



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

**PROCEDIMIENTO PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA
ELÉCTRICA EN EL SECTOR TEXTIL DE GUATEMALA PARA REDUCCIÓN
DE COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN ESTA INDUSTRIA**

Josué René Marroquín Juárez

Asesorado por el Ing. Francisco Javier González López

Guatemala, mayo de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROCEDIMIENTO PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA
ELÉCTRICA EN EL SECTOR TEXTIL DE GUATEMALA PARA REDUCCIÓN
DE COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN ESTA INDUSTRIA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSUÉ RENÉ MARROQUÍN JUÁREZ

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELÉCTRICO

GUATEMALA, MAYO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

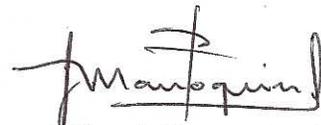
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Morataya Ramos
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

PROCEDIMIENTO PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA EN EL SECTOR TEXTIL DE GUATEMALA PARA REDUCCIÓN DE COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN ESTA INDUSTRIA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha enero de 2011.



Josué René Marroquín Juárez

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 15 de Noviembre de 2011.

Ingeniero Romeo Nefalí López Orozco
Coordinador Área de Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Estimado Ingeniero:

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado:
**PROCEDIMIENTO PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA
ELECTRICA EN EL SECTOR TEXTIL DE GUATEMALA PARA REDUCCION
DE COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN ESTA INDUSTRIA,**
elaborado por el estudiante Josué René Marroquín Juárez.

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobación, e indicarle que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Atentamente

Ing. Francisco Javier González López
Jefe de laboratorio de Metrología Eléctrica
Centro de Investigaciones
Asesor





Ref. EIME 12. 2012
Guatemala, 21 de MARZO 2012.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**PROCEDIMIENTO PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA
POTENCIA ELÉCTRICA EN EL SECTOR TEXTIL DE
GUATEMALA PARA REDUCCIÓN DE COSTOS DE OPERACIÓN
Y MANTENIMIENTO EN ESTA INDUSTRIA,** del estudiante
Josué René Marroquín Juárez, que cumple con los requisitos
establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Romeo Neñali López Orozco
Coordinador de Electrotécnica



RNLO/sro



REF. EIME 14. 2012.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Josué René Marroquín Juárez titulado: **PROCEDIMIENTO PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA EN EL SECTOR TEXTIL DE GUATEMALA PARA REDUCCIÓN DE COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN ESTA INDUSTRIA**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 21 DE MARZO 2012.



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: **PROCEDIMIENTO PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA EN EL SECTOR TEXTIL DE GUATEMALA PARA REDUCCIÓN DE COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN ESTA INDUSTRIA**, presentado por el estudiante universitario **Josué René Marroquín Juárez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paz Becinos
Decano



Guatemala, mayo de 2012

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios, nuestro Padre eterno

De quien proviene toda sabiduría y entendimiento, gracias por permitirme alcanzar este logro en mi vida.

Mis padres

René Marroquín y Flor de María Juárez, por su apoyo, comprensión, sabios consejos y todo el amor brindado. Hoy les hago entrega de este triunfo que no es sólo mío, sino de ustedes.

Mis hermanos y hermanas

Gutty, Carlos, Ricardo, Edmy y Flor de María, que este triunfo sea un ejemplo y motivación para ustedes.

Mis familiares

Tíos, primos, abuelos, por su apoyo.

Mi asesor

Ing. Francisco González, por su apoyo, colaboración, tiempo e instrucción en este trabajo.

Mis amigos y amigas

Por su apoyo, ánimo, consejos y por estar en los momentos importantes de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. LA INDUSTRIA TEXTIL EN LA ECONOMÍA GUATEMALTECA.....	1
1.1. Asociación Guatemalteca de Exportadores (AGEXPORT).....	2
1.1.1. Los objetivos de AGEXPORT.....	3
1.1.2. Áreas de trabajo de AGEXPORT.....	3
1.2. Comisión de la Industria de Vestuario y Textiles (VESTEX).....	3
1.2.1. Comisiones de VESTEX.....	4
1.2.2. Visión del sector para el 2015.....	4
2. CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA Y COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA.....	5
2.1. Definición de calidad de la potencia eléctrica.....	6
2.1.1. Tres perspectivas de la calidad de la potencia eléctrica.....	7
2.1.2. Puntos de vista de los usuarios y de las empresas del suministro eléctrico.....	8
2.2. Compatibilidad electromagnética (CEM).....	9
2.2.1. ¿Qué es la compatibilidad electromagnética (CEM)?...	9

2.2.2.	Aspectos claves de la compatibilidad electromagnética.....	10
3.	PARÁMETROS DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA.....	11
3.1.	¿Quién es el responsable de la calidad de la potencia?.....	12
3.2.	Distorsión armónica.....	13
3.2.1.	Distorsión armónica en el voltaje.....	14
3.2.2.	Distorsión armónica en la corriente.....	16
3.3.	<i>Flicker</i>	18
3.3.1.	Índices de evaluación del <i>flicker</i>	19
3.3.1.1.	<i>Flicker</i> de breve término (Pst).....	20
3.3.1.2.	<i>Flicker</i> de largo término (Plt).....	20
3.4.	Potencia eléctrica.....	23
3.4.1.	Factor de potencia (fdp).....	23
3.5.	Desbalance de tensión en servicios trifásicos.....	25
3.6.	Desbalance de corrientes.....	27
4.	REGLAMENTOS Y NORMAS TÉCNICAS INTERNACIONALES.....	29
4.1.	¿Por qué limitar la calidad de la potencia eléctrica?.....	30
4.2.	Diferencias entre un reglamento y una norma técnica.....	31
4.3.	Normas técnicas.....	33
4.3.1.	International Electrotechnical Commission (IEC).....	34
4.3.1.1.	IEC 61000-4-30.....	36
4.3.1.2.	¿A qué se refiere un instrumento clase A?..	36
4.3.2.	Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y American National Standards Institute (ANSI).....	37
5.	ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA.....	39
5.1.	Introducción.....	40

5.2.	¿En qué consiste un estudio de la calidad de la potencia eléctrica?.....	41
5.3.	Objetivos del estudio de la calidad de la potencia eléctrica.....	43
5.4.	Identificación de oportunidades y eficiencia de la energía eléctrica en la empresa.....	43
5.5.	El rol del ingeniero eléctrico.....	44
5.6.	Equipos de medición y registro de datos.....	45
5.7.	El analizador de redes eléctricas.....	45
6.	CASO PRÁCTICO.....	47
6.1.	Resumen del estudio de la calidad de la potencia eléctrica en una industria textil.....	47
6.1.1.	Presentación del informe.....	47
6.2.	Detalle de la medición.....	47
6.3.	Resultados.....	49
6.3.1.	Análisis de la regulación y el desbalance de voltaje...	49
6.3.2.	Análisis del desbalance de la corriente eléctrica.....	54
6.3.3.	Análisis de la frecuencia de la red.....	57
6.3.4.	Análisis de la potencia activa trifásica.....	58
6.3.5.	Análisis de la potencia activa, reactiva y aparente.....	60
6.3.6.	Análisis del factor de potencia.....	62
6.3.7.	Análisis de <i>flicker</i> según el índice Pst.....	65
6.3.8.	Análisis de <i>flicker</i> según el índice Plt.....	66
6.3.9.	Análisis del THD para el voltaje.....	67
6.3.10.	Análisis del THD para la corriente.....	68
6.3.11.	Análisis de transitorios de voltaje.....	69
6.3.12.	Análisis de <i>sags</i> y de <i>swells</i>	70
6.3.13.	Recomendaciones presentadas en el informe... ..	71

7.	SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA.....	73
7.1.	Corregir el factor de potencia.....	73
7.1.1.	Compensación individual.....	75
7.1.2.	Compensación individual en motores eléctricos.....	75
7.1.3.	Compensación individual en transformadores de distribución.....	76
7.1.4.	Compensación en grupo.....	76
7.1.5.	Compensación central con banco automático.....	77
7.2.	Reducción de corrientes armónicas.....	78
7.2.1.	Filtros pasivos.....	80
7.2.2.	Filtros activos.....	81
7.3.	Supresor de transientes.....	82
8.	MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE ENERGÍA BAJO EL ESTÁNDAR IEC 61000-4-30.....	83
8.1.	¿Qué es la IEC 61000-4-30 clase A en un medidor de la calidad de energía?.....	83
8.1.1.	Los requisitos de la clase A.....	85
8.2.	Medición de <i>flicker</i> en redes eléctricas.....	87
8.2.1.	Introducción al índice de severidad PST del fenómeno del <i>flicker</i> de tensión.....	87
8.2.2.	Primera etapa: desmodulación.....	88
8.2.3.	Segunda etapa: proceso lámpara - ojo - cerebro.....	90
8.2.4.	Tercera etapa: procesamiento estadístico.....	91
8.3.	Medición de la frecuencia de red.....	92
8.3.1.	<i>Zero xing</i> (cero alterno).....	93
8.3.2.	FFT.....	93
8.3.3.	Hilbert.....	94

