\omega t) + \dots$$

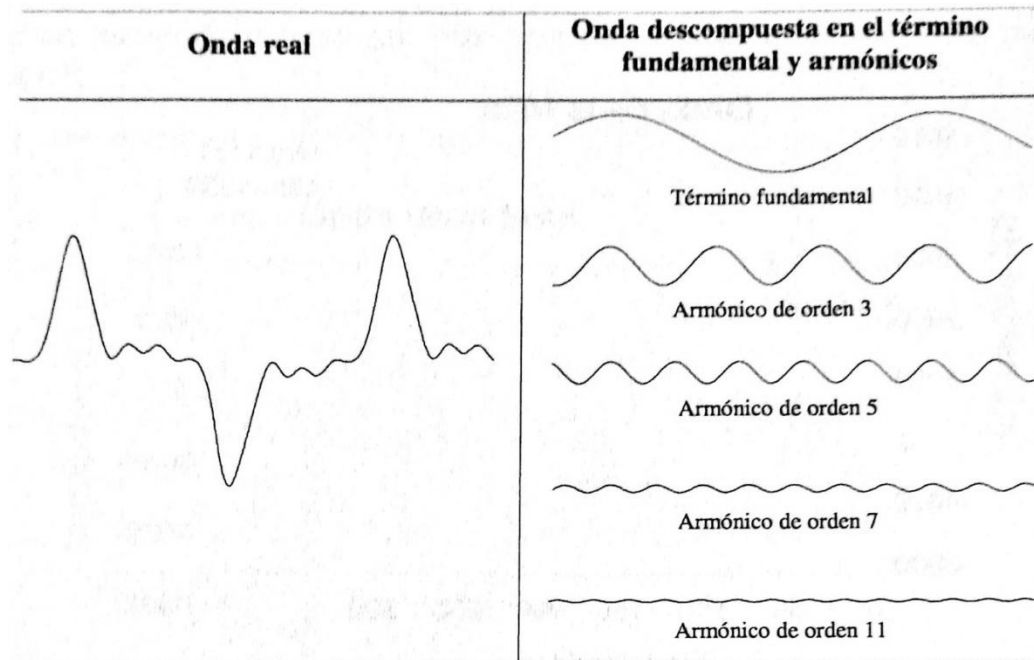
Donde:

$V_0$ : constante de la componente de corriente directa

$V_n$ : valores pico de las constantes de los múltiplos de cada frecuencia

La expresión de Fourier es una serie infinita, en la cual  $V_0$  representa la constante de la componente DC de la forma de onda  $V_1, V_2, V_3 \dots V_n$  son los valores pico de los términos sucesivos de la expresión. Los términos son conocidos como las armónicas de la expresión periódica. El primer armónico es la frecuencia fundamental (60 Hz en Guatemala), de forma que el número de armónica indica la frecuencia de la armónica, siendo la segunda armónica el componente con una frecuencia de dos veces la fundamental (120 Hz), la tercera armónica sería de tres veces la fundamental (180 Hz) y así sucesivamente.

Figura 3. **Descomposición de una onda distorsionada en armónicos**



Fuente: FUSTER, Vicente. *Las perturbaciones eléctricas y la industria textil, origen consecuencias y soluciones.* p. 42.

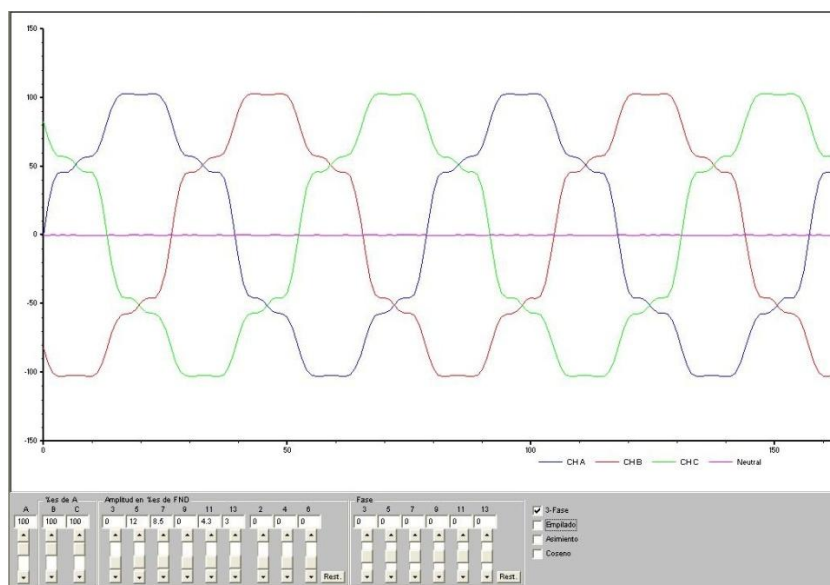
Los armónicos impares son más comunes que los pares. Los armónicos pares no se encuentran normalmente en sistemas eléctricos, al menos que haya corriente consumida por una mitad de la onda senoidal, son indicadores de que algo no está trabajando bien. Las formas de onda con armónicos pares usualmente se pueden detectar visualmente debido a que las ondas pierden simetría, la mitad de una onda se muestra como el reflejo de la otra mitad.

Tal como su nombre lo indica, los armónicos pares son representados por los números 2, 4, 6, 8, 10 en adelante; los impares por el 3, 5, 7, 9, 11 y así sucesivamente. El número de armónico 1 es asignado al componente de la

frecuencia fundamental de la onda periódica, mientras que el número de armónico 0 representa la constante o componente DC de la forma de onda.

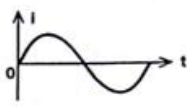
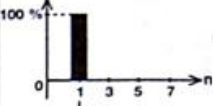

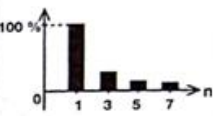
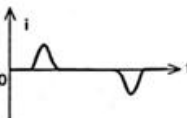

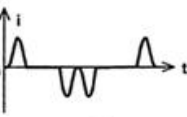

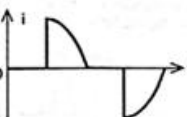
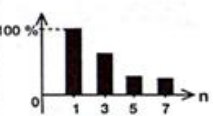
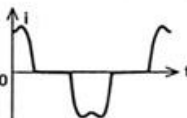
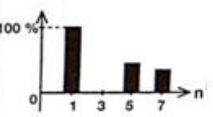

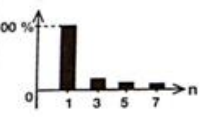
Las fuentes de armónicos más comunes en un sistema eléctrico son los transformadores de potencia sobreexcitados, controladores de velocidad en motores eléctricos, hornos de arco eléctrico, luz fluorescente, equipo electrónico y equipo de electrónica de potencia. Si las armónicas no se controlan en el punto en donde se generan, estas se pueden transmitir a otros usuarios conectados a la misma red.

Figura 4. **Simulación de forma de onda al acercarse a los límites establecidos por las NTSD**



Fuente: elaboración propia, con base en el software DranView 5.7.

Figura 5. Principales tipos de cargas y formas de las corrientes absorbidas

TIPO DE CARGA	APARATOS RELACIONADOS	CORRIENTE ABSORBIDA	ESPECTRO ARMÓNICO CORRESPONDIENTE
RECEPTOR RESISTIVO	HORNOS INDUSTRIALES CON RESISTENCIAS REGULADOS POR TRENES DE ONDAS LÁMPARAS INCANDESCENTES CALENTADORES DE AGUA, CALENTADORES EN GENERAL		
ALUMBRADO	TUBOS FLUORESCENTES LÁMPARA DE VAPOR H.P.		
RECTIFICADORES MONOFÁSICOS CON DIODOS Y FILTRADO, ALIMENTACIÓN RECORTADA	MICRO INFORMÁTICO TELEVISORES LÁMPARAS CON BALASTROS ELÉCTRICOS		
RECTIFICADOR TRIFÁSICO CON DIODOS Y FILTRADO	VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN		
REGULADOR MONOFÁSICO (MANDO O CONTROL PARA ÁNGULO DE FASE)	REGULACIÓN DE POTENCIA CON HORNOS DE RESISTENCIA MODULACIÓN DE POTENCIA DE LÁMPARAS DE HALÓGENO		
RECTIFICADOR TRIFÁSICO POR TIRISTORES	VARIACIÓN DE VELOCIDADES DE MOTORES DE C.D. Y DE MOTORES SÍNCRONOS		
MOTORES DE INDUCCIÓN	MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS APARATOS ELECTRODOMÉSTICOS ELEVADORES (ASCENSORES)		

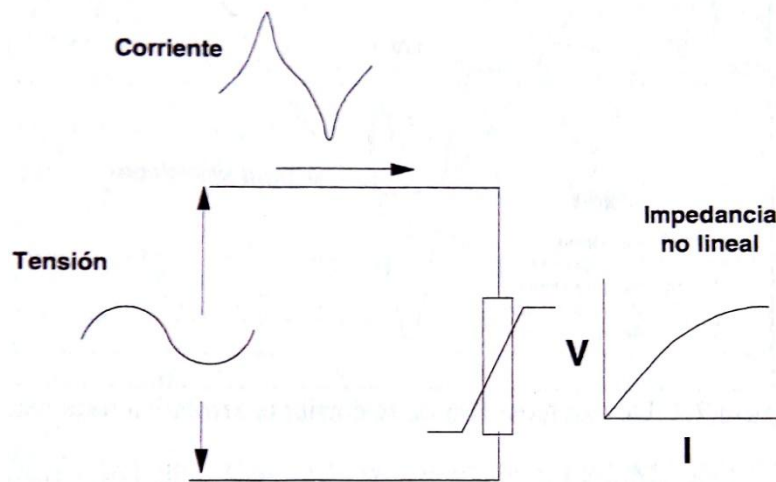
Fuente: HARPER, Enríquez. *La calidad de la energía en los sistemas eléctricos*. p. 247.

### 2.1.1.1. Mecanismo de generación de armónicas

Los armónicos son producidos en una situación estacionaria, con frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental. Se asocian siempre al funcionamiento continuo de cargas no lineales, ocasionando una distorsión de la onda de una manera estable durante algunos segundos.

Las cargas no lineales son la fuente principal de armónicos en el sistema eléctrico. Al aplicarles una tensión senoidal, la corriente resultante se deforma, debido a que la tensión y la corriente tienen a variar respecto de una curva no lineal, tal como se muestra en la curva V-I de la figura 6.

Figura 6. **Distorsión de la corriente debida a cargas no lineales**



Fuente: FUSTER, Vicente. *Las perturbaciones eléctricas y la industria textil, origen consecuencias y soluciones*. p. 185.

Los múltiplos enteros de la fundamental de la onda distorsionada son llamados armónicos. Debido a que por descomposición en serie de Fourier esta

onda se puede representar como una suma de ondas sinusoidales. Este tipo de deformación periódica recibe el nombre de distorsión armónica.

Regularmente los armónicos de orden superior al 25 o al 50, pueden causar interferencias a dispositivos de baja potencia, mas no así al sistema de alimentación.

### **2.1.1.2. Elementos causantes de armónicos**

A pesar de que el equipo electrónico es el principal causante de armónicos, se debe tomar en cuenta que existen otros aparatos que contribuyen a incrementar la distorsión armónica en la red.

#### **2.1.1.2.1. Dispositivos electrónicos**

La razón por la que el equipo electrónico produce armónicos en la red, es debido a su etapa de rectificación en la que se inyectan armónicos característicos definidos por la siguiente expresión:

$$n = pk \pm 1$$

Donde:

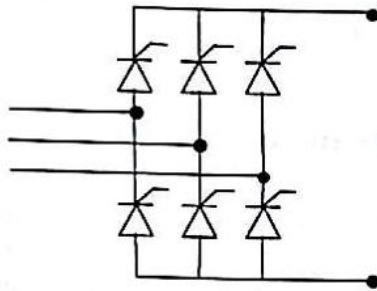
n= orden o grado del armónico

p= número de pulsos del rectificador

k= número entero cualquiera

Como ejemplo se toma un rectificador de 6 pulsos, donde el valor de “p” sería 6 y los cuatro primeros armónicos son el 5, 7, 11 y 13.

Figura 7. **Puente rectificador de 6 pulsos**



Fuente: FUSTER, Vicente. *Las perturbaciones eléctricas y la industria textil, origen consecuencias y soluciones*. p. 190.

Los armónicos característicos son todos los armónicos impares exceptuando los múltiplos de 3 para cargas trifásicas no lineales y todos los armónicos impares para cargas monofásicas no lineales. La presencia de armónicos no característicos se debe, principalmente, a la existencia de semiconductores dañados en el equipo eléctrico que los inyecta.

Cabe destacar que los variadores para motores de corriente continua y los convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna cuentan como equipo electrónico y son fuentes significativas de armónicos.

Dependiendo de la industria textil que se estudie, existen varios equipos haciendo uso de convertidores de frecuencia en todas las etapas, debido a la cantidad de motores existentes en la línea de producción. Entre las incidencias más destacables que producen los convertidores de frecuencia, se encuentran:

- Calentamiento de cables y conductores.
- Pérdidas adicionales en transformadores.



- Repercusión en el par y calentamiento de motores de inducción.
- Posible frecuencia de resonancia con la propia red de alimentación, el transformador de entrada y la batería de condensadores para compensar el factor de potencia.
- Efecto en los conductores neutros.
- Repercusión en otros equipos.

#### **2.1.1.2.2. Lámparas fluorescentes**

Las lámparas fluorescentes son de descarga, debido a que requieren de un balastro para proveer un voltaje inicial para comenzar la descarga por la corriente eléctrica para fluir entre dos electrodos entre el tubo fluorescente. Luego de que la descarga se establece, el voltaje disminuye mientras que la corriente de arco incrementa. Un balastro es un dispositivo que limita la corriente a un nivel para mantener la salida de lúmenes especificada.

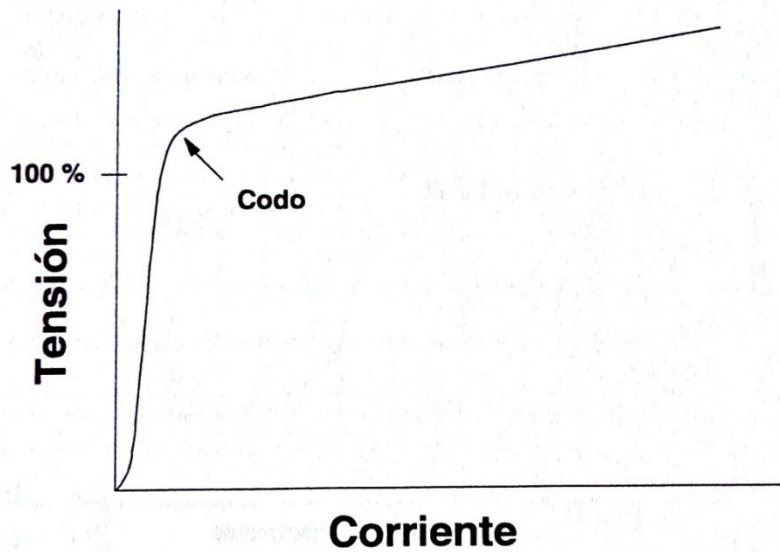
Existen dos tipos de balastos: balastro magnético y electrónico. El balastro electrónico resulta ser más eficiente debido a que tiene menos pérdidas por efecto *Joule*. Un balastro electrónico puede producir una distorsión armónica de entre 10 al 32 %, por lo que algunos balastos modernos incluyen un filtro para mantener la distorsión armónica en niveles no mayores al 20 %.

#### **2.1.1.2.3. Equipos saturados magnéticamente**

Todo equipo que funciona con un núcleo de hierro, como los transformadores y motores, genera armónicos debido a la característica no lineal de la magnetización del hierro. Debido a que estas máquinas eléctricas se diseñan para trabajar, en condiciones normales, con inducción magnética cerca

del codo de saturación, ocasionando deformaciones en la corriente al haber una tensión elevada en la instalación.

Figura 8. **Curva característica de saturación**



Fuente: FUSTER, Vicente. *Las perturbaciones eléctricas y la industria textil, origen consecuencias y soluciones*. p. 198.

Los motores eléctricos presentan alguna distorsión cuando están sobreexcitados, aunque generalmente esto no tiene consecuencias. Sin embargo, existen motores monofásicos de potencia inferior a 1 kW, que tienen una forma de onda de corriente casi triangular con un contenido significativo del tercer armónico.

#### **2.1.1.2.4. Hornos y equipo de soldadura por arco eléctrico**

Son equipos que no se encuentran habitualmente en la industria textil, pero son fuente importante de armónicos y *flicker*, tal como se muestra en el apartado 2.1.2.1.1.

#### **2.1.1.3. Métodos para mitigación de armónicos**

Actualmente existen diversos métodos para reducir los armónicos en la industria, dependiendo del grado de distorsión que se haya medido al momento de la realización de un estudio de calidad de energía eléctrica. A continuación se exponen medidas por adoptar y métodos para la mitigación de armónicos.

##### **2.1.1.3.1. Sobredimensionado de equipos**

Este método se utiliza no para modificar la distorsión armónica de la red, sino para disminuir los efectos puntuales que pueden producir las corrientes armónicas, por sobrecalentamiento en algunas partes del sistema de alimentación o en algunos equipos de la planta.

##### **2.1.1.3.2. Transformadores**

En el mercado existen transformadores especializados para trabajar con armónicos con un factor K. El cual determina la potencia necesaria para alimentar a la instalación incluyendo a las cargas no lineales.

El transformador de factor K es fabricado con un galvánico entre primario y secundario, con blindaje electroestático. Lo cual ayuda a la protección de los armónicos de corriente que provocan pérdidas y sobrecalentamiento entre sus bobinados, sin exceder su temperatura de funcionamiento. Está diseñado para soportar una carga adicional causada por los altos niveles de distorsión armónica existentes en la instalación, que son generados por cargas tales como: hornos de inducción, variadores de velocidad de motores, rectificadores, inversores, sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI), entre otros.

#### **2.1.1.3.3. Capacitores**

La existencia de una distorsión armónica cerca del límite superior se traduce en sobrecalentamiento y en una mayor fatiga del dieléctrico en los condensadores de compensación. Al no haber resonancia con la instalación eléctrica, se puede considerar el sobredimensionamiento de los capacitores, en tensión y en corriente.

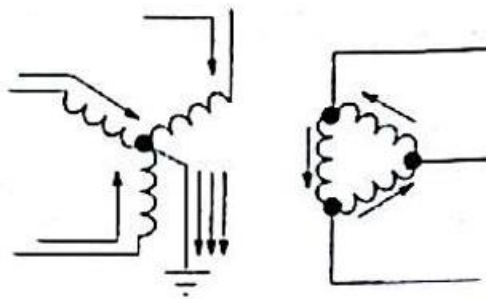
Los fabricantes de bancos de capacitores para compensación de potencia reactiva, proporcionan elementos especiales que pueden admitir sobretensiones de hasta un 110 % y sobrecorrientes de hasta 130 %, con relación a los valores nominales.

#### **2.1.1.3.4. Conductores**

Para alimentaciones trifásicas de cuatro hilos, con presencia de armónicos múltiplos de tres, se recomienda utilizar un conductor neutro de mayor calibre, pudiendo en algunos casos duplicar la sección de los conductores de fase, para soportar mejor las corrientes circulantes, ya que la suma estas corrientes tiende

a sumarse y regresar por el neutro, provocando un sobrecalentamiento en el conductor.

Figura 9. **Circulación de corrientes del tercer armónico en transformador con conexión estrella - delta**



Fuente: FUSTER, Vicente. *Las perturbaciones eléctricas y la industria textil, origen consecuencias y soluciones*. p. 222.

En un sistema balanceado, la suma de los vectores de las corrientes de armónicos múltiplos de tres, es debido a que estos son de secuencia cero, lo cual quiere decir que no tienen desfase entre las mismas.

Los armónicos de orden 5, 11, 17 en adelante, son generalmente de secuencia negativa, lo cual indica que estos, al observarse en un diagrama fasorial, giran en sentido opuesto a las corrientes de la fuente de alimentación.

Los armónicos de orden 1, 7, 13, en adelante, son de secuencia positiva, girando en sentido de las corrientes de la fuente de alimentación en un diagrama fasorial.

#### **2.1.1.3.5. Motores**

Un método por considerar es amortiguar el efecto de la distorsión armónica existente por medio del aumento de la potencia de la máquina. Se debe tomar en cuenta que la solución implica trabajar con un rendimiento y un factor de potencia más bajos, lo que equivale a un mayor consumo de potencia activa para una determinada potencia útil y a una mayor necesidad de energía reactiva provocando mayor uso del banco de capacitores. Se debe evaluar la inversión de adquirir un equipo especializado para amortiguar armónicos, comparado a los costos mensuales por el incremento en el consumo de corriente al utilizar el método mencionado.

#### **2.1.1.3.6. Reducción de armónicos en las cargas**

Entre los métodos más utilizados para la reducción de los niveles de distorsión armónica se encuentran el uso de bobinas de choque, las cuales se instalan en cada una de las fases en serie con la alimentación del equipo que se desea amortiguar la distorsión de corriente.

La cancelación de corrientes armónicas se puede considerar al conectar varios equipos con diferentes tipos de distorsiones armónicas, produciendo un efecto de cancelación de algunos armónicos para disminuir la distorsión total. Tomando como ejemplo, la conexión, en el mismo punto de la red, de variadores de velocidad de motores de continua, poniéndolos a trabajar con distintos ángulos de encendido.

Para una efectiva reducción de armónicos en la red, se debe tomar en cuenta la configuración interna de los equipos electrónicos de potencia,

revisando el nivel de distorsión armónica que el equipo introduce al momento de seleccionarlo, analizando su comportamiento durante el período de instalación y pruebas para prevenir problemas futuros de armónicos en la red.

En algunos casos se utiliza la alimentación de cargas no lineales a través de transformadores con un tipo de conexión adecuada para aislar, dentro de lo posible, la perturbación producida por las cargas.