8.4.	Lineamientos de la IEC61000-4-30 para la detección de eventos.....	95
8.4.1.	Resolución temporal.....	96
8.4.2.	Criterio de detección y caracterización de eventos....	96
8.4.3.	Subtensiones (<i>sags</i>).....	97
8.4.4.	Sobretensiones (<i>swells</i>).....	97
8.4.5.	Interrupciones (<i>dips</i>).....	98
8.5.	Medición de armónicas e interarmónicas.....	98
8.5.1.	Instrumental para medición de armónicas.....	99
8.6.	Requerimientos de la IEC.....	103
	CONCLUSIONES.....	105
	RECOMENDACIONES.....	107
	BIBLIOGRAFÍA.....	109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	La industria textil en Guatemala.....	1
2.	El analizador de redes y una onda de tensión distorsionada.....	5
3.	Frontera entre la empresa distribuidora y los usuarios.....	8
4.	Organizaciones que velan por la calidad de la potencia.....	11
5.	Onda sinusoidal pura afectada por su quinta armónica.....	13
6.	Clasificación del <i>flicker</i> instantáneo.....	22
7.	Distribución de frecuencias acumuladas.....	22
8.	Triángulo de potencias.....	24
9.	Organizaciones internacionales de normalización.....	29
10.	Proceso para realizar un estudio de la calidad de la potencia.....	39
11.	Analizador de redes eléctricas Unilyzer 901 clase A.....	46
12.	Configuración para 4 cables de medición.....	48
13.	Tensión por fase.....	50
14.	Desbalance de voltajes.....	51
15.	Gráfico de duración para el voltaje.....	52
16.	Voltaje para el estudio realizado.....	53
17.	Corriente por fase.....	54
18.	Magnitud de la corriente vs duración.....	55
19.	Corriente para el estudio realizado.....	56
20.	Frecuencia del sistema eléctrico.....	57
21.	Frecuencia en porcentaje de la frecuencia nominal.....	58
22.	Potencia activa total trifásica.....	59
23.	Potencia trifásica total.....	60

24.	Factor de potencia total.....	61
25.	Factor de potencia por fases.....	62
26.	Gráfico/duración del factor de potencia.....	63
27.	Factor de potencia.....	64
28.	<i>Flicker</i> según el índice Pst.....	65
29.	<i>Flicker</i> según el índice Plt.....	66
30.	Distorsión armónica en el voltaje.....	67
31.	Distorsión armónica en la corriente.....	68
32.	Transientes por fase.....	69
33.	<i>Sags</i> y <i>swells</i> por fase.....	70
34.	Banco de capacitores para corregir el fdp.....	73
35.	Tipos de instalación de banco de capacitores.....	74
36.	Diferentes combinaciones de filtros.....	79
37.	Configuraciones básicas de filtros pasivos.....	80
38.	Estructura y forma de onda de un filtro activo de corriente.....	81
39.	Standard IEC 61000-4-30.....	83
40.	Modulación cuadrada.....	89
41.	Modulación sinusoidal.....	90
42.	Técnicas de estimación de la frecuencia.....	95
43.	Oscilograma de 1 ciclo.....	100
44.	Amplitudes armónicas.....	100
45.	Oscilograma de 2 ciclos.....	101
46.	Amplitudes armónicas.....	101
47.	Oscilograma con 10 ciclos.....	102
48.	Amplitudes armónicas.....	102

TABLAS

I.	Distorsión armónica individual de tensión por orden de armónica..	15
II.	Distorsión armónica individual de corriente por orden de armónica.....	17
III.	Tolerancias para el <i>flicker</i> generado por el usuario.....	23
IV.	Valor mínimo para el factor de potencia.....	25
V.	Tolerancias para el desbalance de tensión.....	27
VI.	Resumen de diferencias entre normas técnicas y reglamentaciones técnicas.....	32
VII.	Resumen del contenido entre normas técnicas y reglamentaciones técnicas.....	32
VIII.	Estructura de la serie IEC 61000.....	35
IX.	Resumen de las normas IEC relacionadas con PQ.....	35
X.	Resumen de las normas IEEE relacionadas con la calidad de la potencia eléctrica.....	38
XI.	Análisis del voltaje en las fases.....	49
XII.	Distribución de energías.....	61

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
kVA	Kilo voltamperio
kVA_r	Kilo voltamperio reactivo
kW	Kilo watt
P	Potencia activa
PU	Valor por unidad
Q	Potencia reactiva
S	Potencia aparente

GLOSARIO

AGEXPORT	Asociación Guatemalteca de Exportadores.
Analizador PQ	Equipo utilizado en un estudio de la calidad de la potencia eléctrica, permite medir y almacenar los valores relacionados con los parámetros tales como <i>flicker</i> , armónicas, potencias, transientes, voltaje, corriente, etc.
ANSI	American National Standard Institute (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares).
Armónicas	Son distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, se les llama así a las componentes de la onda distorsionada que son múltiplos de la frecuencia fundamental.
CEM	Compatibilidad electromagnética.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
DATI	Distorsión armónica total de corriente.
DATT	Distorsión armónica total de tensión.
Factor de potencia	Relación entre la potencia activa P y la potencia aparente S.

FDP	Factor de potencia.
<i>Flicker</i>	Percepción de la variación de la luminosidad de una lámpara, ocasionada por fluctuaciones de tensión en la red de alimentación eléctrica, originando en quien lo perciba una sensación de molestia.
<i>Flicker meter</i>	Aparato medidor de <i>flicker</i> el cual permite conocer el nivel de sensación que experimentaría un observador, medido en el punto de la red en que se conecte el equipo de medición. Proporciona sus medidas en unidades de perceptibilidad.
IEC	International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional).
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos).
NTCSTS	Normas técnicas de calidad del servicio de transporte y sanciones.
NTSD	Normas técnicas del servicio de distribución.
PST	<i>Perceptibility short term</i> (Perceptibilidad de breve término).
PQ	<i>Power quality</i> (Calidad de la potencia eléctrica).

PLT	<i>Perceptibility long term</i> (Perceptibilidad de largo término).
PWM	<i>Pulse width modulation</i> (Modulación de anchura de pulso).
PYMES	Pequeñas y medianas empresas.
RMS	<i>Root mean square</i> (Valor eficaz).
Sags	Variaciones de tensión (caídas de corta duración) que normalmente son causadas por condiciones de falla, energización de cargas que requieren altas corrientes de arranque o la pérdida intermitente de las conexiones en el cableado de potencia.
Subarmónicas	Componentes de la onda sinusoidal a frecuencias que están por debajo de la frecuencia fundamental. Por ejemplo, si la frecuencia fundamental es 60 Hz, las subarmónicas corresponden a 30 Hz (1/2) y 15 Hz (1/4).
Swells	Sobretensiones de corta duración, son incrementos en más del 10% de la tensión RMS a la frecuencia del sistema por tiempos desde 0,5 ciclos hasta 1 min. Los valores típicos son de 1,1 hasta 1,8 pu.
THD	<i>Total harmonic distortion</i> (Distorsión armónica total).

Transiente

Perturbación del subciclo en la forma de onda AC que es evidenciado por una discontinuidad abrupta y breve (< 2 ms típico) de la forma de onda. Sea de cualquier polaridad y puede ser sumado o restado a la forma de onda nominal (Ref. IEEE Std. 1100-1992).

VESTEX

Asociación de vestuario y textil.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación contiene el procedimiento teórico y práctico para poder realizar un estudio de la calidad de la potencia eléctrica, según se describe en las normas nacionales y los estándares internacionales que definen la calidad de la potencia eléctrica y los valores tolerables de los parámetros eléctricos, aunque la mayoría de las actividades que se describen para efectuar este tipo de estudio son aplicables a cualquier industria, empresa y sistema, este trabajo tiene un enfoque en la industria textil guatemalteca.

Un estudio de la calidad de la potencia eléctrica es la herramienta sobre la que se asienta un plan estructurado de ahorro eléctrico. Dicho estudio implica obtener información sobre los parámetros eléctricos, analizarlos, clasificarlos, proponer alternativas para corregir los problemas existentes, cuantificar ahorros y ejecutar las acciones que permitan tener un sistema eléctrico confiable.

Este trabajo de graduación está dividido en ocho capítulos:

En el capítulo 1 se presenta la industria textil guatemalteca, como uno de los sectores más desarrollados y de mayor auge, no solo a nivel nacional sino también, a nivel internacional, debido a esto es uno de los consumidores de energía eléctrica más fuertes en Guatemala, de tal manera que se presentan los problemas generales en cuanto a la calidad de la potencia eléctrica en este sector.

En el capítulo 2 se presenta la importancia de la calidad de la potencia eléctrica, indicando que para tener un sistema eléctrico confiable no es imprescindible eliminar cualquier tipo de perturbación, sino que basta con mantenerla dentro de los límites estandarizados, además; se introduce el concepto de la compatibilidad electromagnética que corresponde a la capacidad o aptitud de un equipo para no degradarse o afectarse, ni afectar a otros equipos por una perturbación electromagnética, bien sea radiada o conducida.

En el capítulo 3 se describen los parámetros eléctricos que sirven de referencia para determinar si existe o no calidad de la potencia eléctrica en un sistema, se enumeran y definen aquellos parámetros que están sujetos a sanciones y que generalmente ocasionan problemas en la red, se indican los reglamentos y leyes vigentes actualmente en el país y se presentan los valores estandarizados para cada uno de estos parámetros eléctricos.

En el capítulo 4 se mencionan las normas y estándares internacionales relacionados con la calidad de la potencia eléctrica, normas que limitan los valores máximos y mínimos para los parámetros eléctricos, también las características técnicas de los equipos a utilizar en un estudio de la calidad de la potencia eléctrica. Se mencionan las instituciones que son responsables de la normalización y el enfoque que cada una de estas organizaciones tiene respecto a sus estándares.