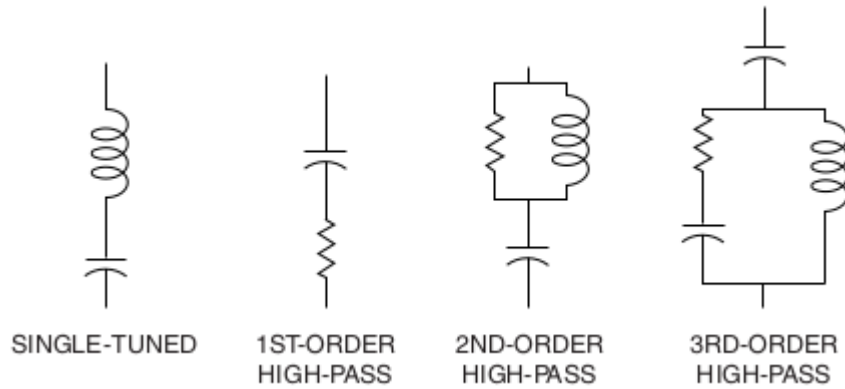
#### **2.1.1.3.7. Filtros**

Los filtros son dispositivos utilizados para eliminar determinados armónicos de corriente o amortiguar la distorsión armónica de corriente.

Los filtros pasivos están conformados por configuraciones de componentes tipo resistencia, inductancia y capacitores, conectados principalmente en paralelo. Resultan ser la opción más económica, sin embargo, tienen el inconveniente de presentar potenciales e interacciones desfavorables con el sistema.

Los filtros sintonizados son filtros pasivos utilizados para eliminar una armónica determinada. Se sintonizan a la frecuencia que se desea amortiguar y se colocan en paralelo a la carga no lineal que se encuentra perturbada. Se debe tener el cuidado de que estos filtros no entren en resonancia paralelo al igual que los bancos de capacitores.

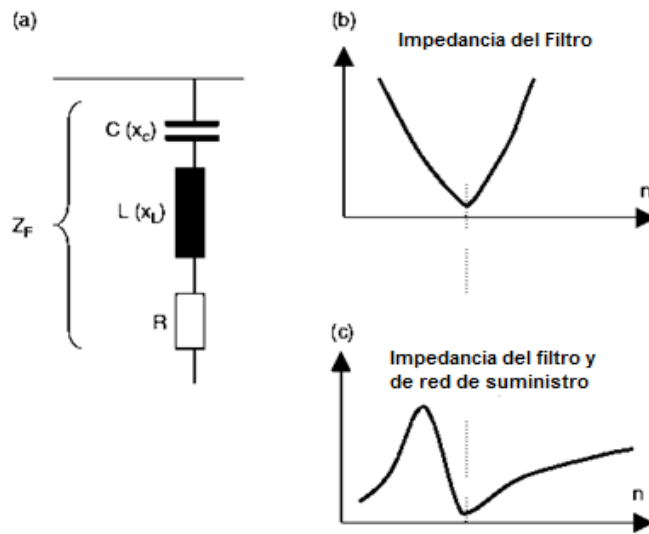
Figura 10. **Configuraciones de filtros pasivos**



Fuente: DUGAN, Roger. *Electrical Power Systems Quality*. p. 252.

Tal como se observa en la figura 11, se muestra un esquema del filtro sintonizado (a), la impedancia del filtro en función de la frecuencia (b) y la impedancia del filtro y de la red de suministro (c).

Figura 11. **Filtro armónico resonante simple**

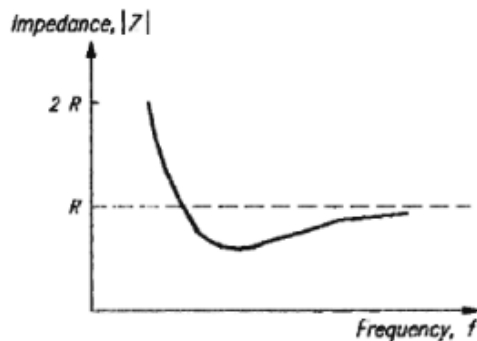


Fuente: BAGGINI, Angelo. *Handbook of Power Quality*. p. 244.



Los filtros paso alto también se comportan como una baja impedancia al igual que los sintonizados, con la diferencia que estos mitigan armónicos superiores a cierto orden. Estos se pueden combinar con filtros sintonizados a frecuencias más bajas ya que su frecuencia de corte no puede ser muy baja debido a que no son filtros ideales.

Figura 12. **Característica de frecuencia del filtro amortiguado**

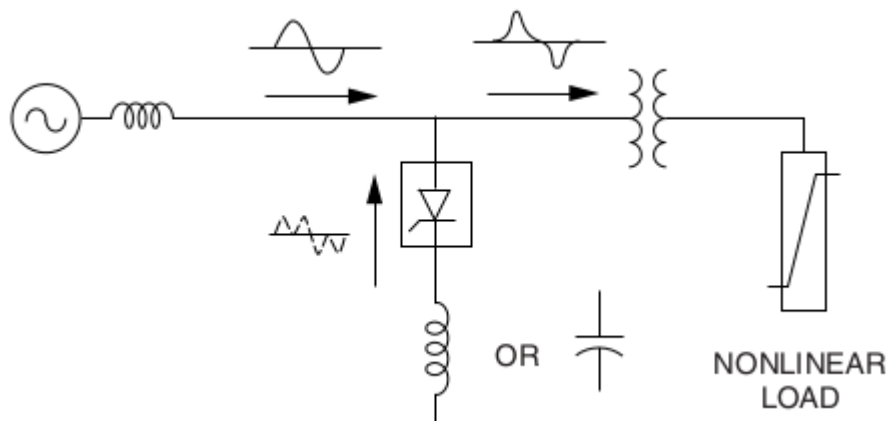


Fuente: GERS, Juan. *Teoría y diseño de filtros de armónicos en sistemas eléctricos*. p.22.

Los filtros activos utilizan la electrónica de potencia para inyectar en el sistema, de formas sincronizadas con la carga no lineal, armónicos de corriente de polaridad opuesta y de la misma amplitud a los creados por las cargas. Estos filtros tienen la ventaja de que no resuenan con el sistema, se adaptan a las condiciones de operación y también pueden emplearse para mejorar el factor de potencia de la instalación y mejorar otros problemas de calidad de onda.

Estos filtros generan corrientes o tensiones con armónicos con la misma amplitud, pero opuesta a los creados por las cargas no lineales. Su ancho de banda es suficiente para garantizar la eliminación de la mayoría de los componentes armónicos de la corriente de carga no lineal.

Figura 13. **Aplicación de un filtro activo en una carga no lineal**



Fuente: DUGAN, Roger. *Electrical Power Systems Quality*. p. 264.

Cuando se combinan los filtros activos con los pasivos se consigue filtrar un amplio espectro de armónicos y compensar energía reactiva, con una gran capacidad de filtrado de corriente y de forma más económica en general.

### 2.1.2. **Flicker**

Cuando la variación de fluctuación de voltaje es continua y no excede el rango de 90 % al 110 % de su valor nominal, se conoce con el nombre de parpadeo (*flicker*). Este fenómeno se percibe en los sistemas de iluminación por el ojo humano, al momento que la fluctuación del nivel de iluminación ocurre. El término *flicker* no debe ser empleado en lugar de fluctuación de tensión. Esta perturbación es causada principalmente por cargas cuyo consumo varía rápidamente a lo largo del tiempo, sin exceder el margen del 10 % de su amplitud.

### **2.1.2.1. Elementos causantes del *flicker***

Entre las cargas industriales que causan el denominado *flicker* se encuentran: el arranque de grandes motores de inducción, hornos de arco y soldadores eléctricos. En algunos casos el exceso de parpadeo puede ser un indicador de que se debe buscar conexiones flojas.

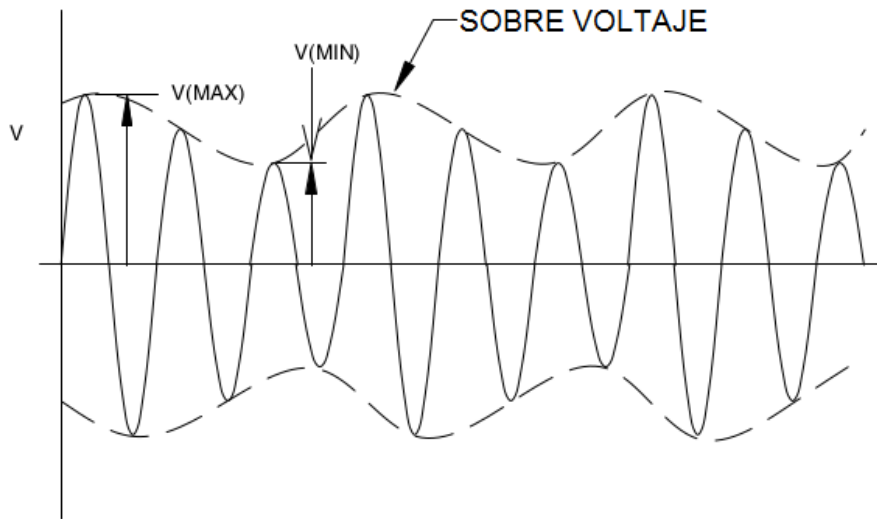
#### **2.1.2.1.1. Hornos de arco**

A pesar de que los hornos de arco no son propios de la industria textil, posiblemente es el equipo que mayor problema de *flicker* crea para la instalación eléctrica, afectando a una gran cantidad de usuarios conectados a la misma red.

A medida que la potencia del horno de arco eléctrico es mayor, más severas son las fluctuaciones de voltaje que provoca. Se recomienda tener en su instalación una parte de la red eléctrica con una elevada potencia de cortocircuito.

En un horno de arco eléctrico de corriente alterna, se crean tres arcos eléctricos entre los electrodos y la chatarra, derritiendo el metal por el calor disipado en el proceso debido al efecto julio. La duración del arco es muy variable y la corriente puede oscilar desde la condición de corto cortocircuito hasta la de un circuito abierto. Las variaciones drásticas de potencia que este equipo genera, causan grandes fluctuaciones de voltaje en el punto de conexión que contiene frecuencias que afectan al equipo conectado a la red.

Figura 14. **Tensión de alimentación representativa de un horno de arco indicando fluctuación de la tensión a la frecuencia de *flicker***



Fuente: SANKARAN, C. *Power Quality*. p. 43.

#### **2.1.2.1.2. Soldadores eléctricos**

Las máquinas de soldadura por sí mismas no afectan a la línea, al menos que su utilización sea intensiva. El funcionamiento de este equipo está basado en el efecto julio; usando el calor disipado por una circulación de corriente para unir dos piezas metálicas. Durante la operación de la soldadura, intervalos con alto flujo de corriente al soldar son acompañados por otros de operación sin carga. En cada operación de soldadura, se producen dos etapas de voltaje, uno al momento de establecer la corriente y otro al momento de la desconexión. Estas variaciones de voltaje pueden causar problemas en las cargas cercanas produciendo magnitudes de voltaje fuera del rango de las tolerancias aceptadas y pueden producir *flicker*.

#### **2.1.2.1.3. Motores**

El *flicker* es generado por los motores al momento de ponerlos a funcionar con arranques y paros frecuentes, o con cargas variables. La caída de voltaje (*dip*) se produce al momento que la demanda de corriente aumenta y se aproxima a su velocidad nominal. Por simple ley de ohm, al haber mayor demanda de corriente, la resistencia se mantiene constante y el voltaje decrece.

La caída de voltaje es mayor al momento que se arranca un motor grande y la impedancia de la fuente de alimentación es relativamente alta. En algunos casos cuando la caída de voltaje es alta, se produce el *flicker* en televisores y monitores de los ordenadores.

#### **2.1.2.1.4. Convertidores**

Los convertidores o reguladores de potencia con tiristores, al estar encendidos durante períodos enteros con tiempos de conducción muy breves, repitiéndose a una frecuencia de algunos hercios, pueden generar *flicker* o en la mayoría de los casos las llamadas muescas o *notching*.

#### **2.1.2.1.5. Bancos de capacitores**

Para estudiar el índice de severidad de parpadeo en elementos reactivos, tales como bancos de capacitores, se puede evaluar haciendo uso de la siguiente expresión:

$$d = X_s \cdot \Delta Q_i / U_N^2 * 100 \%$$

Donde:

d: porcentaje del cambio de voltaje relativo

$X_s$ : reactancia de la impedancia de la red

$U_N$ : voltaje nominal

$\Delta Q_i$ : Cambios de potencia reactiva de la carga

Cuando se trata de bancos de capacitores, generalmente se pueden producir problemas por resonancia entre el capacitor, los elementos inductivos y transitorios de sobrevoltaje debido a la conexión de los capacitores. Es solamente en algunos casos donde la conexión y desconexión de los capacitores puede presentar un *flicker* de valor notable.

#### **2.1.2.2. Otros elementos causantes del *flicker***

Entre otros elementos causantes del parpadeo que se percibe por el ojo humano se encuentran:

- Mal funcionamiento del alumbrado
- Tubos con balastro magnético
- Tubos con balastro electrónico
- Tubos LED sin control de *flicker*

#### **2.1.2.3. Efectos del *flicker* en el equipo eléctrico**

Si las variaciones rápidas de voltaje se mantienen dentro de los límites establecidos estas no afectan el buen funcionamiento de los aparatos conectados a la red eléctrica. Se puede percibir un efecto sobre las pantallas de

los ordenadores o de los televisores. El efecto del *flicker* en orden descendente de sensibilidad se percibe en los siguientes tipos de lámparas:

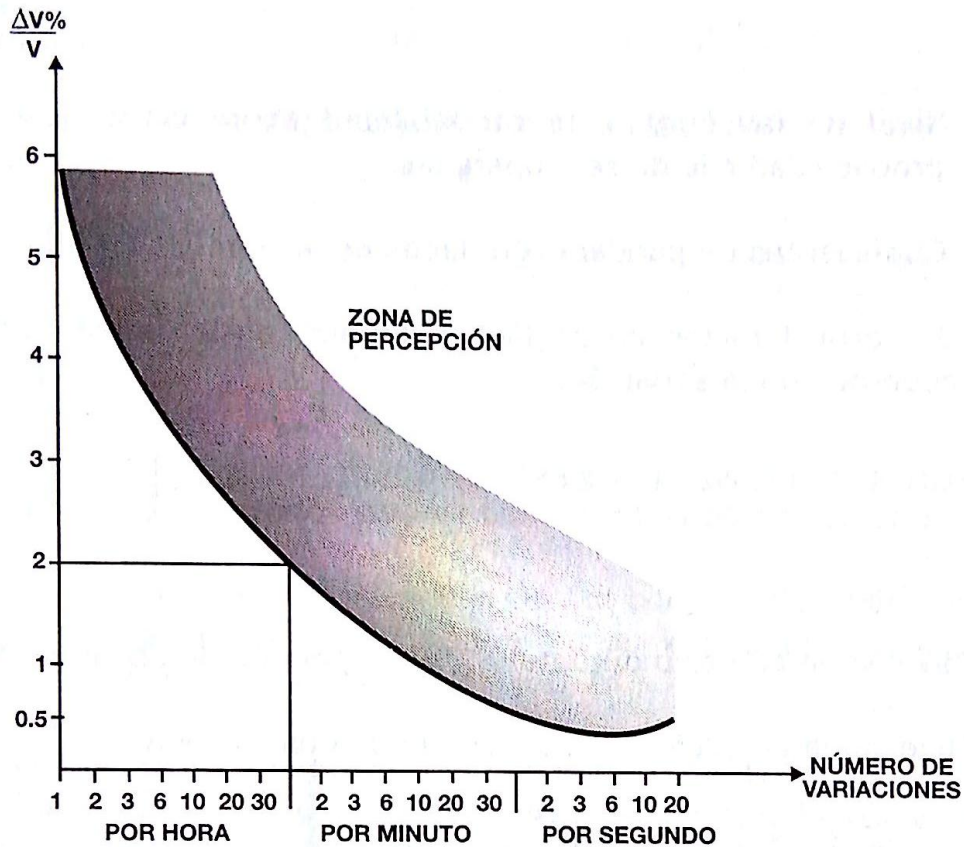
- Lámparas de vapor de mercurio
- Lámparas incandescentes
- Lámparas fluorescentes

#### **2.1.2.4. El *flicker* como sensación de molestia para el ser humano**

El *flicker* es un fenómeno estrictamente relacionado con la percepción y reacción del ser humano. Implica la combinación de dos fenómenos: la fluctuación de tensión afectando la intensidad de la iluminación y a una persona expuesta a estos cambios.

La sensación de molestia para el ser humano se puede modelar como una función del cuadrado de la amplitud de la variación de la tensión y de la duración de la molestia. El valor máximo de sensibilidad para la sensibilidad del observador medio es alrededor de 10 hercios.

Figura 15. Límite de sensibilidad del ojo a las variaciones de iluminación causadas por fluctuaciones de tensión, en lámparas incandescentes



Fuente: HARPER, Gilberto. *La calidad de la energía en los sistemas eléctricos*. p. 103.

### 2.1.2.5. Estudio del *flicker* como perturbación

Entre los factores que influyen en la medición y cuantificación del *flicker* están los factores técnicos, fisiológicos y psicológicos. Por lo cual, de acuerdo con estudios de varios países, se distinguen las siguientes etapas para estudiar el *flicker*:



- El análisis experimental de la molestia notada por el hombre cuando es sometido a un *flicker* debido a las fluctuaciones de tensión.
- Cuantificación del *flicker* y la definición de las unidades de medida: *flicker* instantáneo y dosis de *flicker*.
- Desarrollo del “flickermetro” o aparato de medida del *flicker*.
- Análisis estadístico de las mediciones.
- Introducción a los parámetros que definen la molestia del *flicker*: Indicador de *flicker* de corto plazo (Pst) e indicador de *flicker* de largo plazo (Plt).
- 

#### **2.1.2.6. Métodos para corrección del *flicker***

Debido a que el *flicker* es causado por fluctuaciones de voltaje, su mitigación debe ser orientada a la reducción o control. El primer caso que debe considerarse es: revisar que el sistema de alumbrado sea adecuado, ya que algunas fuentes luminosas son sensibles al *flicker*.

Luego se puede aplicar dos criterios

- Disminuir las variaciones de potencia reactiva del equipo.
- Modificar la red, al incrementar el nivel de potencia de cortocircuito.

#### **2.1.2.7. Equipo para disminuir las fluctuaciones de voltaje y *flicker***

Actualmente, debido al creciente desarrollo en los dispositivos eléctricos, existen algunas soluciones más costosas, pero efectivas que ayudan a disminuir el *flicker* y las fluctuaciones de tensión en la red. Dependiendo del

fabricante, algunas opciones ofrecen algunas características adicionales, sin embargo, su principio de funcionamiento debería ser el mismo.

#### **2.1.2.7.1. Compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC)**

Es un equipo flexible que funciona con electrónica de potencia y puede ayudar no solo a reducir el *flicker* sino funciona también como corrector del factor de potencia, control de voltaje en estado estacionario (*steady-state voltage control*) y como filtro para algunas frecuencias indeseables del sistema.

Los SVC son dispositivos derivados de la familia del sistema flexible de transmisión de corriente alterna o por sus siglas en inglés FACTS, que sirven para controlar el flujo de potencia reactiva. El término estático es utilizado para diferenciar a los SVC de los compensadores rotativos de potencia reactiva.

A pesar de que los SVC son utilizados mayormente para la compensación de *flicker* en instalaciones eléctricas donde se tiene hornos de arco conectados, no dejan de ser importantes para el estudio de corrección de *flicker* en la industria textil.

#### **2.1.2.7.2. Convertidores de fuente de tensión VSC**

Es un dispositivo que funciona con electrónica de potencia, basado en un inversor que obtiene un voltaje alterno a cualquier frecuencia, magnitud y ángulo de fase, de un bus de voltaje directo. Al regular la salida del inversor, la potencia reactiva inyectada al sistema o la absorbida por la misma puede ser controlada y de esta manera las variaciones de potencia reactiva del

compensador de carga del sistema se mantienen lo más bajo posible, mitigando las fluctuaciones de voltaje.

La compensación de la potencia con estos dispositivos es de mayor precisión, debido a que la frecuencia de conmutación no está definida por la frecuencia del sistema. Como en el caso de los SVC, se pueden utilizar frecuencias de conmutación más altas y con menos retraso, permitiendo también compensar las armónicas introducidas por la carga.

Como toda tecnología de punta, estos equipos son complejos y de costos elevados, debido a que requieren semiconductores que sean capaces de soportar altos valores de corriente y alta frecuencia de conmutación al mismo tiempo.

#### **2.1.2.8. Otras formas de mitigar el *flicker***

En algunos casos, es útil considerar las siguientes estrategias para reducir los niveles de *flicker* en la red:

- Por medio de transformadores de aislamiento, separar del resto de la red, las cargas que fluctúan; especialmente de la fuente que alimenta la instalación de la iluminación.
- Si las cargas que fluctúan son monofásicas, se puede conectar las cargas a una fase y alimentar el sistema de iluminación de las fases no perturbadas.
- En algunos casos es posible operar las cargas perturbadas en el momento que no molesten al personal cercano. En este caso, el *flicker*

no puede ser evitado, pero será producido en momentos que no moleste a las personas cercanas.

- En algunos casos, los cambios en el diseño del equipo pueden ayudar a reducir las fluctuaciones de voltaje.
- En los casos en los que las variaciones de voltaje son producidas por el arranque de motores, todas las mediciones enfocadas en corregir la corriente de arranque puede ser útil para reducir las variaciones de voltaje que causan el *flicker*.
- Una práctica no muy utilizada, podría ser suplir las cargas fluctuantes por medio de una fuente desacoplada, por ejemplo, una fuente eléctrica que funcione con diésel.

### **2.1.3. Factor de potencia**

El factor de potencia es una perturbación de la calidad de energía eléctrica debido a que el bajo factor de potencia puede causar fallas en el equipo, así como penalizaciones por parte del proveedor de energía eléctrica, según lo expuesto en las normas técnicas.

Un alto factor de potencia indica el uso óptimo de la energía en un establecimiento; indica qué tan efectivamente la potencia está siendo transferida de la fuente a la carga. Este puede llegar a ser del 100 % únicamente en la teoría, en la práctica no se logra, debido a que todos los circuitos eléctricos tienen una inductancia y capacitancia, provocando una demanda de potencia reactiva y, por ende, una alteración en el factor de potencia.

En un transformador es la potencia reactiva la que crea un campo magnético en el núcleo para permitir la transferencia de potencia del devanado primario al devanado secundario.

El uso de motores dentro de la industria disminuye el factor de potencia debido a que esta crea un campo magnético en el motor para producir un torque y consecuentemente, mayor consumo de corriente. Al haber una cantidad considerable de motores se debe considerar la instalación de un banco de capacitores para compensar el factor de potencia y disminuir la demanda de corriente, según sea la violación de los límites establecidos en las normas.

La figura 17 muestra la relación de la potencia activa con la reactiva, de la cual se puede obtener la expresión para la potencia aparente:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

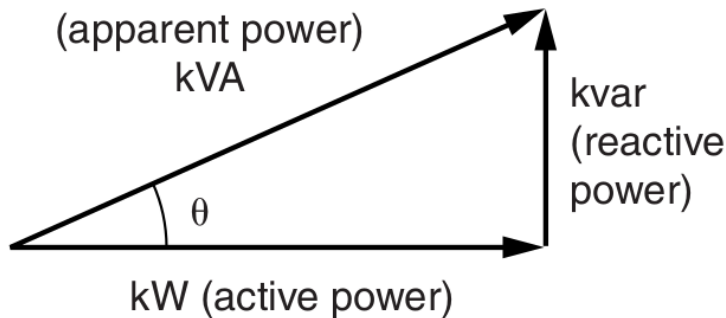
Donde:

- S = potencia aparente
- P = potencia activa
- Q = potencia reactiva
- $\emptyset$  = es el ángulo del factor de potencia

Notando que:

$$P = S \cos\emptyset$$
$$Q = S \sin\emptyset$$
$$Q/P = \tan\emptyset$$

Figura 16. **Triángulo de potencia y la relación entre potencia activa, reactiva y potencia aparente**



Fuente: DUGAN, Roger. *Electrical Power Systems Quality*. p. 311.

La figura 17 ejemplifica el desplazamiento fasorial de las cargas mayormente capacitivas y mayormente inductivas. El fasor de  $\pm 90$  es un límite teórico de cargas inductivas y capacitivas con resistencia cero, una situación que no sucede en la práctica. Se debe notar que al haber una carga mayormente inductiva existe un atraso de la corriente con respecto al voltaje; al haber una carga mayormente capacitiva, la corriente se adelanta al voltaje, haciendo que el valor de factor de potencia sea mayor a 1 o negativo para el equipo medidor de calidad de energía eléctrica.



Los bancos de capacitores son esenciales para la operación económica de sistemas que incluyen cargas resistivas-inductivas. Tomando en cuenta el aumento de las cargas no lineales surgen algunos problemas debido al uso de los bancos de capacitores:

- Sobrecarga de corriente en los capacitores.
- Resonancia en paralelo entre las capacitancias con las inductancias cercanas.

Algunas ventajas de la corrección del factor de potencia son:

- Reducción de calor en el equipo
- Incremento de la vida útil del equipo
- Reducción de pérdidas de energía y costos operativos
- Liberación de energía disponible
- Reducción de la caída de voltaje en el sistema eléctrico

La forma en que teóricamente se calcula la corrección del factor de potencia es resolver el triángulo de la figura 18, para el cual se necesitan tres datos:

- Factor de potencia existente ( $\cos\theta_1$ ).
- Factor de potencia corregido ( $\cos\theta_2$ ).
- Cualquiera de los siguientes datos: potencia activa (P), potencia reactiva (Q) o potencia aparente (S).

Cuando se tiene P,  $\cos\theta_1$  y  $\cos\theta_2$ , se utiliza:

$$\Delta Q = P (\tan\theta_1 - \tan\theta_2)$$



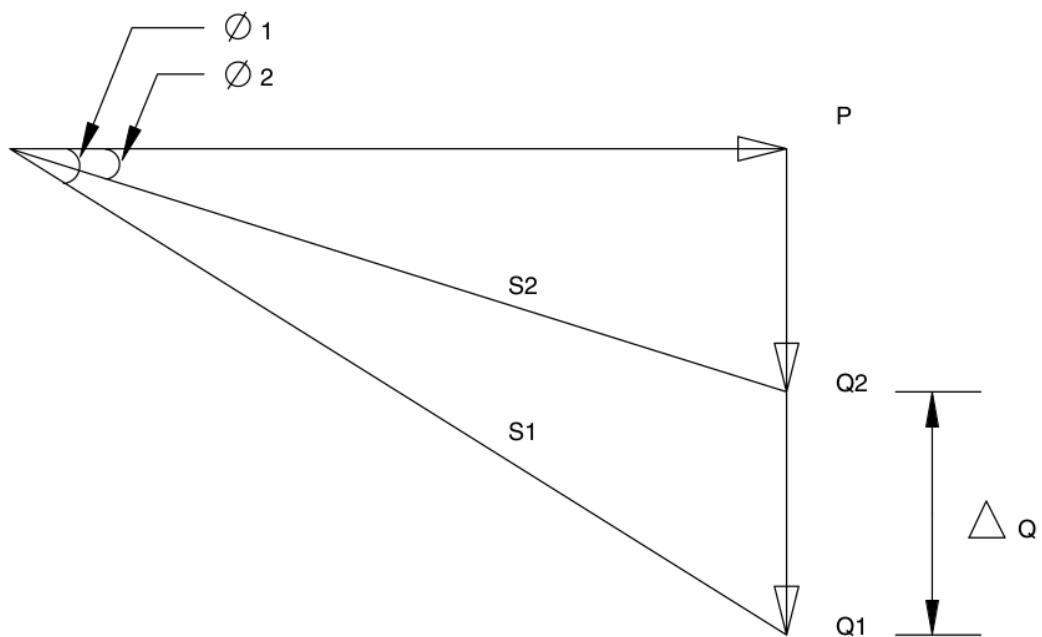
Cuando se tiene S,  $\cos\phi_1$  y  $\cos\phi_2$ :

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2$$

O cuando se tiene Q1,  $\cos\phi_1$  y  $\cos\phi_2$ :

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2$$

Figura 18. **Triángulo general de corrección de factor de potencia**



Fuente: SANKARAN, C. *Power Quality*. p. 144.

### **2.1.3.2. Compensación centralizada o descentralizada**

La compensación centralizada regularmente es considerada como la más económica, debido a que la unidad central es más barata que distribuir el mismo grado de compensación en pequeñas unidades dispersas. La capacidad de compensación instalada puede ser más baja debido a que se puede asumir que no toda carga que consume potencia reactiva va a estar activa simultáneamente. Sin embargo, debe recordarse que las corrientes reactivas causan verdaderas pérdidas dentro de la instalación; la caída de voltaje en un elemento resistivo, como un cable, está en fase con la corriente, así que el producto, la pérdida de potencia, es siempre positiva.

La compensación centralizada no hace nada por reducir estas pérdidas, esta simplemente reduce el factor de potencia impuesto por la instalación. Por otra parte, cuando la compensación es descentralizada, el valor total de las unidades individuales es mayor que el costo de una única unidad centralizada y el total de la capacidad instalada de compensación es usualmente mayor; cada dispositivo tiene compensación, estando o no en uso. Las pérdidas se reducen debido a que el flujo de la corriente reactiva es únicamente entre la compensación y el equipo, en lugar que ir de regreso al compensador centralizado en el punto de acople común.

Aparte de la eficiencia, existen argumentos técnicos a favor y en contra de la compensación centralizada. Por ejemplo, si la carga agregada en un transformador es capacitiva, la salida de voltaje sube sobre la nominal. Este efecto a veces es utilizado para compensar la caída de voltaje en un transformador con mucha carga. La carga es simplemente sobre-compensada

de manera que la carga total resulta ser capacitiva para el transformador, por lo que se reduce la caída de voltaje inductiva en el transformador.

En casos en donde una gran carga se conmuta frecuentemente, causando un problema de *flicker*, esta puede ser una solución más robusta y confiable que los compensadores electrónicos de *flicker* y también puede ser considerablemente más rentable en situaciones donde se necesitaría un grado de compensación en cualquier momento.

Sin embargo, en términos generales, el sobre voltaje de un transformador bajo carga capacitiva es un riesgo que puede ser evitado o debería de ser tratado adecuadamente, por ejemplo, usando un rango de voltaje ligeramente más alto que el rango de voltaje nominal (casi igual a 6 %).

En algunos casos es necesario o deseable aplicar compensación del lado de medio voltaje y es considerado conectar capacitores de bajo voltaje por medio de un transformador de medio voltaje/bajo voltaje, en lugar de pagar un alto precio por capacitores de medio voltaje. En ese caso, la carga del transformador es capacitiva y el voltaje de salida es más alto de lo esperado.

Lo anterior puede ser tratado con una adecuada selección de componentes con un rango de voltaje adecuado o mediante la selección de la relación de transformación, por el uso de derivaciones, para normalizar la misma. Lo segundo es preferible debido a que esto evita hacer funcionar el transformador en un estado de sobreexcitación con pérdidas consecuentemente mayores. La idea puede resultar ser un falso ahorro, debido a que a pesar de que el costo de la instalación se reduce, los costos de operación se incrementan.

La corriente reactiva en la instalación se transforma dos veces, de la instalación de bajo voltaje al sistema de alto voltaje y del sistema de medio voltaje al capacitor de bajo voltaje, con dos pérdidas de carga que tendrán que ser pagados por el cliente.

Las otras desventajas de potencia reactiva, la demanda de capacidad de transmisión y caída de voltaje, también ocurren dentro de la planta en cualquier línea y en cualquier transformador entre la carga inductiva y el compensador. Es preferible gastar el 100 % del presupuesto en 100 % de la utilización que el 75 % del presupuesto en únicamente 50 % de la utilización.

En un diseño de descentralización, incluso pequeñas cargas resistivas-inductivas deben ser compensadas integrando un capacitor en ellas. Esto se ha realizado exitosamente, frecuentemente como compensación en serie. Por ejemplo, en luminarias con una o dos lámparas fluorescentes y balastos magnéticos, donde uno de cada dos circuitos de lámparas y balastos queda sin compensación y el otro queda sobre compensado por medio de un condensador en serie, dimensionado de tal manera que consuma precisamente la misma amplitud de corriente que la rama no compensada, pero con el ángulo de fase inversa.

Sin embargo, la descentralización tiene sus límites en situaciones donde una máquina de inducción asíncrona es individualmente compensada a nivel local. Si el capacitor está localizado antes del interruptor del motor, entonces puede permanecer conectado fácilmente cuando el motor está apagado, dejando al sistema sobre compensado.

Si el capacitor está localizado después del interruptor del motor, permitiendo que se desconecte desde el motor, puede existir un riesgo de

autoexcitación a medida que estese desacelera. El voltaje se genera a pesar de que el dispositivo ha sido aislado de la fuente, incluso ocurre sobrevoltaje en el caso que el capacitor no esté dimensionado correctamente.

En este punto puede ser evidente que la potencia reactiva no siempre es indeseable. Más bien, la cantidad adecuada de potencia reactiva necesita ser generada para compensar la potencia reactiva inductiva, y, en casos donde las cargas óhmicas capacitivas prevalecen y viceversa.

La potencia reactiva capacitiva es también muy ventajosa y reductora de pérdidas, por ejemplo, para generadores excitados tales como turbinas de viento y plantas de cogeneración si están conectadas directamente al sistema sin un inversor. Incluso se convierte en una necesidad absoluta en situaciones en las que se supone que tales generadores alimentan a una red aislada, de lo contrario no hay excitación, no hay voltaje y no hay suministro, incluso mientras la máquina está funcionando.

#### **2.1.4. Analizador de calidad de energía eléctrica**

El analizador de calidad de energía Dranetz PowerGuide 4400 es un equipo de fabricación estadounidense, de fácil instalación, con pantalla táctil a color, provee detección automática de la configuración de los circuitos, ocho canales independientes para mediciones trifásicas de hasta 660 V. Ofrece la posibilidad de tomar mediciones en tiempo real, recolecta información de 256 muestras por ciclo y por canal, y permite la comunicación remota por medio de conector RS-232 o USB.

### 2.1.4.1. Características principales

Según el manual del usuario que el equipo provee, se detallan las siguientes características importantes, según la Tabla VI.

Tabla VI. **Especificaciones técnicas del equipo Dranetz 4400, PowerXplorer**

Especificaciones	Detalle
Parámetros de medición	(4) entradas diferenciales, 1-600V rms, AC/DC, porcentaje precisión de lectura: 0,1%, 256 muestras/ciclo, convertidor de análogo a digital de 16 bit (4) entradas con CTs 0.1-3000A rms, AC/DC, 256 muestras/ciclo, porcentaje de lectura de 0.1%, CTs, convertidor de análogo a digital de 16 bit Rango de frecuencia, resolución de 10mHz, 45-65 Hz
Distorsión/potencia /energía	W, VA, VAR, TPF, DPF, demanda, energía Armónicos/Interarmónicos de acuerdo a la norma IEC 1000-4-7 THD/espectro armónico (V, I, W) hasta la No. 63 <i>Flicker</i> de acuerdo con la norma IEC 1000-4-15 (Pst, Plt, <i>Sliding</i> Plt)
Modos de conformidad con las normas	IEEE 1159 IEC 61000-4-30 EN50160
Modos de monitoreo	Corriente de arranque/ energización Registro de fallas Calidad de servicio(basado en la norma EN50160) Monitoreo a largo plazo Registro continuo de datos de demanda y energía

Continuación de la tabla VI.

Especificaciones generales	Tamaño (alto x ancho x profundidad): 12" x 2,5" x 8" (30cm x 6,4cm x 20,3 cm) Peso: 3,8 libras(1,8 kg) Temperatura de operación: 0 -50 (32 a 122 ) Humedad: 10 a 90% sin condensación Pantalla: pantalla táctil LCD, a color Tarjeta compacta de memoria <i>flash</i> de 32Mb-128Mb extraíble
----------------------------	--

Fuente: elaboración propia.





### **3. NORMAS TÉCNICAS DEL SERVICIO DE DISTRIBUCIÓN**

Las normas técnicas del servicio de distribución son elaboradas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, debido a que una de sus funciones principales es emitir las normas técnicas relativas al subsector eléctrico y fiscalizar su cumplimiento en congruencia con prácticas internacionales aceptadas, de conformidad con lo establecido en el Artículo 78, inciso b, del Acuerdo Gubernativo 256-97 en el Reglamento de la Ley General de Electricidad.

Considerando que el servicio eléctrico de distribución debe prestarse con calidad y continuidad a la población, sin distorsiones que menoscaben la calidad del servicio al usuario final, se deben actualizar las normas de calidad que han de exigirse para cumplir con estos requerimientos.

Debido a que el presente documento trata sobre el estudio realizado del área del usuario se desarrollan los siguientes apartados concernientes al lado de utilización de los servicios eléctricos de las normas técnicas del servicio de distribución.

#### **3.1. Objetivo, alcance de las normas**

En el artículo No.2 de estas normas es establecer obligaciones y derechos para los usuarios, así como los índices para calificar la calidad con que se proveen los servicios en el punto de entrega y en el punto de utilización de los servicios eléctricos de distribución, tolerancias permisibles, métodos de control,

indemnizaciones, sanciones y/o multas, de acuerdo con los parámetros para la distorsión armónica, *flicker* y factor de potencia.

### **3.2. Sistemas de control de los usuarios**

A continuación se describe lo estipulado en los artículos No.10 y No.11 de las normas.

#### **3.2.1. Sistema de control e identificación**

Correspondiente al artículo No.10 de las normas, se establece que el distribuidor debe contar como mínimo con una plena identificación del usuario, con la información del tipo de servicio contratado y de su correspondiente estructura tarifaria. Asimismo, con la identificación de los componentes de la red que se encuentren dentro de los límites de las propias instalaciones de cada usuario; la adecuación y actualización de los sistemas informáticos existentes respecto de las exigencias especificadas por estas normas; la implementación y utilización de mecanismos de transferencia de información requeridos por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica; y las pruebas pertinentes que permitan realizar auditorías del funcionamiento del sistema.

#### **3.2.2. Control de solicitudes y reclamos del usuario**

En el artículo No.11 de las normas se establece que todo distribuidor debe contar con un sistema que permita la recepción y trámite de nuevas solicitudes para la prestación del servicio eléctrico de distribución, así como reclamos o quejas de los usuarios de forma personal por cualquier medio de comunicación disponible, las veinticuatro horas del día, todos los días.

Gracias a lo anterior, el usuario puede dar seguimiento a su caso con un número o código del reclamo o queja; enterarse de la adecuación y actualización de los sistemas informáticos existentes respecto de las exigencias especificadas por las normas; la realización de procedimientos y/o mecanismos necesarios para la recopilación de la información, y transferencia de información requerida por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, así como las pruebas pertinentes que permitan realizar auditorías del funcionamiento del sistema.

### **3.3. Obligaciones de los usuarios**

En el artículo No.13 de las normas se dictan las cinco obligaciones de los usuarios, las cuales detallan el cumplimiento de la Ley General de Electricidad, su Reglamento y las normas que emite la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, así como el pago a la comisión de las multas y/o sanciones que esta le imponga, en un plazo comprendido entre los primeros siete días del mes siguiente a la notificación respectiva. Además, el pago al distribuidor de las indemnizaciones que correspondan, en la facturación inmediatamente posterior al período de control, por incumplir la calidad del servicio de energía eléctrica, de conformidad con las normas.

### **3.4. Incidencia del usuario en la calidad del producto**

Según la norma, este apartado correspondiente al título V, artículos 41 al 49, en los cuales se establecen los parámetros por tomar en cuenta, generados en el lado del usuario, los cuales son:

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

### 3.4.1. Distorsión armónica de la corriente generada por el usuario

Según el artículo 41 de las normas, el índice de calidad de la distorsión armónica de la corriente de carga se obtiene de la medición en el punto de conexión. Para tensiones mayores de 1 kV y potencias de carga mayores de 10 kW, se utiliza:

$$DATI = \sqrt{\frac{\sum I_i^2}{I_1^2}} * 100$$
$$DAII = \frac{I_i}{I_1} * 100$$

Donde:

- DATI: distorsión armónica total de la corriente.
- DAII: distorsión armónica individual de la corriente.
- $I_i$ : Componente de la Intensidad de corriente de la armónica de orden  $i$ .
- $I_1$ : Componente de la intensidad de corriente de la frecuencia fundamental (60 Hz).

Para tensiones menores de 1 kV y potencias de carga menores de 10 kW, se utiliza:

$$\Delta I_i = (I_i \text{ carga} - I_i \text{ límite})$$

Donde:

- $I_i$  límite: límite de tolerancia establecida para la intensidad armónica.

### 3.4.1.1. Tolerancias para la distorsión armónica de la corriente de carga

Las tolerancias para la distorsión armónica de la corriente de carga varían según la potencia del usuario, del nivel de tensión al cual se encuentra conectado, y según el orden de la armónica. En la tabla VII se muestran las tolerancias establecidas según las normas.

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

ORDEN DE LA ARMÓNICA (n)	P ≤ 10 kW V ≤ 1 kV	P > 10 kW 1 kV < V ≤ 60 kV	P > 50 kW V > 60 kV
	INTENSIDAD ARMÓNICA MÁXIMA (AMP)	DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL DE CORRIENTE DAI (%)	
Impares no múltiplos de 3			
5	2,28	12,0	6,0
7	1,54	8,5	5,1
11	0,66	4,3	2,9
13	0,42	3,0	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
Impares múltiplos de 3			
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

Continuación de la tabla VII.

>21	4,5/n	0,3	0,4
Pares			
2	2,16	10,0	10,0
4	0,86	2,5	3,8
6	0,60	1,0	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
Distorsión Armónica Total de Corriente DATI, en %	–	20	12

Fuente: CNEE. *Normas Técnicas del Servicio de Distribución*. p.26.

### 3.4.1.2. Control para la distorsión armónica de la corriente de carga

Si para un lapso mayor al cinco por ciento del empleado en las mediciones del período de medición, las mediciones muestran que la distorsión armónica de la corriente de carga ha excedido el rango de tolerancias establecidas, se considerará que la calidad de la energía eléctrica es baja.

Los distribuidores tienen como responsabilidad el control de la generación de armónicas por los usuarios, así como también el desarrollo de las acciones necesarias para que se solucione el problema, realizando mediciones en los puntos que considere necesarios.

### 3.4.1.3. Indemnización por sobrepasar la distorsión armónica en la corriente de carga

La indemnización por pagar por exceder las tolerancias establecidas de distorsión armónica de la corriente de carga será en función de la llamada distorsión penalizable individual de armónicas (DPIAk); es una expresión que muestra el registro de la distorsión armónica de la corriente de carga en cada intervalo de medición k. Se define como:

$$DPIAk = \text{Max} \left[ 0, \frac{D_{ATI(k)} - D_{ATI}}{D_{ATI}} \right] + \frac{1}{3} \sum_2^{40} \text{Max} \left[ 0, \frac{D_{AII_i(k)} - D_{AII_i}}{D_{AII_i}} \right]$$

Donde:

- $DPIAk$ : distorsión penalizable individual de armónicas para cada intervalo de medición k.
- $D_{ATI(k)}$ : es la distorsión armónica total de la corriente de carga, registrada en el intervalo de medición k, referida a la potencia contratada por el usuario.
- $D_{ATI}$ : es la tolerancia para la distorsión armónica total de la corriente de carga.
- $D_{AII_i(k)}$ : es la distorsión armónica individual de corriente de carga i, registrada en el intervalo de medición k, que introduce el usuario en la red. Las corrientes y las distorsiones medidas deben ser expresados en valores absolutos de corrientes o en valores porcentuales respecto de la intensidad de carga correspondiente con la potencia contratada por el usuario, según corresponda.
- $D_{AII_i}$ : es la tolerancia para distorsión armónica individual de la corriente de carga i.