En el capítulo 5 se presenta el procedimiento para realizar un estudio de la calidad de la potencia eléctrica, sus ventajas, objetivos y cada uno de los aspectos para poder desarrollarlo, se define además, la experiencia que ha de tener el auditor, de tal manera que dicha actividad cumpla con su objetivo primordial.

En el capítulo 6 se presenta el trabajo práctico realizado en una industria textil en la que se llevó a cabo un estudio de la calidad de la potencia eléctrica, se mencionan los parámetros analizados, los valores hallados para los parámetros eléctricos, los valores reglamentarios permitidos y un análisis de cada uno de los problemas encontrados.

En el capítulo 7 se mencionan algunos de los métodos usualmente utilizados para corregir o disminuir los problemas en cuanto a perturbaciones eléctricas, se presentan sus ventajas, desventajas y aplicaciones.

En el capítulo 8 se presenta el estándar IEC 61000-4-30, para definir las características de un medidor clase A, las consideraciones tomadas para la recopilación y análisis de los datos, finalmente; los métodos y algoritmos que se utilizan para realizar un estudio de la calidad de la potencia eléctrica.

OBJETIVOS

General

Definir el procedimiento teórico y práctico sobre la manera de realizar un estudio de la calidad de la potencia eléctrica en una industria textil.

Específicos

1. Identificar las causas que generan perturbaciones eléctricas con magnitudes mayores a las permitidas en la red eléctrica.
2. Proponer soluciones que eliminen o disminuyan los problemas con la mala calidad de la potencia eléctrica.
3. Conocer los reglamentos nacionales e internacionales que permitan mantener un sistema electromagnéticamente compatible.

INTRODUCCIÓN

Actualmente se tienen precios altos en el barril de petróleo con una tendencia cada vez mayor a ir en aumento, el colapso inmediato está al borde, esto se ve reflejado a nivel mundial y Guatemala no es la excepción, las repercusiones en la economía en general son grandes, sin ir más lejos se ve que cada día existe un aumento en el caso de los productos básicos, además, debido a que la producción de energía eléctrica en el país, está directamente relacionado con el tema del petróleo, según los informes del AMM indican que un 32% de la energía eléctrica generada es con bunker y un 7% con diesel, lo que conlleva a tener casi un 40% de la generación eléctrica nacional dependiente de tecnologías derivadas del petróleo para su operación, lo que implica un aumento considerable en el costo de la energía eléctrica.

El sector energético es una variable decisiva, en cuanto a medir el desarrollo económico en el país, en los últimos años se ha experimentado un aumento considerable en la demanda de la electricidad; sin embargo, la generación con fuentes renovables en Guatemala no ha tenido el mismo cambio, dado que respecto a años anteriores, la generación con plantas térmicas e hidroeléctricas disminuyó, y en el caso de la generación con plantas operadas con bunker y diesel aumentó, lo cual deja al país en una dependencia muy alta respecto al mercado del petróleo, lo que conlleva a que en un futuro inmediato exista un desequilibrio y, peor aún, un déficit en cuanto a generación se refiere.

En los países industriales, la industria utiliza entre la cuarta parte y un tercio del total de energía eléctrica consumida en el país. En los últimos años se ha visto un notable avance en la reducción del consumo de energía por parte de las industrias. Las empresas se han dado cuenta de que una de las maneras más eficaces de reducir costos y mejorar los beneficios es usar eficientemente la energía. El ahorro de energía eléctrica y la eficiencia energética, consiste en la optimización del consumo energético, cuyo objetivo es disminuir el uso de energía, pero produciendo los mismos resultados finales.

1. LA INDUSTRIA TEXTIL EN LA ECONOMÍA GUATEMALTECA

La industria textil en Guatemala es el sector económico que se dedica a la producción de ropa, tela, fibra y productos relacionados. Esta industria genera grandes cantidades de trabajo de una manera directa e indirecta, ya que el tipo de producto que fabrican es de consumo masivo, por lo que a nivel nacional tiene un peso bastante grande en lo referente a la economía.

Figura 1. **La industria textil en Guatemala**



Fuente: <http://www.todanoticia.com/9290/industria-textil-guatemala>. Consulta: marzo-2011.

Dada la importancia de las industrias en el territorio nacional con el propósito de sobresalir no solo en el ámbito guatemalteco, sino también, a nivel internacional, actualmente, existe un grupo que tiene como visión mantener a Guatemala como un país exportador.

1.1. Asociación Guatemalteca de Exportadores (AGEXPORT)

Es una organización sin fines de lucro, entidad privada, creada en 1982, que representa, promueve y desarrolla las exportaciones no tradicionales de las empresas guatemaltecas. Proporciona servicios de alto nivel de asistencia a los exportadores, al servicio de la comunidad empresarial en general, en las actividades de comercio internacional e inversiones, ya sea en Guatemala o en el extranjero.

AGEXPORT representa innovadores empresarios guatemaltecos y dinámicos que participan y compiten en los mercados mundiales, y también, a empresas que se estén preparando para exportar.

- **Visión**

“Desarrollo de Guatemala como un exportador mundial a través de la promoción de las exportaciones, basado en la competitividad, contribuyendo así al desarrollo económico y social de Guatemala”.

- **Misión**

“Promover el crecimiento de las exportaciones basadas en la competitividad, contribuyendo así al desarrollo social y económico de Guatemala de manera sostenible”.

1.1.1. Los objetivos de AGEXPORT

- Promover y apoyar el desarrollo de las exportaciones guatemaltecas.
- Proporcionar los servicios que contribuyen al desarrollo de la comunidad exportadora, así como para promover los nuevos empresarios a concentrar sus actividades en el mercado internacional.
- Promover el establecimiento de estrategias y políticas nacionales de fomento a las exportaciones.
- Apoyo a instituciones que trabajan en el comercio exterior y los que tienen estrechas relaciones con los países que importan productos guatemaltecos.
- Crear conciencia de los beneficios que los productos no tradicionales de exportación proporcionan al desarrollo económico y social de Guatemala.

1.1.2. Áreas de trabajo de AGEXPORT

- División de promoción y acceso a mercados
- División de servicios técnicos
- División de desarrollo

1.2. Comisión de la Industria de Vestuario y Textiles (VESTEX)

VESTEX forma parte de la Asociación Gremial de Exportadores de Productos no Tradicionales (AGEXPORT), entidad privada, no lucrativa, fundada en mayo de 1982 con la visión de hacer de Guatemala un país exportador y la misión de promover el crecimiento de las exportaciones basados en la competitividad, contribuyendo así al desarrollo económico y social de Guatemala en forma sustentable.

Tiene por objetivo promover y desarrollar las exportaciones de vestuario y textiles, prestar servicios a los exportadores de estos productos, así como representar a sus miembros ante instituciones públicas o privadas nacionales o extranjeras vinculadas con ésta.

1.2.1. Comisiones de VESTEX

- Relaciones gubernamentales
- Capacitación laboral
- Promoción comercial y mercadeo
- Inversión
- Negociación y administración de tratados

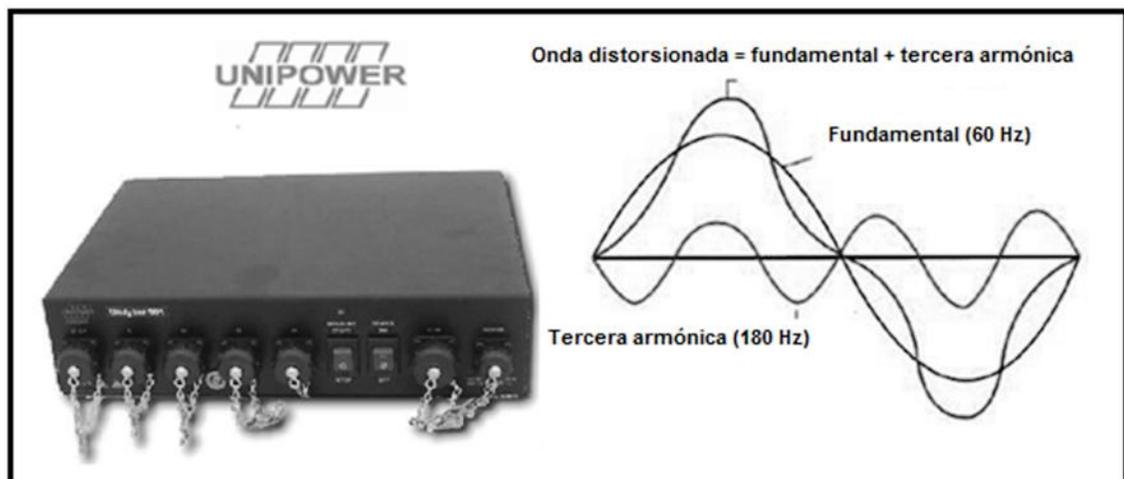
1.2.2. Visión del sector para el 2015

El sector de vestuario y textiles es percibido nacional e internacionalmente como un sector competitivo y responsable, por su versatilidad y flexibilidad en atender y responder rápidamente, con calidad y los servicios que satisfacen las necesidades de sus clientes, porque conoce las necesidades de los consumidores finales, ofreciendo productos con diseño y valor agregado.

2. CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA Y COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA

El problema de la mala calidad de la onda de tensión, afecta tanto a las instalaciones eléctricas industriales, máquinas, equipos de comunicaciones como a personas; es bastante difícil poder disponer de una red libre de perturbaciones. Muchas veces la solución del problema está fuertemente condicionada por su parte económica; por lo que, tanto las compañías como los consumidores tienen que llegar a un compromiso entre lo técnicamente deseable y lo económicamente posible; no obstante, en los planteamientos económicos es preciso tener en cuenta, también, el ahorro energético y la vida útil de los propios equipos. En la figura 2 se presenta la forma de onda de tensión distorsionada como consecuencia de las armónicas en la red eléctrica.

Figura 2. El analizador de redes y una onda de tensión distorsionada



Fuente: elaboración propia.

2.1. Definición de calidad de la potencia eléctrica

La calidad de la potencia eléctrica consiste en asegurar que dentro de un sistema eléctrico cada uno de los parámetros y propiedades eléctricas estén dentro de los límites estandarizados permitidos, de tal manera que los elementos que hagan uso de estos parámetros puedan funcionar correctamente.

Otra definición de calidad de la potencia eléctrica, es tener niveles aceptables de las desviaciones de la energía que alimenta a un sistema, asegurando con ello una operación confiable.

Considerando básicamente los siguientes parámetros:

- La continuidad de servicio
- La variación en el voltaje y la magnitud
- Transitorios de voltaje y corrientes
- Armónicas contenidas en la forma de onda

Para poder afirmar que se cuenta con una buena calidad eléctrica hay cuatro condiciones que deben cumplirse:

- Debe existir un suministro eléctrico continuo (sin interrupciones)
- El valor del voltaje eléctrico debe encontrarse en los rangos permisibles
- La frecuencia de la energía debe ser estable
- Y por último, la energía eléctrica debe ser lo más cercano a una forma de onda sinusoidal pura

2.1.1. Tres perspectivas de la calidad de la potencia eléctrica

El problema de la calidad de la potencia eléctrica puede ser visto desde tres perspectivas diferentes, según el servicio que se contrata, el servicio que se presta y los equipos que se tienen. La primera de ellas, es la que corresponde al lado de los consumidores después del medidor, y es el impacto de los disturbios en los equipos. La segunda, también del lado de los consumidores, es que los fabricantes de equipos deben conocer los niveles de estos disturbios y la frecuencia con que ocurren, para así determinar una tolerancia razonable para sus equipos. La tercera que concierne a ambos lados del medidor, es cómo los disturbios ocasionados por un consumidor afectan a otros consumidores que están conectados a la misma red de suministro.

La compañía de suministro no puede darse el lujo de suponer que provee una excelente calidad de energía, ya que algunos de los disturbios quedan fuera del control de la empresa. Por ejemplo: no puede tener el control de que una descarga atmosférica no caiga sobre, ni en las cercanías de una línea de transmisión, o no puede evitar que algún desperfecto en algún equipo genere una interrupción de energía.

Basados en el conocimiento de diseño y en el área eléctrica, los fabricantes deben diseñar y construir equipos que puedan resistir niveles razonables de disturbios. Los usuarios de equipo sensible a los disturbios pueden escoger entre dos opciones para eliminarlos, o al menos reducirlos:

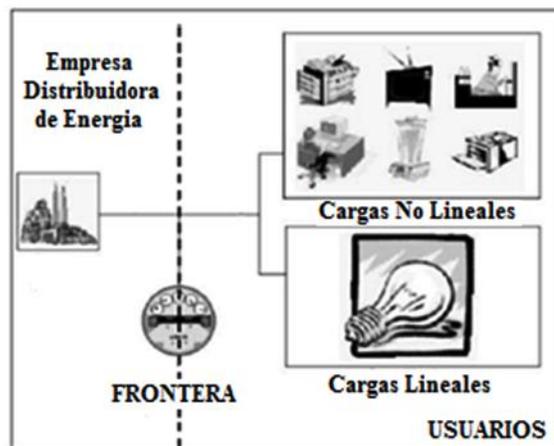
- Hacer un buen diseño del circuito de distribución
- Utilizar equipo de acondicionamiento y reducción de estos disturbios

2.1.2. Puntos de vista de los usuarios y de las empresas del suministro eléctrico

Las empresas eléctricas son las responsables de mantener un nivel estable de la tensión hasta el medidor de energía, es decir, hasta el equipo de facturación. Este equipo señala la frontera entre la empresa distribuidora y el inicio de las instalaciones de los usuarios. El mantenimiento y operación de las instalaciones después del medidor de energía son responsabilidad del usuario. Frecuentemente, cuando ocurren perturbaciones de la tensión, se culpa a la empresa de servicio eléctrico, sin verificar si el problema es interno.

De acuerdo con estudios recientes, más del 70% de las perturbaciones eléctricas son originadas dentro de las instalaciones de los usuarios. Las causas son muy diversas: diseños inadecuados de las redes eléctricas; sistemas de tierra deficientes; conexión de cargas que inducen perturbaciones en la red eléctrica, etc.

Figura 3. Frontera entre la empresa distribuidora y los usuarios



Fuente: ABREU M., Agosto. *Manual de la calidad de la potencia*. p. 27.

2.2. Compatibilidad electromagnética (CEM)

Las interferencias electromagnéticas son señales que perturban el funcionamiento normal de un sistema eléctrico o electrónico, estas interferencias afectan la tensión, corriente y el campo electromagnético de los circuitos. Estas crean un problema a los equipos ya que alteran su funcionamiento, incapacitándolos para realizar la misión para la que fueron diseñados.

Uno de los factores que influyen en este tipo de dificultades es que los equipos en uso interfieren unos con otros, en su entorno electromagnético. Si todos los dispositivos pudieran coexistir en armonía, se generaría un entorno electromagnéticamente compatible. La adición, de un equipo sin que se produzca interferencia electromagnética (IEM), significa entonces que el dispositivo tiene la propiedad de ser electromagnéticamente compatible.

2.2.1. ¿Qué es la compatibilidad electromagnética (CEM)?

Es la capacidad o aptitud de un equipo para no degradarse o afectarse, ni afectar a otros equipos por una perturbación electromagnética bien sea radiada o conducida. Un término clave relacionado con la compatibilidad electromagnética es el nivel de compatibilidad que no es más que el nivel de perturbación electromagnética usado como referencia en un entorno específico para la coordinación en el ajuste de las emisiones y límites de inmunidad, por convención este nivel de compatibilidad es seleccionado, para obtener sólo una pequeña probabilidad de que sea excedido por el nivel de perturbación real.

2.2.2. Aspectos claves de la compatibilidad electromagnética

- Funcionamiento satisfactorio: significa que el dispositivo es tolerable con los otros, es decir, no es susceptible a perturbaciones electromagnéticas
- No introducir perturbaciones intolerables: significa que el dispositivo no molesta a los otros, es decir, no genera perturbaciones electromagnéticas

Para que una perturbación electromagnética constituya un suceso potencialmente perjudicial, dependerá de estos factores:

- El nivel de la perturbación: magnitud y forma de onda, rango de frecuencia, contenido de energía, máxima tasa de variación y duración
- La susceptibilidad del receptor o víctima: respuesta de frecuencia, condiciones de diseño, presencia de elementos de protección, materiales
- Las condiciones en las cuales se efectúe el acoplamiento: por conducción o por radiación, características del medio de propagación

Por consiguiente, la compatibilidad electromagnética tiene dos requerimientos:

- Asegurar que las emisiones de perturbaciones electromagnéticas estén limitadas para un rango tolerable
- Asegurar que los equipos tengan el suficiente nivel de inmunidad para mantener el funcionamiento adecuado en presencia de perturbaciones

3. PARÁMETROS DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA

Actualmente, en Guatemala existen las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD), cuyo objetivo es establecer los derechos y obligaciones de los prestatarios y usuarios del servicio eléctrico de distribución, índices o indicadores de referencia para calificar la calidad con que se proveen los servicios de energía eléctrica, tanto en el punto de entrega como en el punto de utilización de tales servicios, tolerancias permisibles, métodos de control, indemnizaciones, sanciones y/o multas.

Según esta norma existen 3 parámetros que están relacionados directamente con la calidad de la potencia eléctrica, y sobre los cuales el usuario tiene total responsabilidad, éstos son:

- Distorsión armónica
- *Flicker*
- Factor de potencia

Figura 4. Organizaciones que velan por la calidad de la potencia



Fuente: elaboración propia.

Además, el distribuidor, también, tiene total responsabilidad en los siguientes parámetros que se enumeran en la NTSD.

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

3.1. ¿Quién es el responsable de la calidad de la potencia?

Las compañías generadoras y distribuidoras de energía eléctrica deben cumplir las normas establecidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), las cuales establecen los rangos de valores permitidos para la regulación de tensión nominal, frecuencia, desbalance de tensión y distorsión armónica entre otros.

También, se le atribuyen a la compañía distribuidora los aspectos de calidad de energía relacionados con confiabilidad y continuidad del servicio eléctrico.

El consumidor final también, contribuye a la calidad de la energía, manteniendo los valores de desbalance de corriente, factor de potencia y distorsión armónica dentro de los rangos establecidos por la CNEE.

Por tal razón, es de suma importancia que se analicen estos parámetros en este documento, ya que sobre éstos se enfoca un estudio de calidad de la potencia eléctrica para un consumidor del servicio, descartando para este estudio factores tales como: la calidad del producto suministrado por el distribuidor.

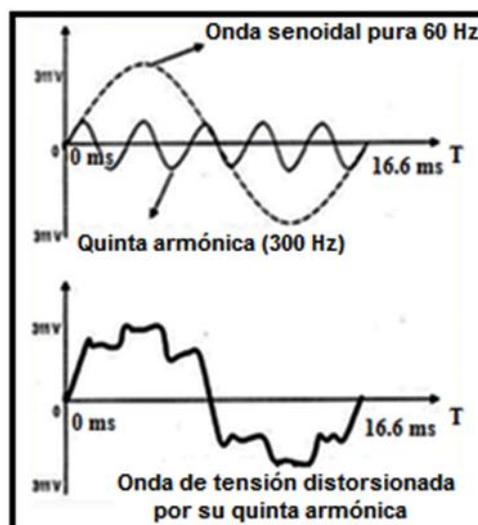
Estos factores adicionales también, tiene incidencia directa con la calidad de la potencia, pero son varios los responsables de los mismos en la red eléctrica.

3.2. Distorsión armónica

La definición de armónica se basa en el hecho de que toda función periódica puede ser representada por una serie infinita de senos y cosenos múltiplos de la frecuencia fundamental.

La onda distorsionada, que actualmente fluye a través del circuito es la componente sinusoidal de una onda periódica a una frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental (60 Hz). Una armónica es la componente sinusoidal de una onda periódica a una frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

Figura 5. Onda sinusoidal pura afectada por su quinta armónica



Fuente: http://energytel.info/porta_telecom. Consulta: mayo-2011.

Por ejemplo, una componente de frecuencia al triple de la frecuencia fundamental es llamada tercera armónica que sería 180 Hz. En un sistema a 60 Hz, una componente armónica h , tiene una frecuencia expresada como:

$$h = n * 60 \text{ Hz}$$

Donde:

n : número entero positivo

3.2.1. Distorsión armónica en el voltaje

Es la distorsión periódica de la forma de onda sinusoidal del voltaje. Ésta es causada por la operación de equipos no lineales como los rectificadores y hornos de arco eléctrico. Éste es un fenómeno en estado estable.

Existe un cálculo muy importante para determinar el THD (*total harmonic distortion*) llamado así en la Norma IEC, el equivalente al DATT en la norma guatemalteca NTSD, con el cual se puede saber el porcentaje de distorsión que tiene la onda sinusoidal pura respecto a la onda equivalente (distorsionada).

$$\text{THD}_V = \text{DATT} = \frac{\sqrt{\sum V_i^2}}{V_1^2} * 100$$

Donde:

DATT : distorsión armónica total de tensión.

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

V_1 : componente de tensión de la frecuencia fundamental (60 Hz).

Como se indica en la tabla I, existen valores permitidos para el valor de cada armónica, finalmente estos valores se pueden resumir como un DATT de 8% máximo, para media y baja tensión y 3% máximo, para alta tensión.

Tabla I. **Distorsión armónica de tensión por orden de armónica**

Orden de la armónica (n)	Distorsión armónica individual de tensión, DAIT [%]	
	Baja y media tensión $V \leq 60 \text{ Kv}$	Alta tensión $60 \text{ Kv} < v \leq 230 \text{ Kv}$
Impares no múltiplos de 3		
5	6.0	2.0
7	5.0	2.0
11	3.5	1.5
13	3.0	1.5
17	2.0	1.0
19	1.5	1.0
23	1.5	0.7
25	1.5	0.7
> 25	$0.2 + 1.3 \cdot 25/n$	$+ 0.6 \cdot 25/n$
Impares múltiplos de 3		
3	5.0	2.0
9	1.5	1.0
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
> 21	0.2	0.2
PARES		
2	2.0	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.5	0.4
10	0.5	0.4
12	0.2	0.2
> 12	0.2	0.2
Distorsión armónica total de tensión, DATT, en %	8	3

Fuente: CNEE. *Normas Técnicas del Servicio de Distribución*. p. 10.

3.2.2. Distorsión armónica en la corriente

Son también, un efecto indeseado de los componentes no lineales, fundamentalmente cargas. Las corrientes armónicas causan pérdidas y también, tensiones armónicas por las caídas de tensión producidas en las impedancias lineales del sistema. Ésta incrementa el riesgo de resonancia a frecuencias armónicas. Sin embargo, la caída de tensión (del valor total RMS) debida a las corrientes armónicas tiende a ser despreciable.

Para calcular el THD en la corriente se utiliza, también, la siguiente ecuación:

$$\text{THD}_I = \text{DATI} = \frac{\sqrt{\sum I_i^2}}{I_1^2} * 100$$

Donde:

DATI : distorsión armónica total de 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.

En la tabla II se muestran los valores permitidos de THD para la corriente, en cada uno de los múltiplos impares de la onda fundamental de la corriente, resumiéndose de la siguiente manera:

- Para potencias mayores a 10 KW comprendidas entre los voltajes de 1 KV a 60 KV el THD máximo es del 20%

- Para potencias mayores a 50 KW y con voltajes mayores a 60 KV el THD máximo es del 12%

De igual manera, el intervalo de tiempo para la obtención de las muestras de la corriente armónica es de 10 minutos según NTSD en el artículo 21.

Tabla II. **Distorsión armónica individual de corriente por orden de armónica**

Orden de la armónica (N)	$P \leq 10 \text{ kW}$ $V \geq 1 \text{ kV}$	$P > 10 \text{ kW}$ $1 \text{ kV} < V \leq 60 \text{ kV}$	$P > 50 \text{ kW}$ $V > 60 \text{ kV}$
	Intensidad armónica máxima (amp)	Distorsión armónica individual de corriente DAll, en %	
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
> 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. 14.

3.3. *Flicker*

Es una variación rápida y cíclica de la tensión, que causa una fluctuación correspondiente en la luminosidad de las lámparas a una frecuencia detectable por el ojo humano. A su vez, las variaciones de tensión se definen como cambios en el valor eficaz o valor de pico de tensión entre dos niveles consecutivos que se mantienen durante un tiempo finito no especificado. Su duración va desde varios milisegundos, hasta unos 10 segundos y con una amplitud que no supera el $\pm 10\%$ del valor nominal.

Son fluctuaciones en el nivel de voltaje, debidas a la conexión de cargas cíclicas como hornos eléctricos o por oscilaciones subarmónicas (señales de frecuencia menor a la fundamental). La forma fácil de observar este fenómeno sucede en el cambio de intensidad de bajo a alto de lámparas y ruido acelerado y desacelerado de motores.

Otras definiciones sobre el *flicker*: es un disturbio en la amplitud de la tensión, es de tipo inducido, no simétrico (distinto en cada fase), cuya principal consecuencia es la variación del brillo de las lámparas incandescentes, que causa molestia visual y produce cansancio.

Se considera una sensación subjetiva visual del individuo sometido a fluctuaciones de la intensidad de la iluminación. La intensidad luminosa varía con un factor 3,4 a 3,8 veces la variación de la tensión.

El *flicker* trata de caracterizarse en modo objetivo, a través de un instrumento que realice el modelo de percepción visual de un observador medio, suficientemente representativo.

Para obtener este resultado se han desarrollado experimentalmente curvas que relacionan, para determinado tipo de fluctuación de tensión (sensorial, rectangular) la amplitud para la cual el *flicker* generado se hace perceptible, y la frecuencia correspondiente. El instrumento de medición ha sido propuesto y puesto a punto por la Unión Internacional de Electrometría y es objeto de la publicación 868 del IEC, que define sus características específicas.

La medición del *flicker* dada como sensación instantánea, se expresa en unidad, entendiéndose igual a 1 la salida que el instrumento produce cuando su entrada es el umbral de perceptibilidad. El nivel de *flicker*, por lo tanto, es un número que indica cuánto por arriba del umbral de perceptibilidad se presenta la sensación visual correspondiente.

En general, las fluctuaciones de tensión generadas por cargas causa de disturbios, tienen características variables en el tiempo y es necesario fijar un período de observación considerado significativo y evaluar en modo estadístico la variación de la sensación instantánea en el mismo período.

3.3.1. Índices de evaluación del *flicker*

El *flicker meter* (FlkM), proporciona sus medidas en unidades de perceptibilidad (*perceptivity units*). El límite de admisión es igual a 1.

- Pst: (*perceptibility short term*) evalúa la severidad del *flicker* en períodos cortos de tiempo con intervalos de observación de 10 minutos. Si el Pst es superior a 1, se considera que afecta negativamente.
- Plt: (*perceptibility long term*) evalúa la severidad del *flicker* a largo plazo, con intervalos de observación de 2 horas.

Para tener un mayor detalle sobre los índices de evaluación se presenta la siguiente explicación:

3.3.1.1. *Flicker* de breve término (Pst)

El lapso debe ser suficientemente largo para permitir que un observador perciba el *flicker*, advirtiendo su persistencia, y para poder caracterizar el comportamiento de aparatos generadores de disturbio con ciclo de funcionamiento prolongado.

Se ha elegido un lapso base de 10 minutos, que es el mismo utilizado en la publicación IEC-555-3. La evaluación del *flicker* efectuada en este lapso es llamado *short-term* (breve período-término).

3.3.1.2. *Flicker* de largo término (Plt)

Hay aparatos generadores de disturbio que tienen un ciclo de funcionamiento prolongado, para los cuales la evaluación de la severidad del *flicker* de breve término (Pst) no es suficiente, como el provocado por los hornos de arco.

Para estos casos es necesario definir una metodología de evaluación del *flicker* de largo término, y es posible adoptar una técnica de elaboración estadística de los datos perfectamente análoga a aquella utilizada para determinar el Pst, en modo de caracterizar el fenómeno con un sólo parámetro índice de la severidad.