Basado en el caso anterior, en cada intervalo (k) en donde se verifique un valor de DPIA mayor que cero, se utiliza el siguiente criterio para la valorización de la energía consumida en condiciones inadecuadas (Q/kWh) y con esto se hace el cálculo de la indemnización,

$$\begin{array}{lll} 0 < DPIA_k \leq 1 & CENS * DPIA_k^2 & Q/kWh \\ 1 > DPIA_k & CENS & Q/kWh \end{array}$$

Por lo tanto, la indemnización se determina como:

$$Indemnización (Q) = \sum_{k:DPIA \leq 1} CENS (DPIA_k)^2 * E(k) + \sum_{k:DPIA > 1} CENS * E(k)$$

### 3.4.2. **Flicker** generado por el usuario

Para evaluar esta perturbación se utilizan varias definiciones en la norma IEC 1000-3-3, de las cuales destacan las siguientes dos:

#### 3.4.2.1. **Indicador de flicker de corto plazo (Pst)**

Indica la severidad del flicker evaluada en un corto período (del orden de minutos, 10 minutos según la norma). El nivel Pst=1 es considerado el nivel habitual de irritabilidad.

#### 3.4.2.2. **Indicador de flicker de largo plazo (Plt)**

Es el indicador de la severidad del flicker en un período largo de observación, de dos horas, utilizando valores sucesivos de Pst. Este valor no debe exceder el límite de 0,65.



Los valores anteriores de las unidades de medida del *flicker* no tienen dimensiones. Para efectos de las normas técnicas del servicio de distribución, el índice de flicker generado por el usuario se medirá de acuerdo al Índice de severidad de *flicker* de corto plazo (Pst) medido sobre la impedancia de referencia con valor de  $Z_{ph}=0.24+j0.15$  ohm, fijada por la norma IEC 1000-3-3.

La impedancia de referencia de neutro  $Z_n= 0.16+j0,10$  ohm se utilizará en los casos donde el usuario tenga alimentación monofásica para el establecimiento.

Tabla VIII. **Tolerancias para el *flicker* generado por el usuario**

Carga (SI) kW	Pst
Tensión ( $\leq 1$ kV)	
$SI \leq 20$	1,00
$20 < SI \leq 30$	1,26
$30 < SI \leq 50$	1,58
$SI > 50$	1,86
Tensión: ( $1$ kV $< V \leq 230$ kV)	
$SI / S_{cc} \leq 0.005$	0,37
$0.005 < SI / S_{cc} \leq 0.02$	0,58
$0.02 < SI / S_{cc} \leq 0.04$	0,74
$SI / S_{cc} > 0.04$	0,80

Fuente: CNEE. *Normas Técnicas del Servicio de Distribución*. p.28.

Donde:

- $S_{cc}$ : capacidad de cortocircuito del sistema en el punto de medición del *Flicker* [kVA]

### 3.4.2.3. Indemnización por *flicker* generado por el usuario

En el artículo 48 se define la distorsión penalizable individual de *flicker* ( $DPIF_k$ ) como el valor de distorsión por fluctuaciones rápidas de tensión detectado en cada intervalo de medición  $k$ . Se utiliza en los casos que el usuario haya excedido las tolerancias de *flicker* establecidas en el artículo 48 de las normas.

$$DPIF_k = \text{Max} \left[ 0, \frac{P_{stm}(k) - P_{sti}}{P_{sti}} \right]$$

Donde:

- $DPIF_k$ : es la distorsión penalizable individual de *flicker*, en el intervalo de medición  $k$ .
- $P_{stm}(k)$ : es el índice de severidad de *flicker* de corto plazo, registrado en el intervalo de medición  $k$ , según la carga del usuario.
- $P_{sti}$ : es la tolerancia para el índice de severidad de *flicker* de corto plazo, según la carga del usuario.

El cálculo de la indemnización se realiza con la expresión del apartado 3.4.1.3. Empleando el mismo criterio utilizado para la distorsión armónica, sustituyendo  $DPIA_k$  por  $DPIF$ .

### 3.4.3. Factor de potencia

El factor de potencia no debe ser menor a los valores mínimos establecidos. Estos valores se determinan de acuerdo con la potencia instalada al establecimiento del usuario, conforme a la siguiente tabla:

Tabla IX. Valor mínimo para el factor de potencia

Potencia instalada	Valor mínimo
Usuarios con potencias de hasta 11 kW	0,85
Usuarios con potencias superiores a 11 kW	0,90

Fuente: CNEE. *Normas Técnicas del Servicio de Distribución*. p.30.

#### 3.4.3.1. Control para el factor de potencia

Las mediciones para el control del factor de potencia se pueden realizar ya sea en el punto de medición o en la acometida del establecimiento del usuario, en un período mínimo de siete días, tomando registros tanto de la potencia activa como de la potencia reactiva.

El factor de potencia se determinará, efectuando mediciones en un día completo, incluyendo el período horario de punta, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$F_{pot_p} = \frac{EnergAct_p}{\sqrt{(EnergAct_p^2 + EnergReact_p^2)}}$$

Donde:

- $Fpot_p$ : factor de potencia para el período horario (p).
- $EnergAct_p$ : energía activa registrada en el período de registro para el período horario (p).
- $EnergReact_p$ : energía reactiva anotada en el período de registro para el período horario (p).

#### **3.4.3.2. Indemnización por bajo factor de potencia**

La indemnización por bajo factor de potencia será incluida en el contrato entre el distribuidor y el usuario, considerando lo estipulado en los pliegos tarifarios fijados por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

## **4. ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA BASADO EN LAS NTSD**

Para realizar un estudio de calidad de energía eléctrica, se debe tomar en cuenta una planificación, esta permite ahorrar tiempo al momento de ejecutarlo y aumenta la probabilidad de éxito en la ubicación del problema.

Debido a que el estudio basado en las NTSD busca determinar si el usuario sobrepasa los parámetros establecidos en las normas, este se limitará a calcular las posibles sanciones o determinar los parámetros que puedan estar cerca del límite mostrado en los capítulos anteriores.

### **4.1. Planificación**

La planificación es el primer paso por seguir y es la clave para que el estudio tenga mayores probabilidades de éxito. Consiste de dos elementos principales: objetivos del estudio y alcance de las actividades.

#### **4.1.1. Objetivos del estudio**

Se deben plantear los objetivos principales del estudio de calidad de energía eléctrica, tal como se muestra al inicio del presente documento.

#### **4.1.2. Alcance de las actividades**

Los factores que determinan el alcance de los objetivos serán de la siguiente manera:

- El tamaño de la instalación eléctrica y la complejidad del sistema eléctrico: la instalación eléctrica presenta una planta solar de generación fotovoltaica, lo cual a simple vista no permite determinar los parámetros, tal es el caso del factor de potencia que debe ser analizado con mayor detenimiento luego del estudio, según los datos tomados por el equipo.
- La cantidad y la complejidad del equipo para ser inspeccionado: se tomarán mediciones en el tablero principal, y debido a la inspección física y visual, se podrá identificar los equipos que producen mayor impacto en la instalación eléctrica.
- La cantidad de monitores de potencia por instalar: será de uno y su colocación inicial será en el tablero principal.
- La duración del monitoreo según los límites establecidos por las NTSD:
  - Factor de potencia: el periodo de medición debe ser mayor o igual a 7 días para usuarios con potencias menor o igual a 11 kW.
  - Distorsión armónica: el parámetro se medirá cada 10 minutos durante el período de medición.
  - *Flicker*: el valor del índice de severidad del *flicker* de corto plazo (Pst) se medirá cada 10 minutos, durante el período de medición.
- El acceso a las áreas y/o equipos restringidos: en este caso el tablero principal, por los permisos que se deben solicitar y el área de confección, debido al número de personas trabajando allí.

- La cantidad y complejidad del monitoreo de datos: ya que será un estudio de siete días, se debe tomar especial cuidado en la configuración del equipo medidor para no saturar la memoria antes del período de medición. Al finalizar el estudio se debe contar con un mínimo de mediciones válidas tal como lo determinan los anexos a las NTSD (Resolución CNEE-51-99), para cada caso.
  
- El número y la duración de los registros de eventos:
  - Factor de potencia: 4 mediciones por hora, poniendo mayor atención en las mediciones del período horario de punta.
  
  - Distorsión armónica: mediciones cada 10 minutos, durante siete días. Se debe hacer hasta el rango de frecuencia de 9 kHz (para instalaciones de 60 Hz). El ancho de la ventana debe ser de 12 ciclos; básicamente de 200 ms. Y se hace hasta el orden de armónica No. 40, según la norma IEC 1000-4-7.
  
  - *Flicker*: para los parámetros por medir, el indicador de *flicker* de corto plazo (Pst) se mide en un lapso del orden de los minutos, en este caso 10 minutos durante siete días. El indicador de *flicker* de largo plazo (Plt) se mide en un período de observación de 2 horas
  
- Se estima que, al concluir los siete días de medición, se obtendrá 672 registros de los cuales se deberá contar con 576 registros válidos como mínimo para que el estudio sea válido, según los anexos de las NTSD, para el caso del *flicker*, factor de potencia y armónicos.

- El grado de participación de los niveles gerenciales y de personal: se requiere como mínimo a dos personas durante la instalación del equipo medidor, por seguridad.
- Requerimientos especializados de personal: únicamente se requiere ayuda del jefe de planta para ubicar tableros, inversores y ubicación de equipos, para realizar el inventario de cargas.
- Soporte del equipo informático: se requiere de ordenadores con el DranView 5.7 pro instalado para el uso en el análisis de datos y la preparación de los reportes.

## **4.2. Preparación del estudio**

Es el primer paso para implementar el plan del estudio. A continuación, describe la documentación de una recopilación de datos y herramientas necesarios para el estudio de calidad de la energía.

### **4.2.1. Recolección de datos y documentación**

Como parte de la planificación y el proceso de preparación es necesario obtener un historial del sitio para el establecimiento o el equipo en cuestión. También, un sistema de recolección de datos debe ser implementado para relacionarse los eventos de monitoreo de potencia y el equipo o problemas de procedimiento.



#### **4.2.2. Historial del establecimiento**

Esta información ayuda a enfocar una investigación; cambios grandes en el lugar, problemas del equipo durante tormentas eléctricas que ocurren regularmente en días específicos de la semana o en horas específicas, son patrones que se incluyen en el historial del lugar.

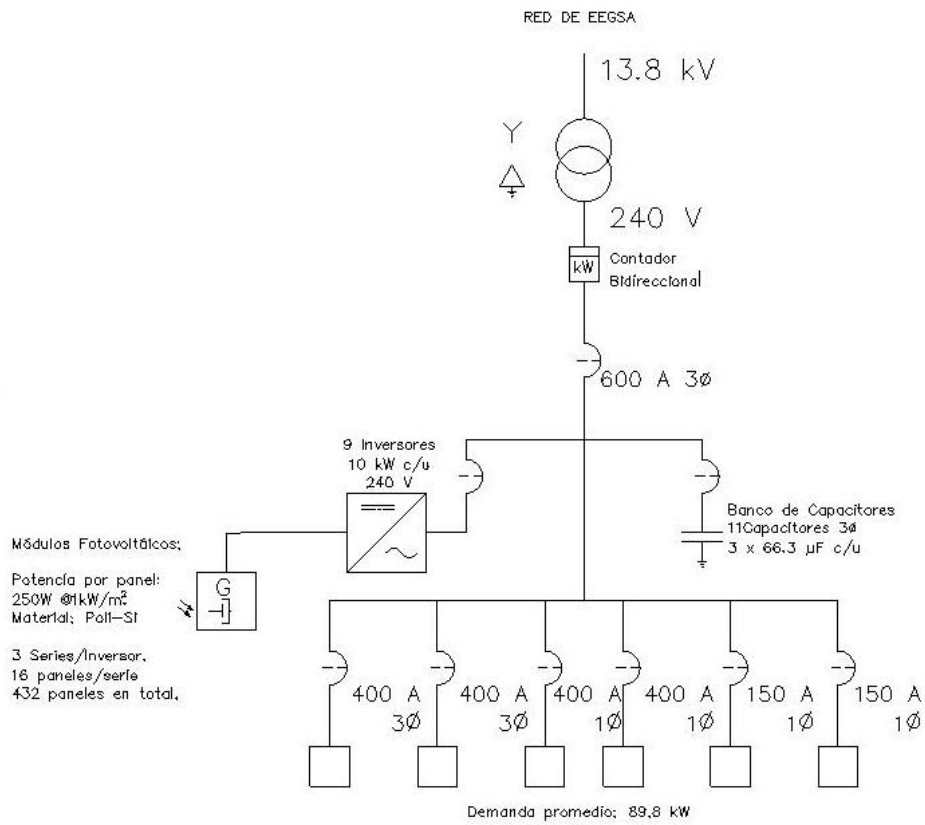
Esta información puede ayudar a encontrar los problemas con mayor facilidad, realizarle preguntas al personal laborando en la planta puede llegar a explicar los problemas del equipo y los métodos utilizados para corregirlos. Esa ayuda es crucial para el estudio.

La información del lugar incluye:

- La hora promedio de los problemas recurrentes del sistema.
- Síntomas de falla o problemas de hardware.
- Cambios recientes en el equipo o incorporaciones de equipo.
- Renovaciones en el establecimiento.
- Ciclos de operación del equipo eléctrico pesado en el establecimiento.

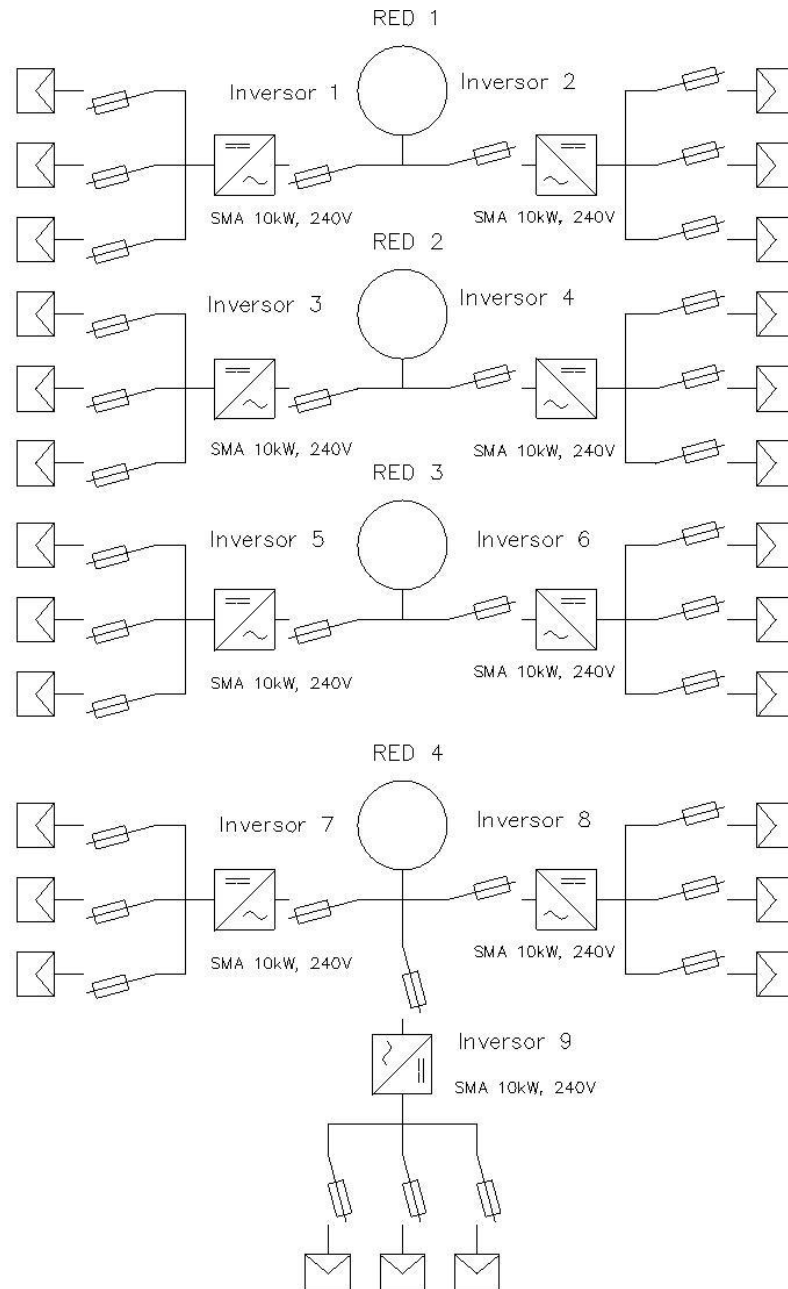
Entre las renovaciones que se encuentran en el establecimiento está, la instalación de paneles solares y del banco de capacitores, tal como se muestra en el diagrama de la figura 19.

Figura 19. Diagrama unifilar simplificado de la instalación eléctrica



Fuente: elaboración propia, con base en el software DraftSight 2017 SP2.

Figura 20. **Diagrama de conexión de paneles solares de la instalación eléctrica**



Fuente: elaboración propia, con base en el software DraftSight 2017 SP2.

Un dato que se considera importante, son los siguientes horarios donde se describe las actividades llevadas a cabo a lo largo del día, de lunes a viernes, lo cual brindará claves para comprender los gráficos obtenidos luego del estudio:

Tabla X. **Horarios de trabajo en la planta**

Hora	Actividad	Observaciones
06:00 am	Arranque de la plancha de sublimación	La plancha toma alrededor de 45min - 1 hora para llegar a la temperatura de operación
07:00 am	Entrada de todo el personal de producción	Inicia el arranque de equipos de cómputo, impresoras y de más maquinaria para la producción
10:00 am – 10:20 am	Refacción de todo el personal de producción	La mayoría de maquinaria se detiene, menos la plancha de sublimación, impresoras, iluminación y los ordenadores
01:00 pm – 01:40 am	Almuerzo de todo el personal	La mayoría de maquinaria se detiene, menos la plancha de sublimación y los ordenadores
05:00 pm	Hora de salida del personal	Hora aproximada de salida, los equipos eléctricos se apagan, menos los servidores y demás dispositivos de red, como los enrutadores, puntos de acceso e interruptores ( <i>switch</i> ).
06:00 pm	Apagado completo de la plancha de sublimación	La plancha continúa operando por un tiempo mientras se enfría y se apaga completamente

Fuente: elaboración propia.

### **4.2.3. Registros de eventos del equipo**

El registro de eventos del equipo provee una descripción, fecha y hora de cada problema inusual o evento que presente el equipo. Estos registros hacen más fácil relacionar los problemas registrados por el equipo con los problemas del sistema.

### **4.2.4. Preparación de las herramientas**

Se debe listar las herramientas que se requerirán para el estudio y así evitar contratiempos al momento de la fase de ejecución:

- Analizador de calidad de energía Dranetz Power Xplorer 4400.
- Cable de comunicación RS232.
- Equipo personal tipo Laptop con Software Dran-View Pro v 5.7.
- Voltiamperímetro de inducción digital.
- Detector de voltaje sin contacto.
- Equipo de protección personal: botas, casco, mascarillas.
- Desarmadores, alicates, pinzas, corta alambre para electricista (con aislamiento).

### **4.2.5. Inspección visual del establecimiento**

Para esta parte del estudio se recomienda realizar un recorrido fuera del establecimiento, a pie, para garantizar la observación de la mayor cantidad de detalles posibles respecto de la instalación eléctrica y de los lugares aledaños. Por ejemplo: el tipo de servicio eléctrico (aéreo o subterráneo), la conexión de los transformadores principales, la instalación de bancos de capacitores para

corrección de factor de potencia, subestaciones de servicio cercanas, plantas de generación solar instaladas, entre otros.

Luego se procede a realizar la inspección visual dentro del establecimiento para identificar el equipo que pueda llegar a ser una fuente de interferencia, así como las principales cargas eléctricas del lugar. En este punto se considera una buena idea colocar algunos analizadores de red, para la recolección preliminar de datos y acelerar el proceso de inspección visual.

En las cercanías al tablero principal, se encuentra instalado en el poste un banco de transformadores trifásico en forma aérea. El banco está conformado por 3 unidades de 75 kVA cada transformador, 13,8 kV/ 240 V, que pertenece a la Empresa Eléctrica de Guatemala.

Durante la inspección visual, se pudo observar que en el tablero principal se encuentra instalado un banco de 11 capacitores trifásicos de 66 microfaradios cada uno. El cual muestra en un indicador que el valor del factor de potencia se mantiene con un valor cercano a 1.

#### **4.2.6. Inspección física del establecimiento**

Previo a iniciar la inspección se debe tener en cuenta que la seguridad del personal es importante, por lo que es menester cerciorarse de que se cuenta con el equipo y las herramientas en buen estado para proceder. Contar con personal calificado para la revisión de las líneas vivas o paneles eléctricos, no está de más recordarlo.

Para obtener un mejor panorama del estado de la instalación eléctrica, se recomienda la revisión de los siguientes elementos:

- Cables de poder y enchufes
- Receptáculos
- Cableado instalado bajo de alfombras
- Paneles eléctricos
- Conductos eléctricos
- Transformadores
- Entrada del o los servicios eléctricos

### **4.3. Monitoreo**

Previo a iniciar con la colocación de los analizadores de redes, se debe considerar lo siguiente:

- Asegurarse que no haya unión del neutral con el conductor a tierra en otro punto más que en el panel principal (solo allí debe de existir esa unión), para evitar mediciones erróneas.
- Verificar que la línea por analizar sea de no más de 600 Vrms, por la especificación máxima del equipo medidor Dranetz 4400.
- La observación y el sentido común se deben utilizar primero, antes que cualquier equipo o herramienta.

#### **4.3.1. Colocación del equipo**

Se toman en cuenta las siguientes precauciones para cuidar el equipo analizador de calidad de energía:

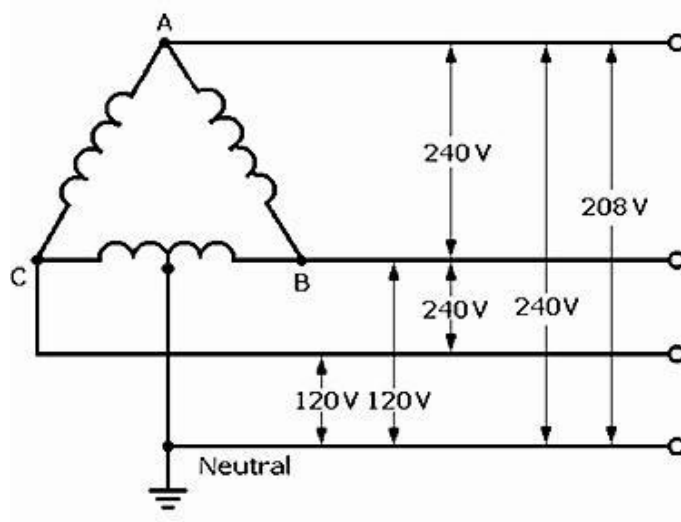
- Apagar el medidor de calidad de energía antes de conectarlo a la red.
- Si se dispone de fusibles para proteger el equipo se deben colocar en este momento.
- Los lagartos y CT deben de conectarse primero al medidor de calidad de energía y luego a la red que se va a analizar.
- Los medidores de corriente deben de conectarse con la flecha apuntando en dirección a la carga.
- Nunca asumir que un circuito está desenergizado; comprobarlo primero con equipo especial únicamente.
- Luego de instalar los analizadores, revisar que los registros de eventos se hayan configurado bien.