Aun así, ha parecido mas practico subdividir el periodo de observación en muchos lapsos de 10 minutos y obtener para cada uno de ellos el Pst correspondientes. Teniendo en cuenta el ciclo medio de operación de las distintas cargas que producen disturbios un tiempo de observación de 2 horas parece razonable para la evaluación del *flicker* de largo término.

Una vez escogidos el período de muestreo y la longitud del período corto, el siguiente paso es llevar a cabo una clasificación de los valores instantáneos de parpadeo según su severidad, para así obtener su distribución de frecuencias. Cada vez que una muestra del parpadeo instantáneo se encuentre entre los dos niveles que delimitan una clase, se incrementa en un uno el valor de dicha clase. De esta forma, dada una clase dada k, el número de muestras (N_k) se puede obtener mediante la expresión:

$$N_k = \frac{1}{T} \sum_n t_n^k$$

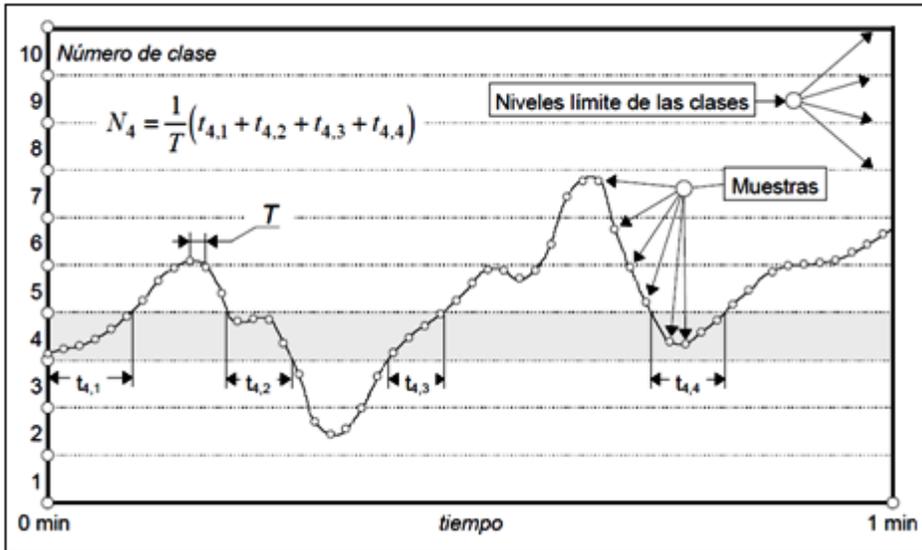
Donde:

T : período de muestreo.

t_n^k : intervalo de tiempo durante el cual el parpadeo instantáneo está entre los niveles que delimitan la clase k.

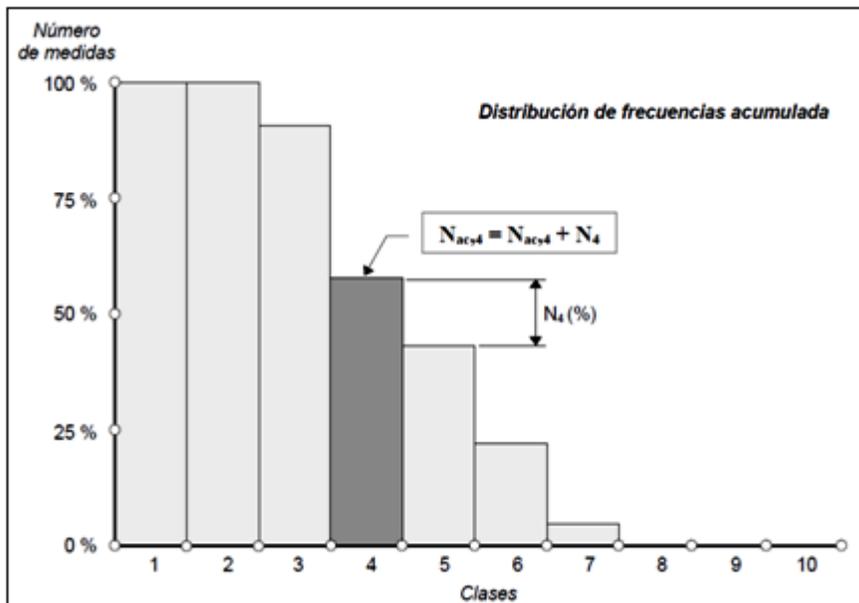
La clasificación se realiza durante el período de observación escogido (típicamente 10 min). Una vez finalice este período de observación se obtiene, a partir de la distribución de frecuencias resultado del proceso de clasificación, la distribución de frecuencias acumulada. En la que, el valor de una determinada clase se obtiene acumulando los valores sin acumular de las clases anteriores.

Figura 6. Clasificación del *flicker* instantáneo



Fuente: CIDRÁS, J. y CARRILLO, C. *El fenómeno del flicker*. p. 6.

Figura 7. Distribución de frecuencias acumuladas



Fuente: CIDRÁS, J. y CARRILLO, C. *El fenómeno del flicker*. p. 6.

Según la Norma NTSD de la CNEE, indica que el *flicker* en la tensión deberá ser medido por el índice de severidad de corto plazo Pst, definido por la Norma IEC 1000-3-7. Los valores permitidos se presentan en la tabla III.

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

Carga (SI) kW	Pst
Tensión: (≤ 1 kV)	
$SI \leq 20$	1.00
$20 < SI \leq 30$	1.26
$30 < SI \leq 50$	1.58
$SI > 50$	1.86
Tensión: ($1\text{kV} < V \leq 230$ kV)	
$SI / Scc \leq 0.005$	0.37
$0.005 < SI / Scc \leq 0.02$	0.58
$0.02 < SI / Scc \leq 0.04$	0.74
$SI / Scc > 0.04$	0.80

Fuente: CNEE. *Normas Técnicas del Servicio de Distribución*. p. 15.

Donde:

Scc: capacidad de corto circuito del sistema en el punto de medición.

3.4. Potencia eléctrica

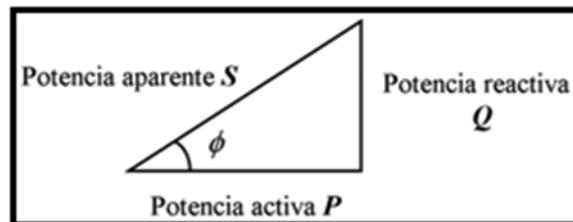
Es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía absorbida por un elemento en un tiempo determinado ($p = dW / dt$), la unidad de medida es el vatio o watt.

3.4.1. Factor de potencia (fdp)

Definido el factor de potencia de un circuito de corriente alterna, como la relación entre la potencia activa P y la potencia aparente S.

Si las corrientes y tensiones son ondas perfectamente sinusoidales, el factor de potencia será igual a $\cos \phi$ o como el coseno del ángulo que forman los fasores de la corriente y la tensión, designándose en este caso como $\cos \phi$.

Figura 8. **Triángulo de potencias**



Fuente: <http://telergia.blogspot.com/2007/08/factor-de-pot-1.htm>. Consulta: agosto-2011.

La relación se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{fdp} = \frac{P}{S} = \cos \phi$$

La potencia real o activa P es la que sirve para realizar un trabajo, en cambio la potencia reactiva Q se traduce como ineficiencia eléctrica al no producir ningún trabajo y tiene un costo adicional que se refleja en los recibos mensuales de consumo eléctrico. La potencia aparente S es la suma vectorial entre la potencia activa y la potencia reactiva.

El factor de potencia o fdp tiene un valor que oscila entre 0 y 1. Un fdp igual a 1 significa que la potencia aparente es igual a la potencia activa, y por lo tanto la potencia reactiva es igual a 0. Un factor de potencia menor que 1 indica la existencia de potencia reactiva en la red y entre menor sea el fdp mayor será la potencia reactiva produciendo así mayores pérdidas económicas y penalizaciones.

Un factor de potencia bajo es ocasionado por equipos o máquinas con inductancias, que necesitan generar campos magnéticos para su operación tales como motores, transformadores, solenoides, bobinas, etc.

La NTSD en su artículo 49 indica los valores mínimos permitidos para el factor de potencia según la potencia de cada usuario, los cuales se indican en la tabla IV.

Tabla IV. **Valor mínimo para el factor de potencia**

Potencia del usuario en KW	Factor de potencia
Hasta 11KW	0,85
Superior a 11 KW	0,90

Fuente: CNEE. *Normas Técnicas del Servicio de Distribución*. p. 21.

Según la norma, se realizarán las mediciones directamente en la acometida del usuario en un período mínimo de 7 días, en los que se deberá registrar la potencia activa y reactiva en intervalos de 10 minutos.

3.5. Desbalance de tensión en servicios trifásicos

El desbalance trifásico es el fenómeno que ocurre en sistemas trifásicos donde las tensiones y/o ángulos entre fases consecutivas no son iguales. El balance perfecto de tensiones es técnicamente inalcanzable. El continuo cambio de cargas presentes en la red, causan una magnitud de desbalance en permanente variación.

La mera conexión de cargas residenciales, de naturaleza monofásica, provocan un estado de carga en el sistema trifásico que no es equilibrado entre fases, de allí las caídas de tensión del sistema tampoco serán equilibradas dando por resultado niveles de tensión desiguales.

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

La NTSD indica que el índice para evaluar el desbalance de tensión en servicios trifásicos, se determina sobre la base de comparación de los valores eficaces (RMS) de tensión de cada fase, medidos en el punto de entrega y registrados en cada intervalo de medición (k). Este índice está expresado como un porcentaje:

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

Donde:

$\Delta DTD (\%)$: porcentaje de desbalance de tensión por parte del distribuidor.

V_{\max} : tensión máxima de cualquiera de las fases, registrada en el intervalo de medición k.

V_{\min} : tensión mínima de cualquiera de las fases, registrada en el intervalo de medición k.

V_a : tensión de la fase a, registrada en el intervalo de medición k.

V_b : tensión de la fase b, registrada en el intervalo de medición k.

V_c : tensión de la fase c, registrada en el intervalo de medición k.

En el capítulo III, artículo 28 de la NTSD se indica la tolerancia admitida en los puntos de entrega de energía, se presentan estos valores en la tabla V.

Tabla V. **Tolerancias para el desbalance de tensión**

TENSIÓN	Desbalance de tensión, Δ DTD, en %
	Etapas de régimen a partir del mes 13
Baja y media	3
Alta	1

Fuente: CNEE. *Normas Técnicas del Servicio de Distribución*. p. 9.

Donde:

Δ DTD: porcentaje de desbalance de tensión por parte del distribuidor.

mes: a efecto de posibilitar una adecuación gradual de los participantes se establecen etapas con niveles crecientes de exigencia.

Además, se considera que la energía eléctrica es de mala calidad cuando, en un lapso de tiempo mayor al cinco por ciento del correspondiente al total del período de medición, dichas mediciones muestran que el desbalance de la tensión ha excedido el rango de tolerancias establecidas.

3.6. Desbalance de corrientes

La Norma NTSD, título V, capítulo I, artículo 31 define la manera para determinar si se tiene o no un desbalance de corrientes en un sistema trifásico, de la siguiente manera.

El índice para evaluar el desbalance de corriente de los participantes, se determinará sobre la base de comparación de los valores de corriente de cada fase, medidos en el punto de entrega y registrados en cada intervalo de medición (k).

Este índice estará expresado como un porcentaje, así:

$$\Delta\text{DIP (\%)} = \frac{3 \text{ Imp}}{I_a + I_b + I_c} * 100$$

Donde:

$\Delta\text{DIP (\%)}$: porcentaje de desbalance de corriente por parte del participante.

Imp : máxima desviación de corriente de cualquiera de las fases, respecto al promedio de la corriente de las tres fases, registrada en el intervalo de medición k.

I_a : corriente en la fase a registrada en el intervalo de medición k.

I_b : corriente en la fase b registrada en el intervalo de medición k.

I_c : corriente en la fase c registrada en el intervalo de medición k.

En el artículo 32 se establece una tolerancia de diez por ciento (10%), para el desbalance de corriente.

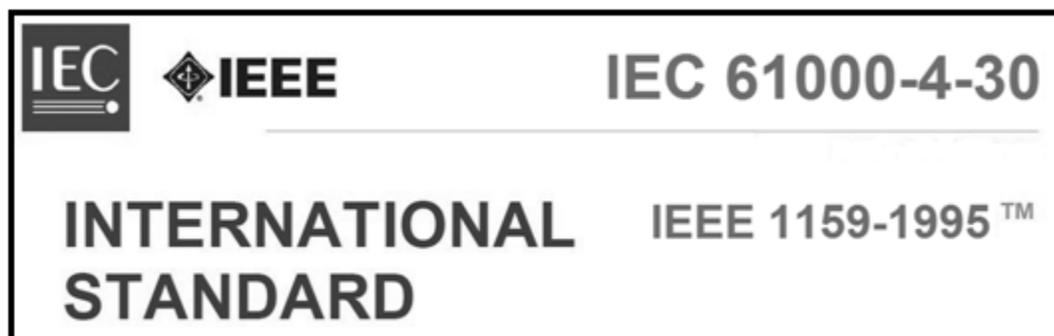
Se considera que un participante afecta la calidad del servicio de energía eléctrica, cuando en un lapso de tiempo mayor al cinco por ciento, del correspondiente al total del período de medición mensual, las mediciones muestran que el desbalance de la corriente ha excedido el rango de tolerancias establecidas.

4. REGLAMENTOS Y NORMAS TÉCNICAS INTERNACIONALES

El funcionamiento de los dispositivos y sistemas electromecánicos en el pasado no eran sensibles a las perturbaciones electromagnéticas. Los problemas de susceptibilidad provenían en su mayor parte de los fenómenos de baja frecuencia como armónicas o las interrupciones de tensión. Los componentes y equipos electrónicos utilizados actualmente, son mucho más sensibles a estas perturbaciones, particularmente a los fenómenos transitorios.

La considerable expansión en la utilización de los dispositivos y equipos eléctricos ha incrementado el impacto y el peligro derivado del mal funcionamiento, averías, entre otros, que pueden provenir de las perturbaciones electromagnéticas, por lo cual en los últimos 20 años se han venido desarrollando a nivel mundial normativas técnicas en el área de la calidad de potencia.

Figura 9. Organizaciones internacionales de normalización



Fuente: elaboración propia.

Entre las instituciones de normalización reconocidos a nivel internacional están:

- International Electrotechnical Commission – IEC
- Institute of Electrical and Electronic Engineering – IEEE
- American National Standards Institute – ANSI
- International Council on Large Electric Systems – CIGRE
- European Committee for Standardization – CEN
- Comité Européen de Normalisation Electrotechnique – CENELEC
- Comisión Panamericana de Normas Técnicas – COPANT
- Consejo de Armonización de Normas Electromecánicas Naciones de América – CANENA
- Standards Council of Canada – SCC

4.1. ¿Por qué limitar la calidad de la potencia eléctrica?

Desde la década de los 70, el uso masivo de equipos electrónicos en el mundo ha sido exponencial. Luego del embargo petrolero en 1973 y asociado al rápido incremento de los costos de energía, se creó un interés económico esencialmente para utilizar convertidores de electrónica de potencia en grandes sistemas industriales y la utilización de compensación reactiva para minimizar los costos de la energía.

El desarrollo de equipos convertidores de potencia eficientes para soportar la evolución de la electrónica, enlazado con la conservación de la energía ha cambiado, y los equipos basados en electrónica cada vez son más utilizados en instalaciones comerciales y residenciales, el uso se refleja principalmente en el incremento de equipos electrónicos domésticos basados en electrónica en especial los computadores personales.

En la actualidad, los niveles de compatibilidad electromagnética han sido sobrepasados por las perturbaciones generados por el tipo de carga, que actualmente existen, por tanto es necesario establecer límites a las perturbaciones con el fin de garantizar que los equipos funcionen correctamente dentro de su ambiente.

4.2. Diferencias entre un reglamento y una norma técnica

Como característica fundamental, las normas técnicas son elaboradas por los organismos de normalización y son de carácter voluntario. En ocasiones éstas son utilizadas por entidades gubernamentales para la descripción de aquellos productos y servicios que pueden constituir un riesgo para la seguridad, la protección de la vida y la salud humana, animal y vegetal, llegando incluso a reverenciar dentro de sus documentos oficiales.

Estos documentos gubernamentales que incluyen descripción técnica son los denominados reglamentos técnicos, los cuales en su mayoría, se apoyan en leyes de la república ó reino.

De manera que la norma técnica que nace para aplicación voluntaria puede ser de aplicación obligatoria por una decisión gubernamental. Las normas técnicas voluntarias, se pueden clasificar en cinco grandes categorías: Internacionales, Regionales, Nacionales, de Asociación y de Empresa.

La normalización es una herramienta dinámica que se desarrolla al tiempo con la tecnología para propender por la calidad e interoperabilidad de productos y servicios.

Tabla VI. **Resumen de diferencias entre normas técnicas y reglamentaciones técnicas**

Aspectos	Normas técnicas	Reglamentaciones técnicas
Competencia	Organismos de normalización.	Sólo organismos públicos (sector oficial).
Motivación	Facilitar el comercio. Mejorar en forma voluntaria la calidad de productos, servicios y procesos.	Proteger a la población en materia de salud, seguridad y ambiente.
Procesos	Consenso.	Consulta.
Exigencia de Cumplimiento	Contrato cliente – proveedor.	Estado.
Criterios de Definición	Atributos o características de productos, servicios y procesos.	Salud, seguridad, vida de las personas, medio ambiente y prácticas que puedan inducir a error en estos temas y en metrología.

Fuente: ABREU M., Augusto. *Manual de la calidad de la potencia*. p. 77.

Tabla VII. **Resumen del contenido entre normas técnicas y reglamentaciones técnicas**

Contenido de Normas y Reglamentaciones	
Norma (Documento cuya Observancia es voluntaria)	Reglamentación (Documento cuya Observancia es obligatoria)
<ul style="list-style-type: none"> ● Especificaciones o requisitos de productos, servicios o procesos. ● Por su carácter voluntario, no establece vigilancia y control de aplicación. ● No incluye partida arancelaria, por cuanto no lo contempla la estructura de las normas. ● No contempla sanciones. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Especificaciones o requisitos de productos, servicios, o procesos (*). ● Establece a una entidad del Estado como responsable de la vigilancia y control de su aplicación. ● Incluye partida arancelaria del producto referido en la reglamentación técnica. ● Contempla sanciones oficiales por incumplimiento.
<p>(*) Los organismos de la administración pública que dicten reglamentaciones técnicas, tomarán las normas, bien sea en su contenido o parte de ellas, como base preferencial para su formulación conforme a las características que deban ser de obligatorio cumplimiento.</p>	

Fuente: ABREU M., Augusto. *Manual de la calidad de la potencia*. p. 77.