#### **4.3.2. Conexiones para el monitoreo de potencia**

Se debe revisar las fases en el tablero principal y el tipo de conexión existente. Tal como se observa en la figura 21, la conexión en el tablero principal es en delta con una derivación en una fase.



Figura 21. Diagrama esquemático de la conexión del devanado secundario en el banco de transformación principal



Fuente: *Power distribution configurations with three 3-phase hot power lines*. <https://electrical-engineering-portal.com/>. Consulta: octubre de 2017

Para el cálculo del voltaje de A al punto neutro, se utiliza un triángulo de Pitágoras. El resultado se obtiene de la siguiente manera:

Sabiendo que  $V_{A-B} = 240$  y  $V_{C-N} = 120$ :

$$V_{A-N} = \sqrt{240^2 - 120^2} = 207.84$$

Lo cual se aproxima a:

$$V_{A-N} = 208 \text{ V}$$

A continuación, se presentan los datos más relevantes en la configuración del medidor de calidad de energía, al momento de conectarlo para empezar a

realizar el estudio, tomando en cuenta la información obtenida de la planificación y el alcance de las actividades.

#### Configuración Dranetz-BMI Power Xplorer

Firmware Power Xplorer (c) 2009 Dranetz-BMI

Oct 03 2014 @ 14:50:49

Ver.: V 4.3, Build: 2, Ver. BD: 0

Número de serie 4400ZA124

Sitio/nombre de fichero ACP\_V2JUN01

Medido desde 01/06/2017 10:53:30

Medido hasta 08/06/2017 10:45:53

Fichero finalizando OK

Sincronización estándar A

Configuración 3 HILOS / 3 SONDAS (DELTA)

Tipo de monitorización REGISTRO DE DATOS A LARGO PLAZO

Tensión nominal 241,1 V

Intensidad nominal 86,8 A

Frecuencia nominal 60,0 Hz

Usar secuencia inversa No

Registro de intensidades Sí

Modo de caracterización NINGUNO

Sondas de intensidad

Canal A TR2500, TR2500A 10A-500A RMS (Escala=333,33)

Canal B TR2500, TR2500A 10A-500A RMS (Escala=333,33)

Canal C TR2500, TR2500A 10A-500A RMS (Escala=333,33)

Canal D TR2500, TR2500A 10A-500A RMS (Escala=333,33)

Factores de escala de tensión

Canal A 1 000

Canal B 1 000

Canal C 1 000

Canal D 1 000

Factores de escala de intensidad

Canal A 1 000

Canal B 1 000

Canal C 1 000

Canal D 1 000

Intervalo de lecturas de tendencias periódicas:

Tensión 15,0 minutos

Intensidad 15,0 minutos

Potencia 15,0 minutos

Armónicos 15,0 minutos

*Flicker* instantáneo 10,0 minutos

Pst 10,0 minutos

Plt 120,0 minutos

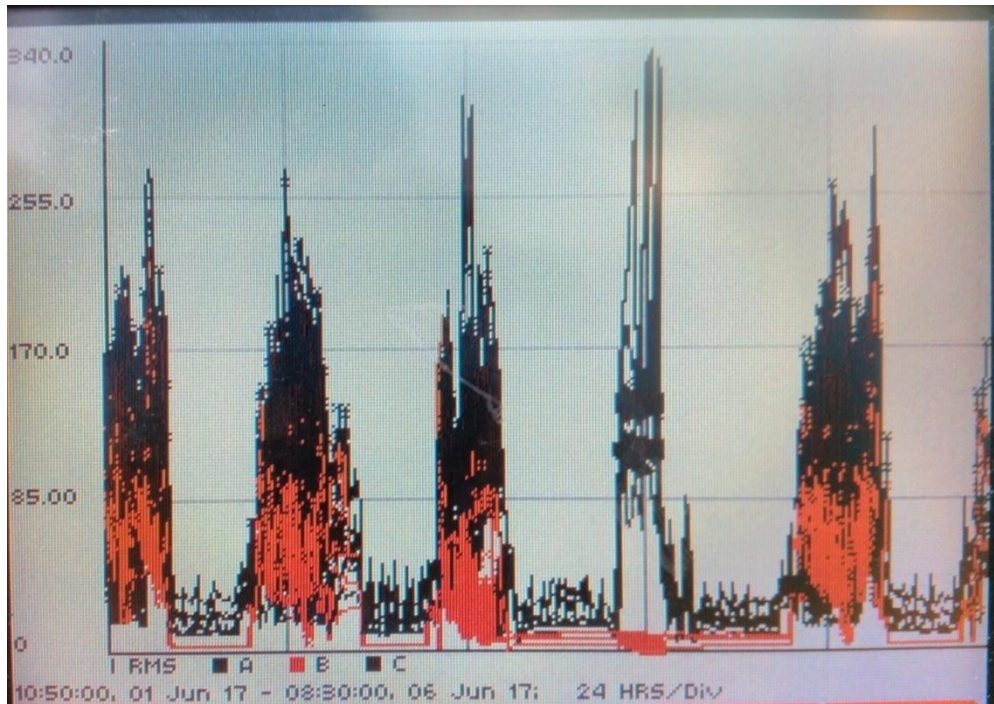
#### **4.4. Análisis de datos con el software Dran-View Pro versión5.7**

En el siguiente apartado se muestra el análisis de datos obtenidos con el analizador de calidad de energía.

#### 4.4.1. Análisis del factor de potencia en la red

A continuación se muestra la información descargada de la memoria del Dranetz 4400 de las mediciones correspondientes a los 7 días.

Figura 22. Comportamiento de la corriente durante los siete días de la medición



Fuente: elaboración propia, con base en el software DranView 5.7.

Según el software DranView v5.7, el factor de potencia promedio monitorizado es de -0,488 pu, sin embargo, se considerará que la instalación cuenta con generación por medio de paneles fotovoltaicos, por lo cual se verán los momentos en que la planta se encuentra consumiendo potencia con cargas mayormente inductivas, por medio de las mediciones de kVAR.

Tabla XI. **Resumen de datos factor de potencia obtenidos**

	A	B	C	D	ABC	Fecha y hora de ocurrencia
Min PF	-0,934	-0,713	-0,669	-0,228	-0,872	05/06/2017 18:15:00
Max PF	0.988	0,995	0,995	0,819	1,000	02/06/2017 09:30:00
Avg PF	-0.545	-0,387	-0,365	0,449	-0,453	No aplica

Fuente: elaboración propia, con base en el software DranView 5.7.

Para la hoja de cálculo utilizada para el análisis de datos, se hicieron las siguientes modificaciones para hacer más fácil la lectura de los datos donde la corriente se encuentra en atraso con respecto al voltaje (carga mayormente inductiva), que son los valores por tomar en cuenta, ya que la Comisión Nacional de Energía Eléctrica únicamente multa por bajo factor de potencia:

Tabla XII. **Fragmento de hoja de cálculo con los datos de factor de potencia en atraso y adelanto, basado en los kVAR**

X-Data	Potencia reactiva promedio [kVAR]	FP Promedio [pu]	Carga capacitiva (kVAR negativos)	Carga inductiva (kVAR positivos)
01/06/2017 11:00	-12,3588	-0,8416		-0,8416
01/06/2017 11:10	-17,3917	-0,7806		-0,7806
01/06/2017 11:20	-17,8499	-0,7686		-0,7686
01/06/2017 11:30	-17,6276	-0,7928		-0,7928
01/06/2017 11:40	-12,5187	-0,7741		-0,7741
01/06/2017 11:50	7,792	-0,8547	-0,8547	
01/06/2017 12:00	7,521	-0,8806	-0,8806	

Continuación de la tabla XII.

01/06/2017 12:10	11,107	-0,8965	-0,8965	
01/06/2017 12:20	11,692	-0,9051	-0,9051	
01/06/2017 12:30	15,194	-0,9297	-0,9297	
01/06/2017 12:40	28,05	0,9589	0,9589	
01/06/2017 12:50	23,762	-0,9918	-0,9918	

Fuente: elaboración propia, con base en el software Microsoft Excel, 2007.

Para discriminar los valores de carga mayormente capacitiva y carga mayormente inductiva, se utilizó la siguiente fórmula en cada columna respectivamente:

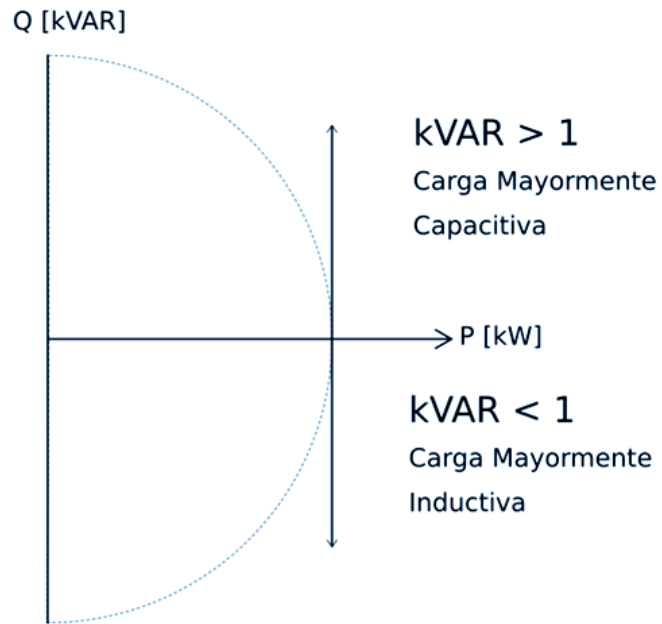
Tabla XIII. **Fórmulas utilizadas para discriminar corriente en atraso de los datos medidos**

X-Data	Potencia Reactiva Promedio [kVAR]	FP Promedio [pu]	Carga Capacitiva (kVAR Negativos)	Carga Inductiva (kVAR Positivos)
Fecha/Hora	kVAR medido	FP medido	=IF(B2>0,C2,"")	=IF(B2<0,C2,"")

Fuente: elaboración propia, con base en el software Microsoft Excel, 2007.

Obteniendo un promedio del factor de potencia con carga mayormente inductiva de -0,59 unidades. Lo cual indica que la instalación eléctrica se encuentra generando energía la mayor parte del tiempo que duró el estudio.

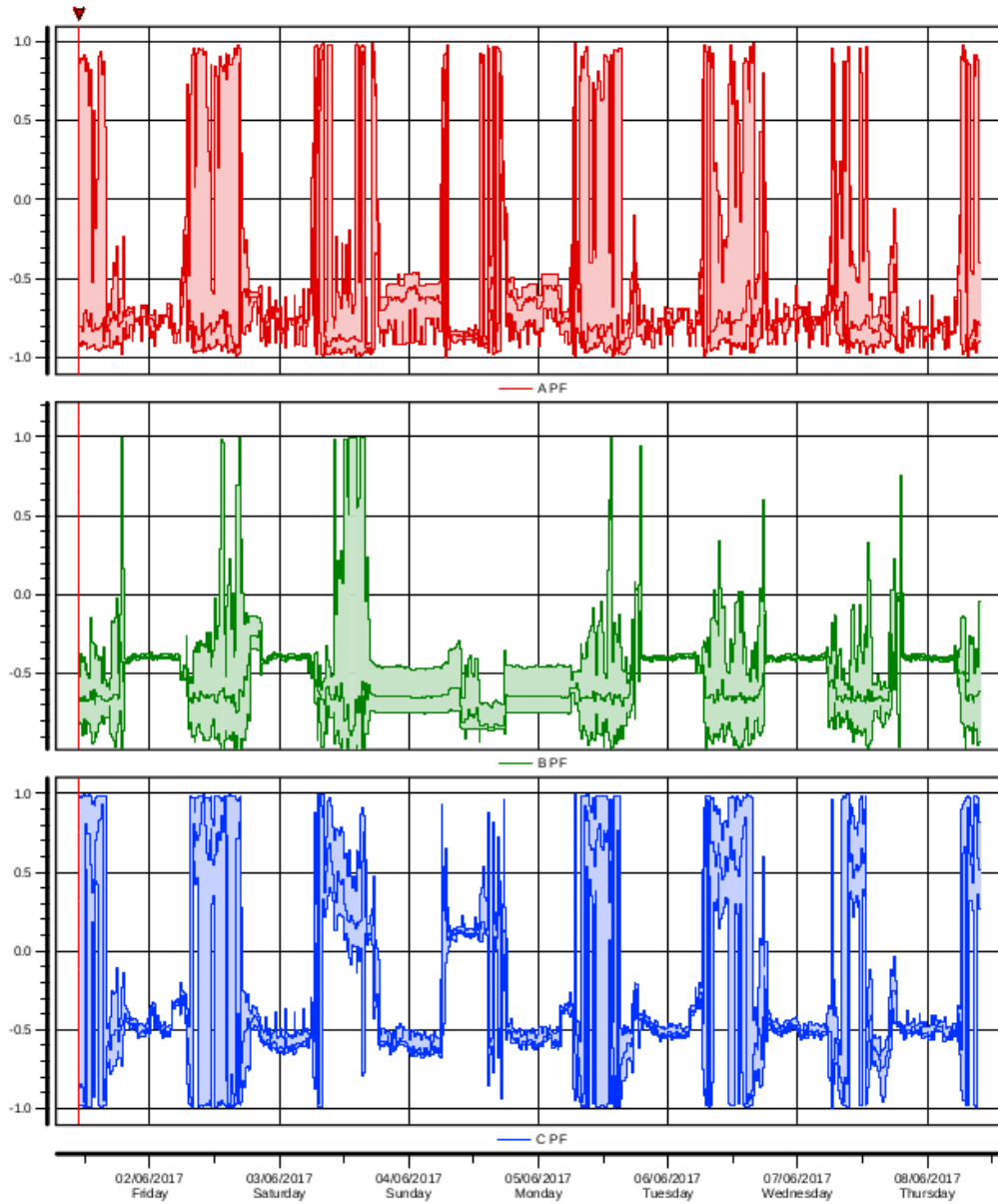
Figura 23. **Comportamiento de la potencia reactiva dependiendo del tipo de carga**



Fuente: elaboración propia, con base en el software Inkscape 0.92.1 r.

El medidor de calidad de potencia muestra valores negativos de factor de potencia cuando la instalación se encuentra generando más energía de la que consume y muestra valores positivos cuando la instalación se encuentra consumiendo energía de la red de la Empresa Eléctrica.

Figura 24. Factor de potencia total frente a tiempo



	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Avg</i>
<b>APF</b>	-0.9996	0.9884	-0.6685
<b>BPF</b>	-0.9954	0.9955	-0.5545
<b>CPF</b>	-0.9996	0.9962	-0.2232

Fuente: elaboración propia, con base en el software DranView 5.7.



#### 4.4.2. Análisis de armónicos en la red

Basado en la tabla XIV se obtiene los valores de potencia máximo de la instalación, para luego compararlos con las tolerancias para la distorsión armónica de la corriente de carga. Tal como lo estipulan las NTSD, se debe hacer el análisis de armónicos hasta la No.40.

Tabla XIV. **Resumen de datos de potencia obtenidos**

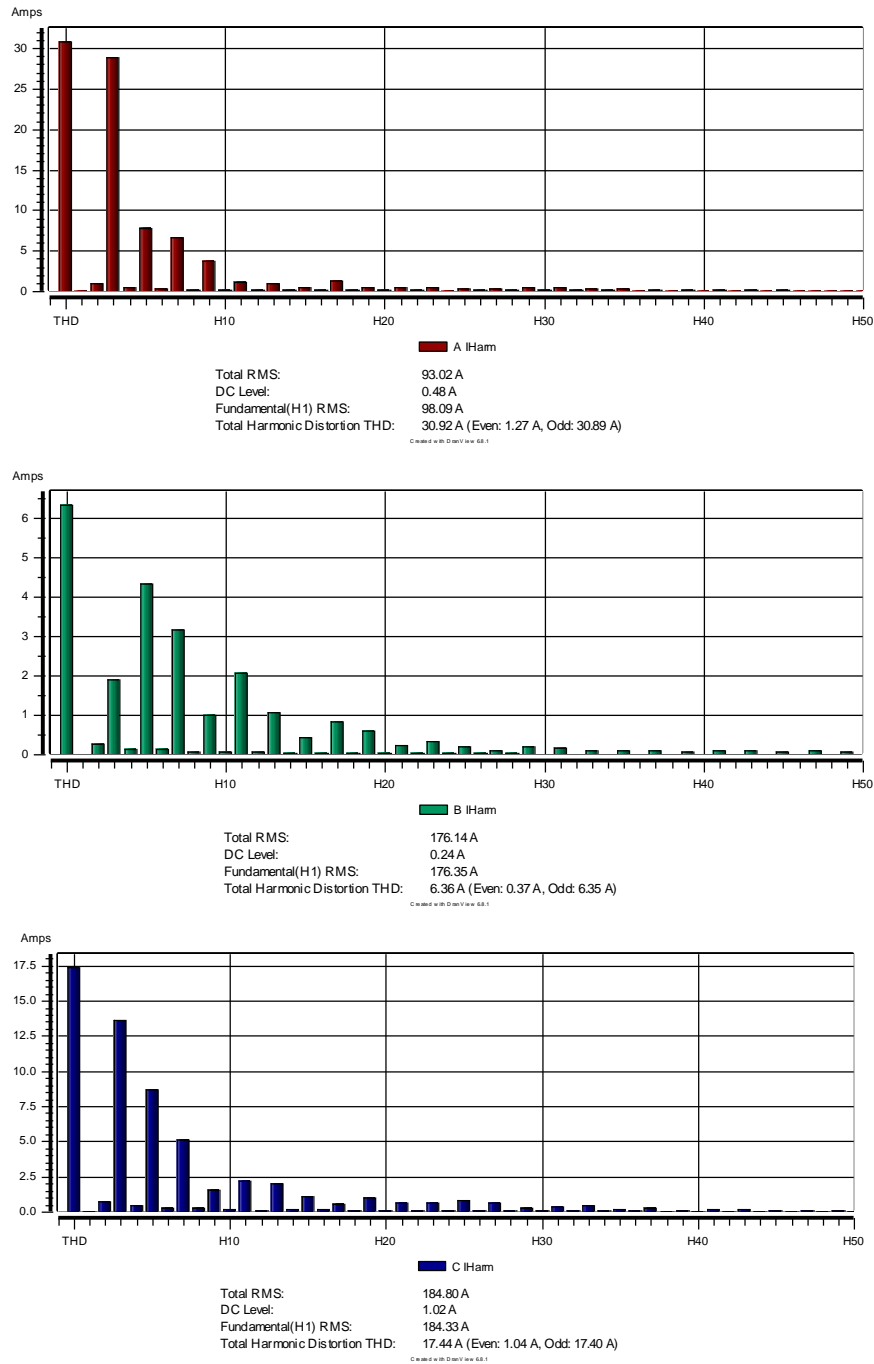
	A	B	C	D	ABC	Fecha y hora de ocurrencia
Min kW	-20.1	-0.1	0.0	-0.0	-16,6	04/06/2017 08:00:00
Max kW	30.8	25.4	30.5	0.0	84,9	07/06/2017 15:30:00
Avg kW	2.1	1.1	2.8	0.0	6,3	

Fuente: elaboración propia, con base en el software DranView 5.7.

En promedio la distorsión armónica total es igual a 30,92 amperios para la fase A, 6,36 amperios para la fase B y 17,44 amperios para la fase C, sin embargo en Tabla VII no se muestra ningún valor de tolerancia en este caso.

Según los resultados obtenidos, se exceden las tolerancias 266 veces en el período de medición, representando el 33 % de la muestra.

Figura 25. Distorsión armónica total, separado por fases



Fuente: elaboración propia, con base en el software DranView 5.7.

Tabla XV. **Resultados de porcentaje de excedente de armónicos en la instalación**

Orden de la Armónica	Excedente (%)
2	0,00
3	17,08
4	0,00
5	22,87
6	0,00
7	21,97
8	0,00
9	11,48
10	0,00
11	0,00
12	0,00
13	28,57
14	0,00
15	15,68
16	0,00
17	28,77
18	0,00
19	30,86
20	0,00
21	7,29
22	0,00
23	29,47
24	0,00
25	22,57
26	0,00
27	27,57
28	0,00
29	33,16
30	0,00
31	24,17
32	4,89

Continuación de la tabla XV.

33	16,88
34	0,00
35	16,88
36	0,00
37	4,29
38	0,00
39	0,00
40	0,00

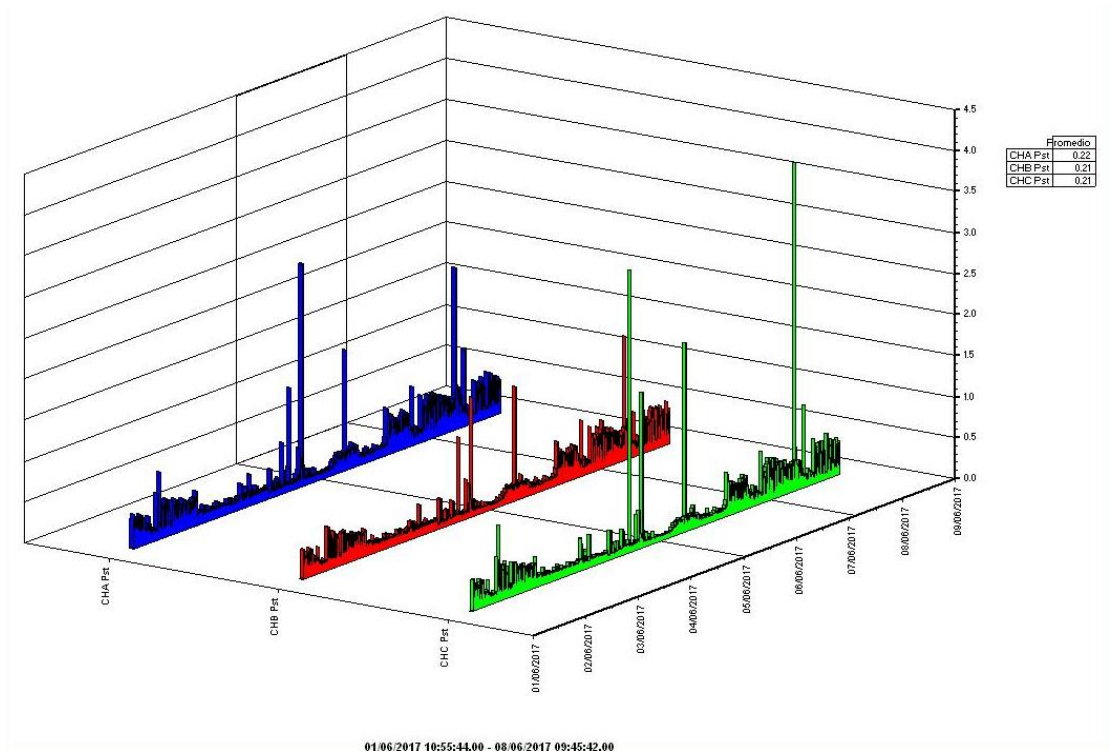
Fuente: elaboración propia, con base en el software Microsoft Excel, 2007.

#### **4.4.3. Análisis del *flicker* en la red**

Según los límites establecidos para el *flicker* en las NTSD, la tolerancia máxima para la carga de la instalación, que no supera los 100 kW, es de 1,86.

El valor del índice de severidad de *flicker* de corto plazo (Pst) durante los siete días se sobrepasa en tres ocasiones, representando un 0,30 % del período de medición. El promedio del Pst es igual a 0,21. Lo cual se considera muy debajo del límite de la tolerancia, por lo tanto, no es necesario calcular ninguna indemnización por *flicker*.

Figura 26. Pst del *flicker* frente a tiempo



Fuente: elaboración propia, con base en el software DranView 5.7.

Basado la resolución CNEE-56-2003, inciso i, se resuelve extender el plazo durante el cual los resultados de las empresas de distribución y transporte que se deriven de las mediciones de distorsión armónica, en tensión y corriente, así como de *flicker*, no estarán sujetos a las disposiciones contenidas en los artículos 34, 39, 44 y 48 de las NTSD, en los cuales se establecen las indemnizaciones por exceder las tolerancias de las perturbaciones anteriormente mencionadas.

En caso de que el usuario, se encuentre fuera de las tolerancias establecidas en las NTSD, se dispone de un plazo máximo de tres meses para efectuar un estudio de calidad de energía eléctrica para poder determinar el o

los equipos que se encuentren causando las perturbaciones para así proponer una solución y corregirlas. Presentando la adecuación de las instalaciones o un cronograma para solicitar la presentación de las ofertas, adjudicación, compra de equipos, instalación y puesta en marcha del equipo, según sea requerido por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

Luego de la instalación y puesta en marcha de los equipos se debe informar a la CNEE, para luego realizar de nuevo un estudio de calidad de energía eléctrica y presentar los informes correspondientes. De no cumplirse la resolución CNEE-56-2003, se aplicarán las sanciones correspondientes tomando en cuenta todas las pruebas requeridas por la CNEE.

#### **4.5. Sumario de perturbaciones por nivel de importancia**

Armónicos: tal como se puede observar en la Tabla XV, la incidencia del usuario es notoria en armónicos impares no múltiplos de 3 y armónicos impares no múltiplos de 3. Debido a la cantidad de motores que arrancan de manera continua en la industria, se puede considerar que son la fuente principal de armónicos de este tipo. Ya que los de orden 3, 5 y 7 están relacionados directamente con este equipo.

*Flicker*: según los datos mostrados en el análisis de *flicker* en la red, esta no representa ningún valor más alto de lo aceptado por las NTSD. Ya que existe un margen de más del 90 % para superarlo. Debido a la ausencia de maquinaria que produce *flicker*, como se explica en el capítulo 2, no se esperaba un valor considerable del mismo.

Factor de potencia: debido a que la instalación cuenta con un banco de capacitores ya instalado, desde octubre de 2016, se esperaba que el valor del

factor de potencia no estuviera por debajo del límite establecido. Sin embargo, no se puede dejar de lado el hecho que puede estar afectando de manera directa los valores obtenidos en el período de medición debido a la cercanía con el punto de medición del equipo de calidad de energía y los cambios automáticos de los dispositivos de control internos que conforman el circuito de corrección de factor de potencia.





## 5. CONSIDERACIONES ADICIONALES

A pesar de que un estudio de calidad de energía basado en las NTSD de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica del lado del usuario, se centra en los tres parámetros mencionados anteriormente (factor de potencia, *flicker* y armónicos), no debe dar por sentado que si no se exceden los límites la instalación se encuentra en óptimas condiciones.

Existen más perturbaciones que se deben considerar a la hora de realizar un estudio de calidad de energía. Debido a que estas perturbaciones pueden generar pérdidas a la empresa por la interrupción de los equipos y, por ende, de la producción. Tomando tiempos de hasta algunas horas para restablecer nuevamente los equipos, traduciéndose en menor calidad del producto final en algunos casos.

Gracias a los medidores de calidad de energía, el monitoreo de los parámetros se hace de mejor manera, ya que estos permiten ser configurados a manera de presentar alarmas cuando detectan algún problema, los cuales pueden ser visibles en tiempo real o haciendo uso del software.

A continuación, se presentan los siguientes problemas más comunes en la industria. Para eliminar la ambigüedad a la hora de describir las perturbaciones eléctricas, se debe considerar los siguientes términos y así dar con los equipos adecuados para su corrección, ya que esto facilita de manera la comunicación para describir de manera precisa la naturaleza del problema.

## 5.1. Huecos de tensión

Son la principal causa de fallos en el equipo y maquinaria de una industria textil. Son conocidos también como *sags*. Este tipo de perturbaciones son caídas súbitas de voltaje RMS de valores entre 10 % y 90 % de corto tiempo. Según la norma EN50160 el tiempo de duración de un hueco de tensión puede ser entre 10 ms y 1 min, a un tiempo mayor sería considerado una interrupción breve. Cabe destacar que la mayoría del equipo eléctrico tolera caídas de tensión inferiores al 10 % del voltaje nominal, a pesar de ello algunos equipos se ven afectados y, por ende, los procesos.

Entre las causas por las que se generan los huecos de tensión se encuentran:

- Cortocircuitos o fallas en la red de transporte de alta tensión, en la red de distribución de media tensión o en la propia instalación en media tensión del usuario.
- Interacción de la carga con la impedancia de la fuente de voltaje.
- Interacción de la carga con el cableado de la red (especialmente durante el arranque de grandes cargas).

Figura 27. **Forma de onda de un hueco de tensión en la red**



Fuente: SEYMOUR, J. *The Seven Types of Power Problems*. p. 9.

### 5.1.1. Profundidad de los huecos de tensión

Para el cálculo de la amplitud o profundidad de un hueco de tensión se debe analizar el siguiente modelo matemático:

$$\Delta U (\%) = \frac{U_{ref} - U_{min}}{U_{ref}} * 100$$

Donde:

- $U_{ref}$  = Tensión de referencia
- $U_{min}$  = Tensión mínima alcanzada
- $\Delta U$  = Profundidad del hueco de tensión

Se observa que la definición es la diferencia entre el valor de la tensión durante el hueco de tensión y un valor de referencia que comúnmente es la tensión nominal.

Este término no se debe confundir con la subtensión, que es un descenso en el valor eficaz de la tensión, inferior a una cierta tolerancia sobre la tensión nominal, con una duración superior a 1 minuto.

## **5.2. Interrupción del suministro**

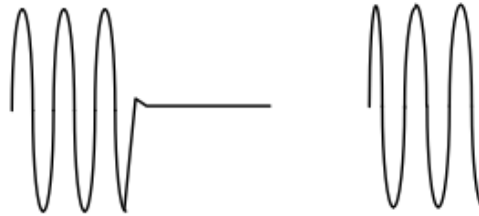
Es la completa ausencia de potencia de suministro, puede ser de un tiempo muy corto hasta de un tiempo muy prolongado, dependiendo si la causa persiste. Se deben fundamentalmente a la acción de las protecciones al momento de ocurrir una falla en el sistema eléctrico.

Estas interrupciones pueden ser programadas por trabajos de mantenimiento sobre la red; o imprevistas, debido a fallos en el sistema de distribución.

Las causas comunes son debidas a:

- La acción de las protecciones al momento de ocurrir una falla en el sistema eléctrico.
- Falla en la fuente de potencia de corriente alterna.
- Cableado suelto.

Figura 28. **Forma de onda de una interrupción de suministro**



Fuente: SEYMOUR, Joseph. *The Seven Types of Power Problems*. p. 8.

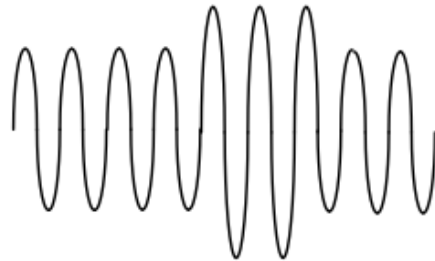
La apropiada selección de los equipos en el momento de su adquisición, el adecuado ajuste de las protecciones o una eficiente programación del automatismo de control, se deben tomar en cuenta al momento de considerar soluciones a los huecos de tensión y cortes breves.

### **5.3. Sobretensión**

Es un término que denota aumentos bruscos y de corta duración en la tensión de alimentación. Son también conocidos como *swells*. Según la norma EN50160, para una sobretensión temporal o relativamente larga, no se establecen límites de tiempo. Son asociadas con faltas a tierra en el sistema eléctrico de distribución y con desconexiones de grandes cargas o conexiones de determinados elementos en la red.

Las sobretensiones de larga duración son las que superan la duración de 1 minuto la tolerancia de la tensión nominal y son causadas por conmutaciones de grandes cargas, variaciones en el sistema de generación o variaciones en la compensación reactiva del sistema.

Figura 29. **Forma de onda de una sobretensión**

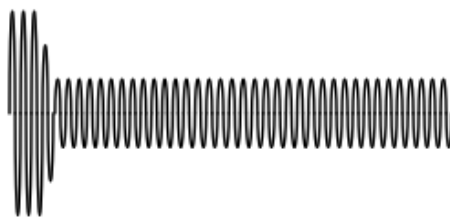


Fuente: SEYMOUR, Joseph. *The Seven Types of Power Problems*. p. 11.

#### 5.4. Subtensión

Es un descenso en el valor eficaz de la tensión, más baja de una magnitud tolerada sobre la tensión nominal y con una duración mayor a un minuto. Se debe a conmutaciones de grandes cargas, por la desconexión de baterías de condensadores o de generadores y acciones similares; causas que resultan ser similares, pero en sentido contrario a las que pueden provocar sobretensiones de larga duración.

Figura 30. **Forma de onda de una subtensión**



Fuente: SEYMOUR, Joseph. *The Seven Types of Power Problems*. p. 10.

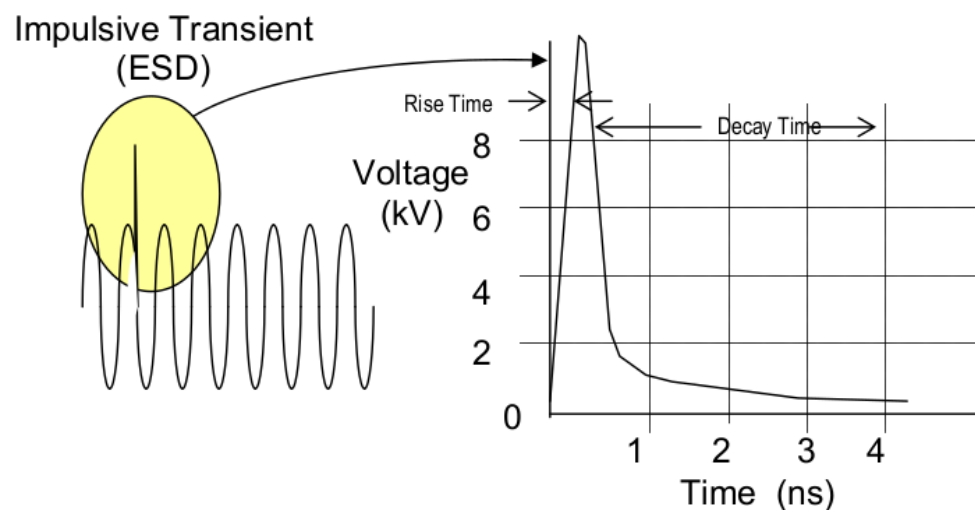
## 5.5. Impulso, sobretensión transitoria

Es una variación brusca del valor instantáneo de tensión y de corta duración seguida de un retorno rápido a su valor inicial. Se asocia a fenómenos relacionados con descargas atmosféricas y arcos eléctricos, con una duración del orden de los microsegundos.

Es considerada como la perturbación que más daño puede hacer al sistema eléctrico. Esta se divide en dos categorías: de impulso y oscilatorias.

Las de tipo impulso son las que pueden observarse como un alza súbita de voltaje o de corriente en una dirección positiva o negativa. Estos son categorizados dependiendo de la velocidad con la que estos ocurren (rápido, medio, lento). Pueden ser de una duración desde 5 nanosegundos hasta menos de 50 nanosegundos.

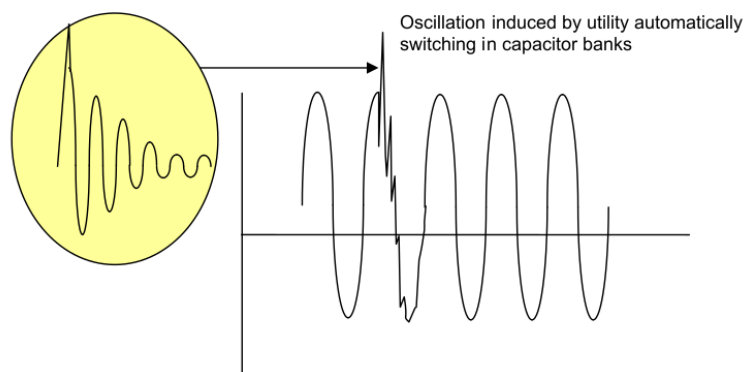
Figura 31. **Ejemplo de una sobretensión transitoria tipo impulso en la red**



Fuente: SEYMOUR, Joseph. *The Seven Types of Power Problems*. p. 5.

Los de tipo oscilatorio se presentan como un cambio repentino en la condición de estado estable del voltaje, la corriente o ambos de una señal, tanto en los límites de señal positiva como negativa, oscilando a la frecuencia normal del sistema. Este tipo de transitorio se describe por su contenido espectral, duración y magnitud. Por su frecuencia se clasifican en: transitorios de alta, media y baja frecuencia.

Figura 32. **Ejemplo de una sobretensión transitoria tipo oscilatoria en la red**



Fuente: SEYMOUR, Joseph. *The Seven Types of Power Problems*. p. 7.

De no contarse con una correcta instalación puesta a tierra, se pueden tener consecuencias dañinas para el equipo conectado. Un transitorio puede dañar equipos electrónicos, controladores de velocidad de motores y el aislamiento del equipo eléctrico.

## 5.6. Deformación transitoria de la onda de tensión

Es un tipo de perturbación que produce una deformación en la onda, con duración entre algunos milisegundos hasta varios ciclos. Debido a sus



características no pueden ser considerados como variaciones en el valor eficaz de la tensión; por su forma no pueden ser considerados como impulsos.

Esta deformación de la onda sinusoidal se produce por la conexión de la batería de condensadores. Por lo general, es un patrón que se repite habitualmente por la mañana y por la noche, debido a la automatización de la conexión.

## **5.7. Perturbaciones transitorias en la corriente**

La intensidad debe ser considerada en el análisis de la red de una industria, debido a que los consumos varían en el tiempo, muchas veces de forma brusca, resultando que la onda de intensidad se modifique. Se debe tomar en cuenta que en algunos casos la deformación de la tensión es mínima, pero lo ocurrido en la onda de la intensidad explica de mejor manera lo ocurrido.

### **5.7.1. Reconexión de intensidad**

Es el paso de un valor de cero intensidad a una circulación de corriente de un valor determinado. Es causado principalmente, por la conexión del interruptor general más cercano aguas abajo del punto de medida o por una anulación previa de la tensión.

### **5.7.2. Sobreintensidad**

Es un aumento de la corriente en un instante determinado. Es ocasionada generalmente cuando se energiza una carga muy grande, provocando una caída de tensión temporal y conlleva a un aumento de tensión momentáneo. Un

cortocircuito es otra posible causa, produce una caída de tensión mayor y, por ende, un alza en la intensidad.

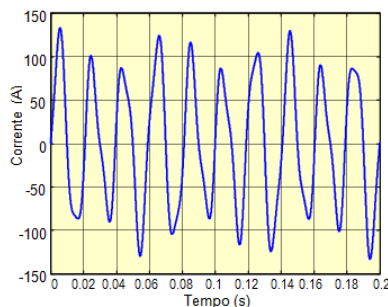
### 5.7.3. Sobrecorriente transitoria

Se le denomina de esta manera a un incremento instantáneo de la corriente de elevado valor. Su tiempo de duración es mayor al de un impulso, con una pendiente menor y con duración inferior a un ciclo. Esta perturbación está relacionada con la actuación rápida de fusibles o interruptores automáticos limitadores, ante elevadas corrientes.

### 5.8. Interarmónicos

Son un tipo de distorsión de forma de onda que generalmente es el resultado de una señal (que no es múltiplo del entero de la frecuencia nominal) impuesta en el voltaje de suministro por equipos eléctricos tales como convertidores de frecuencia estáticos, motores de inducción y dispositivos de arco.

Figura 33. Presencia de interarmónicos en la red



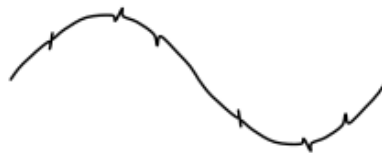
Fuente: <http://www.sinus-pq.dei.uminho.pt/imagens/equipamentos/qee/2/3.png>. Consulta: noviembre de 2017.

## 5.9. Muestras

Son también conocidas como *notching*, las cuales son una perturbación periódica causada por la operación normal de los equipos de electrónica de potencia cuando se conmuta la corriente de una fase a otra. Se percibe como pequeñas elevaciones o reducciones del valor instantáneo del voltaje, de manera periódica, que inciden en su contenido armónico. Estas se pueden caracterizar no solo por su contenido armónico, sino también por su profundidad y área.

Se producen principalmente por los rectificadores trifásicos, debido a que la conmutación de una fase a otra produce un cortocircuito momentáneo entre dos fases durante este período.

Figura 34. **Presencia de muescas en la red**



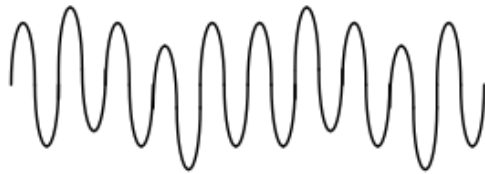
Fuente: SEYMOUR, Joseph. *The Seven Types of Power Problems*. p. 13.

## 5.10. Fluctuaciones de tensión

Es una variación sistemática de la envolvente del voltaje o una serie de cambios al azar del voltaje, sin exceder el rango de variación de 90 % a 110 % del valor nominal. Su efecto principal es el parpadeo o *flicker*, el cual es un fenómeno presente en los sistemas de iluminación producida por las lámparas

cuando el voltaje fluctúa. El término *flicker* no se debe usar en lugar de fluctuación de tensión.

Figura 35. **Fluctuación de tensión en la red**

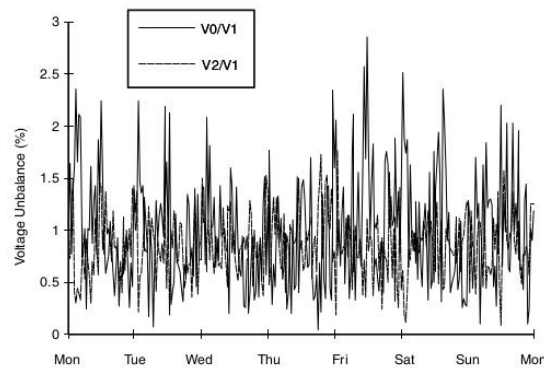


Fuente: SEYMOUR, Joseph. *The Seven Types of Power Problems*. p. 15.

### 5.11. Desequilibrio de tensión

Es un fenómeno en el cual las tres tensiones trifásicas difieren en amplitud o no están desfasadas  $120^\circ$  o ambas circunstancias a la vez. Su causa principal es la circulación de corrientes desequilibradas, fundamentalmente debidas a consumos monofásicos.

Figura 36. **Desequilibrio de tensión en la red**

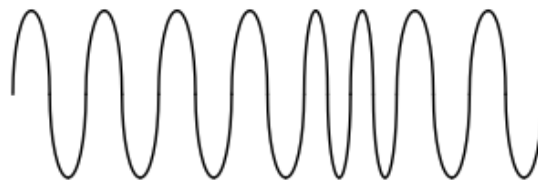


Fuente: DUGAN, Roger. *Electrical Power Systems Quality*. p. 25.

## 5.12. Variación de frecuencia

La frecuencia del sistema puede variar como resultado del desbalance entre la potencia activa generada y la potencia activa demandada, que origina cambios en la velocidad de los generadores síncronos. Muy pocas veces se produce una variación importante en la red de suministro, siendo estas más factibles en redes aisladas, por ejemplo: cuando se trabaja con generación propia, o en la industria textil, por la cogeneración, al quedarse en isla y se debe acomodar al consumo de la fábrica, se produce de manera transitoria una oscilación en la frecuencia.

Figura 37. **Variación de frecuencia en la red**



Fuente: SEYMOUR, Joseph. *The Seven Types of Power Problems*. p. 15.

## 5.13. Equipos de control de perturbaciones en la calidad de energía eléctrica

Debido al aumento en las tecnologías basadas en electrónica de potencia, se ha desarrollado una variedad de equipos que pueden ser utilizados para mitigar ya no solo una sino diferentes perturbaciones eléctricas en la red. Las medidas por tomar deben ser el resultado de un análisis técnico-económico de la problemática existente, teniendo en cuenta los costos y tiempo de los mantenimientos, la adecuada selección de los equipos antes de su adquisición,

el ajuste apropiado de las protecciones, así como el espacio que ocuparán las nuevas unidades de control.

Las soluciones podrán ser diferentes dependiendo si se desea asegurar la continuidad del suministro o la calidad de la onda; si se requieren soluciones individuales o acciones generalizadas. Los dispositivos que se listan en la tabla siguiente muestran las soluciones más habituales a los distintos tipos de perturbación.

Tabla XVI. **Equipos de control de perturbaciones de calidad de energía eléctrica y aplicaciones**

<b>Dispositivo</b>	<b>Aplicación</b>
Interruptor de transferencia estática ( <i>Static Transfer Switch</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protección contra huecos de tensión y <i>swells</i></li> </ul>
Limitador estático de corriente ( <i>Static Circuit Breaker</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitación de fallas de corriente.</li> <li>• Interrupción de circuito durante fallas.</li> </ul>
Compensador estático de distribución (D-STATCOM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balance de corriente de carga.</li> <li>• Compensación del efecto <i>flicker</i>.</li> <li>• Mejora en el factor de potencia.</li> <li>• Compensación de corrientes armónicas.</li> </ul>
Restaurador dinámico de voltaje (DVR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regulación de voltaje.</li> <li>• Atenuación de <i>flicker</i>.</li> <li>• Protección contra huecos de tensión y <i>swells</i>.</li> <li>• Balance de voltaje.</li> </ul>
Compensador unificado de calidad de potencia (UPQC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compensación de VAR</li> <li>• Supresión de armónicos</li> <li>• Balance de corrientes</li> <li>• Control de potencia reactiva y activa</li> <li>• Regulación y balance de voltaje</li> </ul>

Continuación de la tabla XVI.

Sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) estáticos o dinámicos Estabilizadores ferroresonantes (CVT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Huecos de tensión</li> <li>• Interrupciones breves</li> </ul>
Compensador unificado en serie o en derivación ( <i>Unified Series-shunt compensator</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compensación de huecos de tensión.</li> <li>• Reducción de <i>flicker</i>.</li> <li>• Mitigación de desbalance de voltaje.</li> <li>• Control de flujo de potencia.</li> <li>• Eliminación de armónicos.</li> </ul>

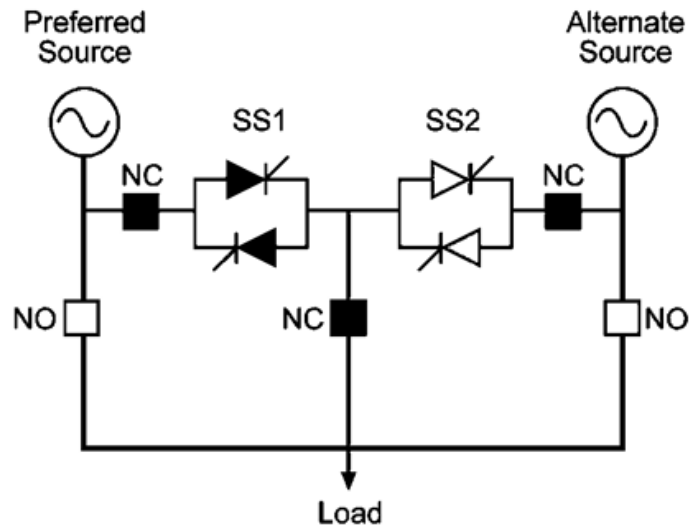
Fuente: elaboración propia.

### 5.13.1. Interruptor de transferencia estática (*Static Transfer Switch*)

Es un dispositivo compuesto por dos tiristores en la posición mostrada en la figura 38. Cada bloque consiste en tres tiristores correspondientes a las tres fases del sistema. En la figura se observa que el dispositivo contiene dos pares de tiristores conectados de forma inversa para permitir la transferencia de potencia de un alimentador fallado a un alimentador alterno en un tiempo de que no sobrepasa los milisegundos. De esta forma, el dispositivo puede servir para transferir la carga al otro alimentador cuando uno de ellos presente huecos de tensión o sobrevoltajes.

Estos dispositivos son efectivos para proteger cargas sensibles contra algunas perturbaciones de potencia, asegurando una transferencia rápida entre un alimentador donde se presente una falla, a uno que se encuentre disponible, reduciendo así impactos negativos en la carga por la conmutación. Las pérdidas en estos dispositivos son de no más del 1 % de la potencia de la carga.

Figura 38. Diagrama esquemático de un STS



Fuente: BAGGINI, Angelo. *Handbook of Power Quality*. p. 49.

### 5.13.2. DSTATCOM

Su nombre proviene de sus siglas en inglés que significa compensador estático síncrono de distribución. Es una fuente de voltaje controlada que se conecta a un nodo a través de una impedancia que es usualmente la impedancia del transformador de acoplamiento. Su modo de operación depende de si el voltaje generado por el compensador es menor que el voltaje del suministro, entonces el compensador funciona como una carga inductiva, demandando potencia reactiva de la red. Por otra parte, si el voltaje generado por el compensador es mayor que el de la red, el dispositivo actúa como un capacitor generando potencia reactiva para la red de suministro.

Los dispositivos DSTATCOM, son dispositivos que se conectan en derivación y pueden proveer buena calidad de energía eléctrica a la plana,

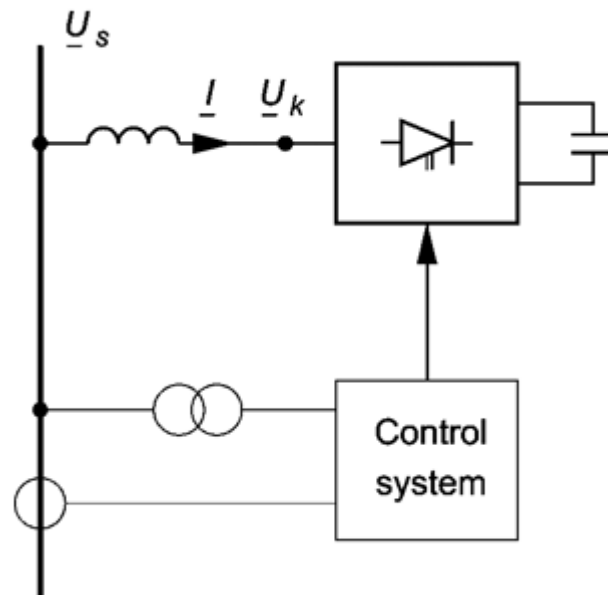


alimentadores y cargas. Estos dispositivos tienen el añadido que pueden ejecutar tareas complejas, como compensación de potencia reactiva, balance de cargas y filtro de armónicos. El elemento básico de estos equipos es el inversor de voltaje con modulación por ancho de pulsos en el cual se utilizan dispositivos semiconductores completamente controlados.

Unas de las características principales de estos dispositivos son las siguientes:

- Capacidad de realizar varias funciones al mismo tiempo.
- Capacidad de seguir cambios rápidos de carga.
- No se requieren componentes reactivos. El tamaño de estos compensadores es aproximadamente cuatro veces más pequeño que el de los sistemas de compensación estática de VAR (también conocidos como SVC por sus siglas en inglés).
- Su adaptación a condiciones de carga variables en un sistema de potencia es más fácil.

Figura 39. Diagrama esquemático de un DSTATCOM

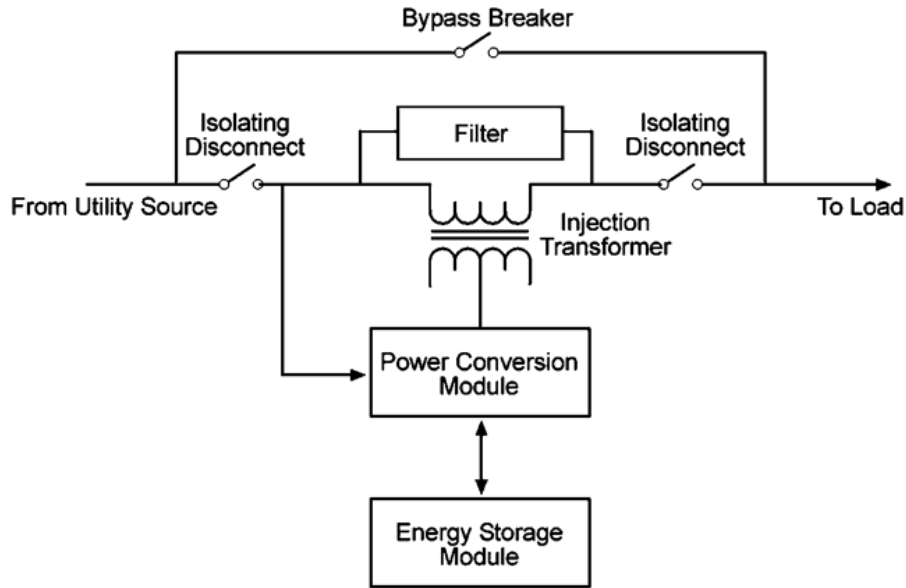


Fuente: Baggini, Angelo. *Handbook of Power Quality*. p. 180

### 5.13.3. *Dynamic Voltage Restorer (DVR)*

Es también llamado compensador estático en serie, es un dispositivo de control electrónico de potencia de conmutación de alta velocidad, el cual ha sido diseñado para inyectar un voltaje dinámicamente controlado en una magnitud y fase en la línea de distribución por medio de un transformador de acoplamiento para corregir la tensión de la carga.

Figura 40. Diagrama esquemático de un DVR



Fuente: Baggini, Angelo. *Handbook of Power Quality*. p. 48

Este dispositivo se conecta en serie, como una fuente externa de voltaje de amplitud controlada, frecuencia y ángulo de fase. El objetivo de utilizar un DVR es mantener la amplitud y ángulo de fase del voltaje de una carga fija. Estos dispositivos se han vuelto populares como una solución rentable para la protección de cargas sensibles de los *sags* y *swells*, así como para reducir la distorsión armónica debido a cargas no lineales en la red.

El DVR consiste en una fuente de almacenamiento de energía, un convertidor de corriente directa a corriente directa, un inversor de fuente de tensión, un filtro de corriente alterna y un transformador de acoplamiento conectado en serie. El banco de capacitores en corriente directa es utilizado como una fuente de almacenamiento de energía, en donde el convertidor regula el voltaje a través de la conexión del capacitor que utiliza como una fuente de

voltaje para los inversores. El inversor genera un voltaje de compensación, el cual es insertado en el sistema de distribución a través de un transformador.

En el caso de una irregularidad en el voltaje, los controles del dispositivo generan un voltaje de referencia y lo compara con el voltaje de la fuente para luego inyectar voltaje sincronizado para mantener el voltaje constante hacia la carga. Los dispositivos de almacenamiento de energía proveen la potencia requerida para el voltaje ingresado a la red. El filtro de corriente alterna supera los efectos sobre el devanado del transformador de acoplamiento y las pérdidas de conmutación de las técnicas de generación de señal de control para el inversor de fuente de tensión.

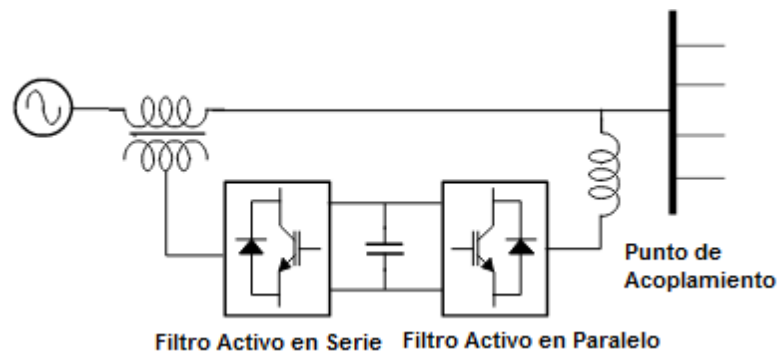
#### **5.13.4. Compensador unificado de calidad de potencia (UPQC)**

De sus siglas en inglés que significan *Unified Power Quality Compensator*, es una combinación de filtros activos que se conectan en serie y en derivación. La conexión en derivación del filtro activo para la compensación de corriente y el filtro activo de potencia conectado en serie permiten la mitigación de varios problemas en la red. Estos dispositivos tienen la capacidad para compensar problemas relacionados con voltaje y corriente a la vez.

El filtro activo de potencia en derivación compensa las perturbaciones de corriente, como las corrientes armónicas y el componente fundamental de la frecuencia el cual contribuye a la potencia reactiva de la carga. Este filtro debe controlar el voltaje del bus de corriente directa para poder asegurar la capacidad de compensación del dispositivo en general.

El filtro en serie compensa las perturbaciones relacionadas con voltaje, tales como los armónicos, sags o sobrevoltajes, los cuales pueden deteriorar la operación de la carga.

Figura 41. Diagrama esquemático de un UPQC



Fuente: MORENO, Victor. *Unified Power Quality Conditioner (UPQC) with Voltage Dips and Over-voltages Compensation Capability*. p. 294.

### 5.13.5. Sistemas de alimentación ininterrumpida estáticos (SAI)

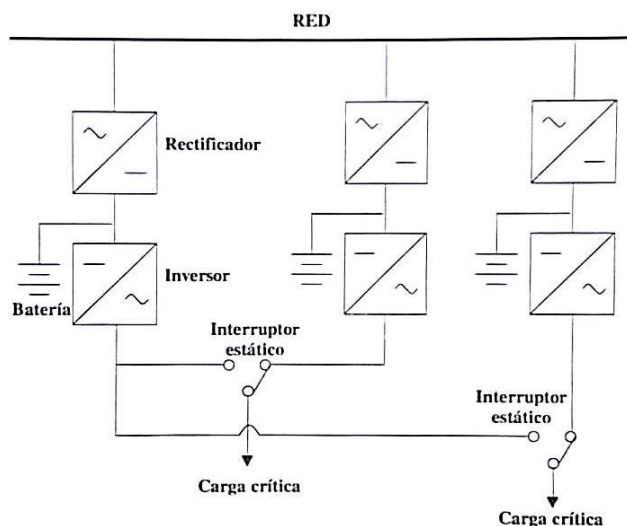
Son mayormente conocidos por sus siglas en inglés UPS (*Uninterruptible Power Supply*). Son sistemas que proveen energía automáticamente, sin retrasos ni transitorios, al momento que la fuente de tensión principal deja de funcionar. Dependiendo de las baterías de almacenamiento de energía utilizadas, estos sistemas tienen la capacidad de permitir autonomía de varios minutos.

Estos dispositivos están conformados principalmente por un rectificador, un inversor y baterías. También pueden incorporar filtros y estabilizadores en entornos donde se requieran aplicaciones especiales.

Se pueden agrupar cuando la seguridad de funcionamiento requerida no se alcanza con un solo módulo o en instalaciones donde la potencia de carga a cubrir es superior a 200 kVA, se pueden colocar varios módulos en paralelo.

En la figura siguiente se muestra un montaje dispuesto en paralelo, el cual cada módulo comparte la carga, pero se cuenta con un número suficiente para poder soportarla en caso de que alguna unidad falle.

Figura 42. Diagrama esquemático de varios SAI dispuestos en paralelo



Fuente: FUSTER, Vicente. *Las perturbaciones eléctricas y la industria textil, origen consecuencias y soluciones*. p. 129.

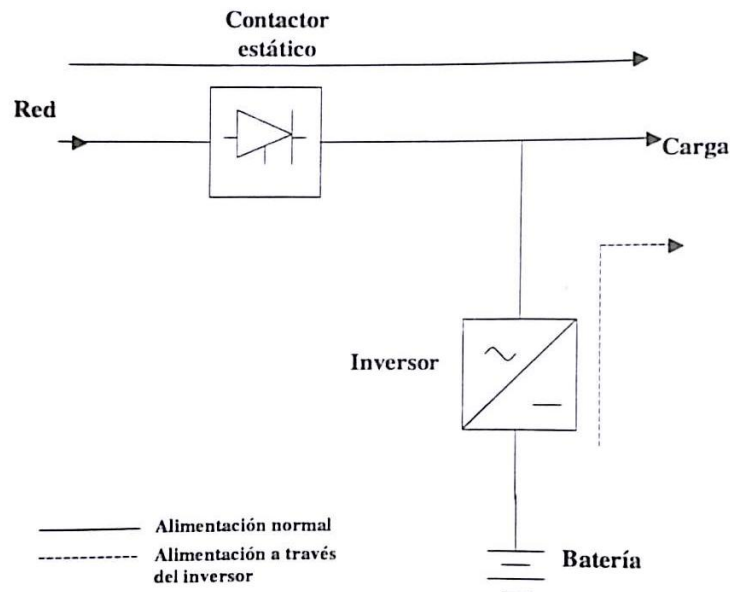
Se han desarrollado topologías diferentes:

- Pasivo en reserva (*Off-line*): se emplea para pequeñas potencias de menos de 2 kVA, para cargas poco críticas o sistemas de iluminación de emergencia. El arreglo consta de un diseño simple, a bajo costo, con un rendimiento alto y mayor fiabilidad que otros sistemas. El tiempo de

conmutación es corto, de menos de 10 ms, en el cual se genera un pequeño descenso transitorio de tensión. Cabe destacar que esta configuración es una buena opción para interrupciones, pero no ante sags, transitorios, variaciones de frecuencia o armónicos.

- Interactivo con línea (*line interactive*): es utilizado para cargas de mediana y gran potencia, con un rendimiento mayor que la configuración de doble conversión. Cuenta con un interruptor baipás para cuando el equipo requiera de mantenimiento. Tal como se observa en la figura 43, el contactor estático desconecta la carga al momento de una falla para que se alimente del sistema de alimentación ininterrumpida.

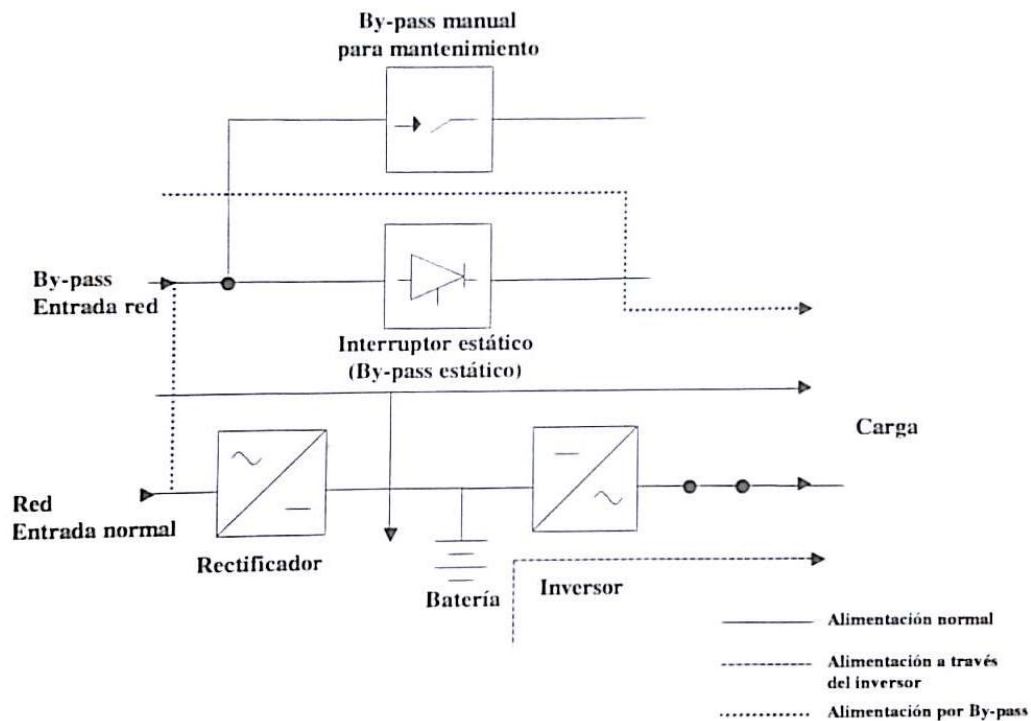
Figura 43. Disposición interactiva con línea de un SAI



Fuente: FUSTER, Vicente. *Las perturbaciones eléctricas y la industria textil, origen consecuencias y soluciones*. p. 126.

- Doble conversión (*on-line*): es la configuración que resulta ser más costosa, debido a que consta de dos módulos de conversión. Su rendimiento es menor al de las configuraciones anteriores, sin embargo, ofrece una alimentación de mayor calidad y su protección es continua, debido a que la carga queda aislada de la red. En la figura 44 se puede observar que consta de un baipás manual para mantenimiento y uno estático para desconectar al sistema de la red luego de una falla.

Figura 44. Disposición en doble conversión de un SAI



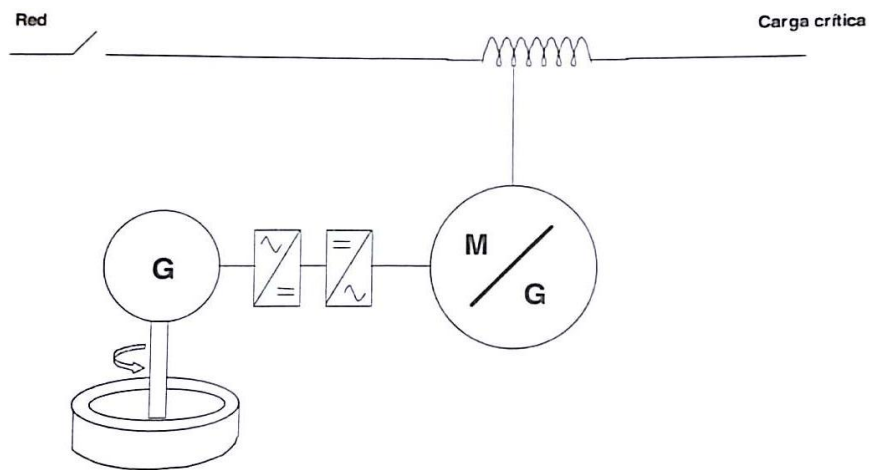
Fuente: FUSTER, Vicente. *Las perturbaciones eléctricas y la industria textil, origen consecuencias y soluciones*. p. 127.



### 5.13.6. Sistemas de alimentación ininterrumpida dinámicos

Su funcionamiento es igual al de los UPS estáticos, debido a que utiliza un sistema de almacenamiento de energía cinética en lugar de baterías, se emplea para interrupciones de corta duración. La energía almacenada puede cubrir desde 10 a 15 segundos, con un 100 % de su carga nominal, hasta 1 a 2 minutos dependiendo de la carga.

Figura 45. Diagrama de un SAI dinámico



Fuente: FUSTER, Vicente. *Las perturbaciones eléctricas y la industria textil, origen consecuencias y soluciones*. p. 131.

### 5.13.7. Estabilizadores ferroresonantes

Son transformadores especiales y robustos, con relación de transformación unidad. Son denominados por su nombre en inglés *Constant Voltage Transformer (CVT)*. Están diseñados para trabajar con el núcleo saturado, con una tensión de salida estable debido a la resonancia creada entre

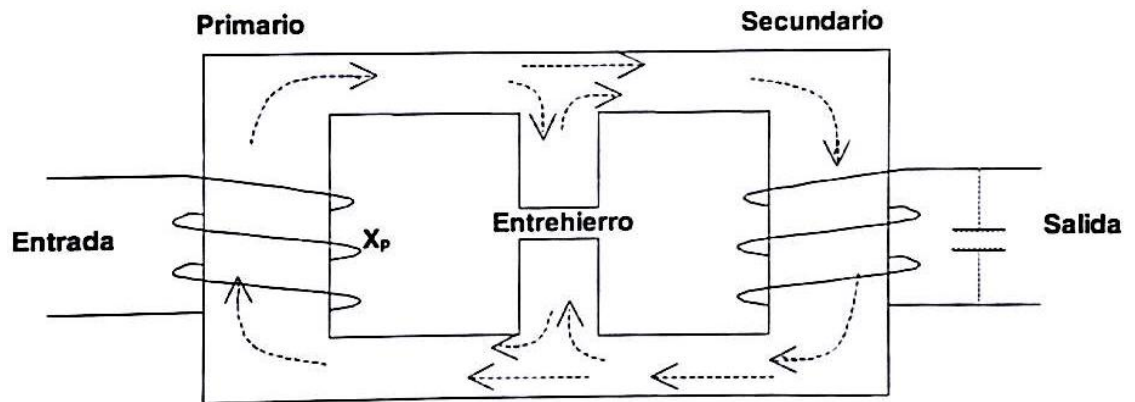
un condensador conectado a su arrollamiento secundario, en paralelo con la bobina formada por dicho secundario y arrollada sobre un núcleo saturado.

Al momento que una variación de intensidad producto de un cambio en la tensión del primario de aproximadamente 20 %, modifica nada más un valor cercano al 3 % de la tensión del secundario. Por ello estos equipos reducen la profundidad de los huecos de tensión que aparecen en el primario, aunque cabe destacar que su empleo ha disminuido debido a la aparición de sistemas que basan su funcionamiento en dispositivos semiconductores activos. Pueden ser utilizados en sistemas donde se requiere una fiabilidad elevada.

Estos transformadores requieren de un filtro en su salida, debido a su principio de funcionamiento, para aproximar la onda a la senoidal de salida en el secundario.

El empleo de este tipo de transformadores no es muy común para potencias superiores a 10 kVA, debido a que se recomienda elegir un transformador ferroresonante con una potencia cuatro veces superior a la potencia de la carga.

Figura 46. Transformador ferroresonante



Fuente: FUSTER, Vicente. *Las perturbaciones eléctricas y la industria textil, origen consecuencias y soluciones*. p. 132.

#### 5.13.8. Compensador unificado en serie-derivación

El *Unified Shunt Series Compensator* (USSC) es un filtro activo que compensa la potencia reactiva y armónicos de corriente y voltaje generados por la carga. Este utiliza un inversor de voltaje construido con dos transistores bipolares de puerta aislada conectados por una misma línea en corriente directa.

Es utilizado para regulación de voltaje, compensación de voltaje reactivo, reducción de *flicker* y mitigación de desbalances. Este dispositivo también puede ser utilizado en modo de sistema de alimentación ininterrumpida con capacidades de hasta algunos milisegundos.

Estos dispositivos presentan un mejor desempeño, especialmente en compensación de *sags* y control de flujo de potencia, y también proveen más

soluciones para calidad de energía comparados con los D-STATCOM y los DVR, tal como se muestra en la siguiente tabla:

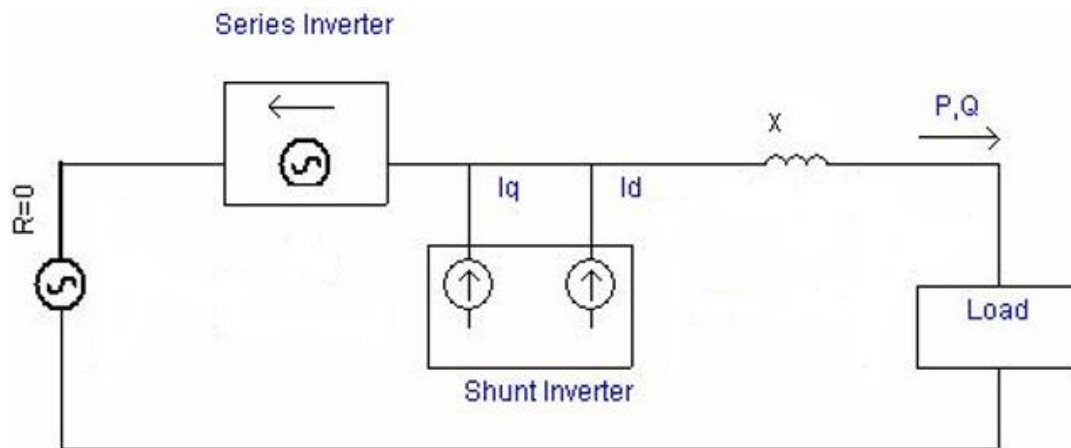
Tabla XVII. **Comparación de equipos control de calidad de energía eléctrica**

Mitigación de perturbaciones	DVR	D-STATCOM	USSC
Compensación de huecos de tensión	Sí	Limitada	Sí
<i>Flicker</i> de voltaje	No	Sí	Sí
Desbalance de voltaje	No	Sí	Sí
Modo UPS	Sí	Sí	Sí
Control de flujo de potencia	No	No	Sí

Fuente: elaboración propia.

El USSC se comporta como un inversor ideal de corriente alterna a corriente alterna (ac-ac), en el cual el intercambio de potencia real en la terminal de un inversor es a través del punto en corriente directa interconectado por un capacitor. Se debe notar que el inversor en derivación es controlado de tal manera que provee precisamente la cantidad de potencia real en su terminal en DC, para suplir las necesidades de potencia del inversor en serie y para regular el voltaje en corriente directa de la interconexión entre ambos.

Figura 47. Diagrama de conexión de un USSC



Fuente: ELSI, Sahaya. *Performance evaluation of custom Power devices for mitigating Power quality problems*. <http://hdl.handle.net/10603/49593>. Consulta: noviembre de 2017.

### 5.13.9. Protocolo IRIG-B

Una consideración adicional para un estudio de calidad de energía es el protocolo IRIG-B desarrollado por el *Inter-Range Instrumentation Group* (IRIG), es ampliamente utilizado en compañías eléctricas, instalaciones industriales para asegurar la precisa sincronización de dispositivos de sistemas de potencia, como interruptores, relés y medidores.

Este protocolo tiene una frecuencia de pulso de 100 pulsos por segundo con un recuento de índice de 10 milisegundos en su marco de tiempo de un segundo. Contiene información sobre el año y el año en formato decimal codificado en binario (BCD) y opcionalmente los segundos del día en números binarios que representan el total de segundos desde la media noche.

La estándar IRIG 200-04 no define niveles específicos de señal para IRIG-B. Debido a que la señal de IRIG-B se compone de una serie de impulsos, se necesita un osciloscopio digital para el diagnóstico; un multímetro estándar no es suficiente para confirmar la operación normal. Actualmente, existen en el mercado unos dispositivos portátiles llamados analizadores de IRIG-B, los cuales facilitan la verificación del funcionamiento del IRIG-B en el sistema de distribución. Estos equipos permiten verificar el tipo de IRIG-B, el funcionamiento correcto del código, los niveles de voltaje y el ancho de pulso para chequear la señal de IRIG-B.

Para facilitar la implementación del protocolo IRIG-B en aplicaciones de medición de calidad de energía, se puede considerar la adquisición de un equipo analizador de calidad de energía que ofrezca soporte para el protocolo ya sea de forma modulada o digital. El equipo utilizado para mediciones del presente documento no cuenta con soporte para este protocolo. Adicional a esto, en la instalación eléctrica no se cuenta con ningún dispositivo compatible para ser sincronizado por el protocolo en mención.

## CONCLUSIONES

1. Un estudio de calidad de energía basado en las NTSD, del lado del usuario, permite determinar el estado del factor de potencia, *flicker* y armónicos en su red, para luego compararlo con los límites aceptados en la norma y tomar decisiones para la mejora de la red y así evitar posibles sanciones.
2. El factor de potencia es una medida de eficiencia energética en una instalación eléctrica, dado que mientras más cercano a la unidad sea el factor, menos es el consumo nominal de corriente. Debido al efecto de los paneles solares y el banco de capacitores, la medida del factor de potencia no es menor al 0,90, que es el mínimo aceptado según la CNEE para instalaciones con potencias superiores a 11 kW.
3. El *flicker* es una variación de tensión de hasta el 10 % de la tensión nominal, el término no debe ser utilizado en lugar de fluctuación de tensión. El *flicker* resulta ser una molestia para el ser humano debido al parpadeo de la iluminación en las instalaciones eléctricas. Tal como se esperaba, el valor de *flicker* en la red no supera los límites debido a que la instalación eléctrica no cuenta con equipo que produzca esta perturbación.
4. Los armónicos de corriente son ondas que circulan en la red con frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental, 60 Hz en Guatemala. Las cargas no lineales son las principales causantes de armónicos en la red donde se realizó el estudio. La red estudiada cuenta con equipo de

cómputo, lámparas fluorescentes, plotters y motores que operan en diferente momento durante la jornada laboral. Todo esto en conjunto es el responsable de que los armónicos individuales y la distorsión armónica total se encuentren fuera de los límites.

5. Debido al creciente desarrollo de dispositivos semiconductores, se han desarrollado equipos capaces de mitigar varias perturbaciones de calidad de energía a la vez, los cuales presentan características novedosas y brindan soluciones más confiables para mantener la estabilidad en la red del usuario.



## RECOMENDACIONES

1. Para un estudio de calidad de energía basado en las NTSD se debe tomar en cuenta que la planificación es importante para ahorrar tiempo y que sea lo más objetivo posible.
2. La distorsión armónica total registrada en la corriente es un valor que debe tomarse en consideración para el correcto funcionamiento de la maquinaria que se tiene actualmente y la que se pretende instalar a futuro. En el mercado existen diversos equipos y dispositivos destinados a corregir los niveles de armónicos. Dependiendo de la necesidad de corrección de armónicos, se puede elegir entre equipos de gama alta o una solución sencilla y económica con filtros pasivos.
3. Para una mejora de la instalación eléctrica en general, se requiere de una asesoría por parte de un profesional en cuanto al tema de protecciones y cableado, ya que el estado actual de la instalación representa un riesgo por cualquier falla o cortocircuito en la red.
4. La instalación de los paneles solares permite el ahorro de energía eléctrica en la instalación, sin embargo se sugiere realizar un análisis costo beneficio de superar los 100 kW de consumo de potencia promedio para poder gozar de tarifas más adecuadas al tamaño de la instalación actual, convertirse en grandes usuarios.
5. Considerar un estudio con más detalle de los armónicos para determinar la corrección más viable y la incidencia que el banco de

capacitores junto con la red de paneles fotovoltaicos pueda estar generando, para asegurar mayor tiempo de vida útil de los equipos y del cableado. Debido a que esto supera el alcance de las NTSD y del presente documento; se debe utilizar como base otra norma para proponer posibles soluciones y métodos de control.

6. Para la aplicación de equipos de tecnología de punta en la instalación eléctrica, se debe realizar un estudio técnico-económico para determinar el equipo el más adecuado y de menor costo que podrá mitigar la mayor cantidad de perturbaciones que están afectando a la red y así evitar problemas a futuro derivados del crecimiento de la red del usuario.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AGEXPORT. *Acerca de Nosotros*. [en línea] <<http://export.com.gt/agexport/acerca-de/>> [Consulta: 10 de octubre de 2015].
2. BAGGINI, Angelo. *HandBook of Power Quality*. Italia: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 618 p.
3. BINGHAM, Richard. *Don't overlook the obvious*. [en línea]. <<http://dranetz.com/wp-content/uploads/2014/02/article-dont-overlook-obvious.pdf>> [Consulta: 10 de octubre de 2015].
4. BINGHAM, Richard. *The Crystal Ball of Power Quality*. [en línea]. <<http://dranetz.com/wp-content/uploads/2014/02/article-the-crystal-ball-powerquality.pdf>> [Consulta: 10 de octubre de 2015].
5. DUGAN, Roger. *Electrical Power Systems Quality*. 2da ed. USA: McGraw-Hill, 2003. 528 p.
6. El Mofty, A. *Industrial power quality problems*. Volumen 2. IET Conference Publications.
7. FUSTER, Vicente. *Las Perturbaciones Eléctricas y la Industria Textil, Origen Consecuencias y soluciones*. España: Iberdrola, 2001. 307 p.

8. GONZÁLEZ, Francisco. *Fundamentos Teóricos sobre armónicas*. 2da ed. Guatemala: Formación Siglo XXI, 1999. 170 p.
9. GOSH, Arindam. *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*. USA: Springer, 2002. 460 p.
10. Central America Data. *Guatemala: Mejora exportación de textiles*. [en línea] <[https://www.centralamericadata.com/es/article/home/Guatemala\\_Mejora\\_exportacin\\_de\\_textiles](https://www.centralamericadata.com/es/article/home/Guatemala_Mejora_exportacin_de_textiles)> [Consulta 9 de octubre de 2015].
11. HARPER, Gilberto. *El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica*. México: Limusa, 2008. 265 p.
12. HARPER, Gilberto. *La calidad de la energía en los sistemas eléctricos*. México: Limusa, 2006. 457 p.
13. MARKIEWICZ, Henryk. *Voltage Disturbances, Standard EN 50160 – Voltage Characteristics in Public Distribution Systems*. Polonia: Wroclaw University of Technology, 2004. 16 p.
14. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas Técnicas del Servicio y Distribución (NTSD)*. [en línea] <[http://www.cnee.gob.gt/estudios electricos/Normas%20Tecnicas/03%20NTSD.pdf](http://www.cnee.gob.gt/estudios-electricos/Normas%20Tecnicas/03%20NTSD.pdf)> [Consulta 10 de octubre de 2015].
15. SANKARAN, C. *Power Quality*. 1ra ed. USA: CRC Press, 2001. 216 p.

16. SEYMOUR, Joseph. *The Seven Types of Power Problems*. [en línea] <[http://www.apc.com/salestools/VAVR-5WKLPK/VAVR-5WKLPK\\_R1\\_EN.pdf](http://www.apc.com/salestools/VAVR-5WKLPK/VAVR-5WKLPK_R1_EN.pdf)> [Consulta: 27 de febrero de 2018].
17. SINGH, Bhim. *Power Quality: Problems and Mitigation Techniques*. USA: Wiley, 2015. 596 p.
18. The Dranetz-BMI Field. *Handbook for Power Quality Analysis*. 3a ed. USA: Edison, 2003. 283 p.
19. VESTEX. *Quiénes somos*. [en línea]. <<http://vestex.com.gt>> [Consulta: 8 de octubre de 2015].



## APÉNDICE

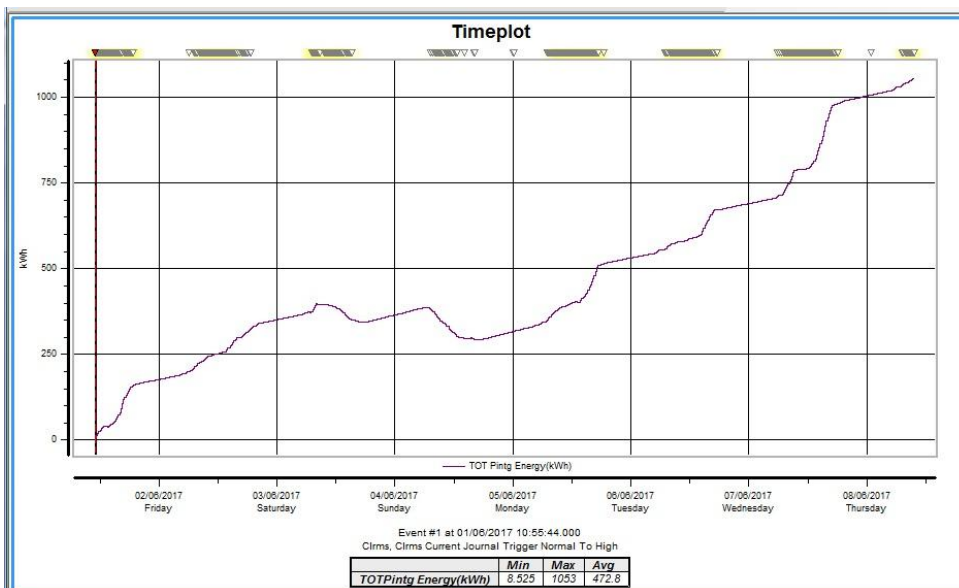
### Apéndice 1. Cálculo de la indemnización que la empresa pagaría por sobrepasar el límite de armónicos

Según la Norma de Coordinación Comercial No.4 del AMM, se adopta un CENS igual a 10 (diez) veces el cargo unitario por energía de la tarifa simple para usuarios conectados en baja tensión sin cargo por demanda de la ciudad de Guatemala.

Cargo unitario por energía a la fecha del estudio: 0,703155 Q/kWh

Por lo tanto, el CENS es igual a: 7,0315

El consumo de energía registrado durante el período de medición (7 días) es de 1053 kWh.



Basado en las ecuaciones mostradas en el capítulo 3, el DPIAk que se obtiene es de 8,70 y la energía de 8,525 kWh para el primer un intervalo de medición. Por lo tanto, se aplica la siguiente fórmula para calcular la sanción en cada intervalo de medición, tomando en cuenta que ya se han filtrado los valores donde el DPIAk es menor a cero:

$$=SI(DPIAk < 1,7.0315 * \text{Energía (en intervalo k)}^2 * DPIAk, 7,0315)$$

Se debe notar que existe un error en el criterio para la valorización de la energía consumida. A continuación, se escriben los valores que se consideran correctos:

Si:  $0 < DPIAk \leq 1$ , utilizar:  $CENS * DPIAk^2$  Q/kWh

Si:  $DPIAk > 1$ , utilizar: CENS Q/kWh

Por lo tanto, el valor de la indemnización sería de:

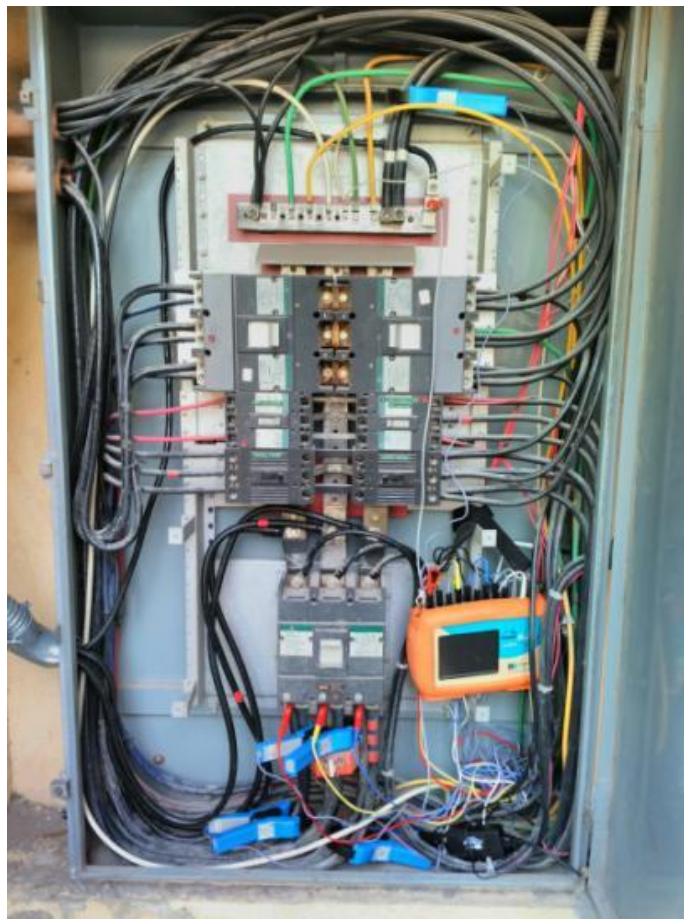
$$\text{Indemnización (Q)} = Q13\,490,25$$

Fuente: elaboración propia.



## ANEXOS

### Anexo 1. **Conexión del analizador de calidad de energía, Dranetz 4400, en el tablero principal**



Fuente: empresa Sports Adiction

Anexo 2. **Banco de capacitores instalado**



Fuente: empresa Sports Adiction

Anexo 3. **Factor de potencia máximo, según el medidor incluido en el banco de capacitores**



Fuente: empresa Sports Adiction

Anexo 4. **Parte de la vista de los paneles solares instalados**



Fuente: empresa Sports Adiction



Anexo 5. **Distorsión de onda de voltaje y corriente en las tres fases**



Fuente: empresa Sports Adiction