Las reglamentaciones técnicas proceden del subsistema respectivo y están referidas a los requisitos de productos, servicios o procesos que puedan constituir riesgos para la salud, el ambiente y la seguridad. Su observancia es obligatoria y corresponde al Estado su establecimiento, a través de las respectivas dependencias, así como su administración, vigilancia y aplicación.

4.3. Normas técnicas

Por lo general, cada país desarrolla sus propias normas técnicas. Los casos más importantes a nivel mundial y que han servido de referencia a muchos países han sido la IEEE de origen estadounidense y la IEC de origen europeo. Desde que inició el estudio de la calidad de potencia, hace 20 años, cada organismo comenzó el desarrollo de sus normas con diferentes criterios que aún se mantienen, aunque en algunos temas como el del *flicker*, en la actualidad se realizó una unificación entre normativas donde la IEEE adoptó lo establecido por la IEC. En general, en el resto de los temas de la calidad de potencia la IEEE se ha aventurado a dar límites que todavía la IEC no ha asumido.

La IEEE sugiere los límites mediante recomendaciones avaladas igualmente por la ANSI, enfocados a empresas de distribución de energía. La IEC define los requisitos de los productos que serán instalados en las redes, a cualquier nivel de tensión, pero fundamentalmente, por parte del usuario final bien sea residencial, comercial o industrial en términos de emisión y de inmunidad. La IEC ha manejado la calidad de potencia desde la causa. En cambio la IEEE plantea los límites de un sistema, es decir, se maneja desde el lado opuesto.

4.3.1. International Electrotechnical Commission (IEC)

La IEC ha abordado el tema de la calidad de potencia (*power quality*) con la publicación de una serie de documentos, pero el que fungió principalmente en la década de los 80 fue la serie IEC-555 publicada en 1982, la cual se enfocaba a limitar los niveles de armónicas y *flicker* a nivel de la carga.

También estuvo la IEC 868, la cual presentaba la metodología de medición del *flicker*. La evolución de este tema causó que estas normas sufrieran cambios a mediados de los 80 y finalmente publicadas en 1990, donde se establece la serie IEC 61000, denominada compatibilidad electromagnética la cual está conformada por seis títulos:

- Aspectos generales
- Entorno electromagnético
- Límites de perturbaciones
- Pruebas y técnicas de medición
- Guía de instalación y mitigación
- Normas genéricas

Para su funcionamiento, así como el establecimiento de normativas, la IEC se divide en diferentes comités técnicos (TC), comités consultivos (AC) y algún comité especial: sus miembros trabajan voluntariamente.

Un ejemplo:

- Comité técnico 77 (TC77): compatibilidad electromagnética entre equipos, incluyendo redes.

Tabla VIII. Estructura de la serie IEC 61000

	Título	Documentos
IEC 61000-1-x	Aspectos generales	IEC 61000-1-1 IEC 61000-1-2
IEC 61000-2-x	Entorno electromagnético	IEC 61000-2-1 IEC 61000-2-2 IEC 61000-2-4 IEC 61000-2-6 IEC 61000-2-10
IEC 61000-3-x	Límites de perturbaciones	IEC 61000-3-2 IEC 61000-3-4 IEC 61000-3-6
IEC 61000-4-x	Pruebas y técnicas de medición	IEC 61000-4-7 IEC 61000-4-13
IEC 61000-5-x	Guía de instalaciones y mitigación	IEC 61000-5-6
IEC 61000-6-x	Normas genéricas	IEC 61000-6-1 IEC 61000-6-2 IEC 61000-6-3 IEC 61000-6-4

Fuente: ABREU M., Augusto. *Manual de la calidad de la potencia*. p. 81.

Tabla IX. Resumen de las normas IEC relacionadas con PQ

Número y título de la Norma	
IEC 1000-1-4, "Low - Frequency Phenomena (EMC) , Part 1, Rationale for Limiting Power - Frequency Conducted Harmonic and Interharmonic Current Emissions from Equipment".	IEC 1000-2-2, "Enviroment", Part 2, Compatibility Levels for Low - Frequency Conducted Disturbances and Signalling in Public Low - Voltage Power Supply Systems".
IEC 1000-2-4, "Enviroment", Part 2, Compatibility Levels for Low - Frequency Conducted Disturbances and Signalling in Public Low - Voltage Power Supply Systems"	IEC 1000-3-2, "Electromagnetic Compatibility (EMC) , Part 3, Limits For Harmonics Current Emissions (Equipment Input Current \leq 16A)", 1995.
IEC 1000-3-3, "Electromagnetic Compatibility (EMC) , Part 3, Limitation of Voltage Fluctuation and Flicker in Low - Voltage Supply Systems for Equipment with rated current \leq 16 A".	IEC 1000-3-4, "Electromagnetic Compatibility (EMC) , Part 3, Limits For Harmonics Current Emissions (Equipment Input Current $>$ 16A)", 1995.
IEC 1000-3-5, "Limitation of Voltage Fluctuations and Flicker in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment With Rated Current Greater than 16A".	IEC 1000-3-6, "Limitation of Emission of Harmonic Currents for Equipment Connected to Medium and High Voltage", 1995.
IEC 1000-3-7, "Limitation of Voltage Fluctuations and Flicker for Equipment Connected to Medium and High Voltage Power Supply Systems".	IEC 1000-4-7, "Testing and Measurement Techniques", 1991.
IEC 1000-4-15 A1, "Amendment to add specifications for flickmeters for 120 V Systems and more closely define the specification of a filter in the instrument according to standard IEC 1000-4-15".	IEC 1000-4-30, "Testing and measurement techniques Power quality measurement methods".

Fuente: ABREU M., Augusto. *Manual de la calidad de la potencia*. p. 82.

4.3.1.1. IEC 61000-4-30

Esta norma define el método de medida e interpretación de resultados para parámetros de calidad de energía en sistemas monofásicos y trifásicos de 50/60 Hz. Es una especificación de desempeño, no de diseño, proporcionando métodos de medida sin umbrales.

Los parámetros de calidad de energía incluidos en esta norma: frecuencia de potencia, desbalance en el suministro del voltaje, magnitud del voltaje suministrado, armónicas en corriente y voltaje, *flicker*, inter armónicas, transitorios de voltaje, cambios rápidos de voltaje, interrupciones de voltaje, señalamientos principales, disminución y aumentos en voltaje suministrado.

Un instrumento clase A dentro de la especificación medirá el voltaje y la corriente a la exactitud del 0,1%. Esto significa que la forma de onda de 60 Hz debe ser medida en 308 muestras por ciclo. La exactitud dependerá del método de la medida y debe ser hecha a través de 10 períodos de ciclo contiguos (en 60 Hz) es decir una ventana de 240 milisegundos. Las medidas de mayor duración están basadas en conjuntos de medición cada 10 ciclos durante 3 segundos, 10 minutos y 2 horas. Los *sags* (baja de voltaje), *swells* y duraciones de interrupción deben estar basados en mediciones RMS de medio ciclo.

4.3.1.2. ¿A qué se refiere un instrumento clase A?

Exactitud clase A significa que los instrumentos pueden ser usados para aplicaciones contractuales, verificando el cumplimiento con estándares, y resolviendo disputas. Cualquier instrumento que cumpla con la Norma IEC 61000-4-30 clase A, sin tener en cuenta el fabricante, leerá las mismas medidas para el mismo parámetro.

4.3.2. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y American National Standards Institute (ANSI)

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE por sus siglas en inglés, Institute of Electrical and Electronics Engineers), es una asociación profesional sin fines de lucro dedicada al avance de la innovación tecnológica relacionados con la electricidad. Cuenta con más de 400,000 miembros en más de 160 países, 45% fuera de los Estados Unidos .

El IEEE ofrece oportunidades de aprendizaje en las ciencias de la ingeniería, la investigación y la tecnología. El objetivo de los programas de educación de IEEE es asegurar el crecimiento de las habilidades y conocimientos en las profesiones técnicas relacionadas con la electricidad y fomentar el compromiso individual con la formación continua entre los miembros de IEEE, la ingeniería y la comunidad científica y el público en general.

El Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI, por sus siglas en inglés, American National Standard Institute) es una organización privada sin fines de lucro que supervisa el desarrollo de normas de consenso voluntario de productos, servicios, procesos, sistemas y personal en los Estados Unidos.

La organización, también coordina las normas de EE.UU. con las normas internacionales a fin de que los productos estadounidenses se puedan utilizar en todo el mundo. ANSI acredita a los estándares que son desarrollados por los representantes de los organismos de normalización en desarrollo, agencias gubernamentales, grupos de consumidores, empresas y otros. Estas normas garantizan que las características y el rendimiento de los productos son compatibles, que las personas utilizan las mismas definiciones y términos, y que los productos son probados de la misma manera.

ANSI, también acredita a organizaciones que realizan la certificación de productos o de personal de acuerdo con los requisitos definidos en normas internacionales.

Tabla X. **Resumen de las normas IEEE relacionadas con la calidad de la potencia eléctrica**

Numero y Titulo de la Norma	Objetivos y Funciones
IEEE 1159-1995. "Monitoring Electric Power Quality".	Ésta establece cómo, dónde, por qué, cuándo, etc. monitorear los parámetros de la calidad de potencia. Su sección más referenciada es la tabla que clasifica o caracteriza fenómenos de calidad de potencia.
IEEE/ANSI 519-1992, "Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems".	Esta recomendación establece límites de armónicos, tanto de tensión como de corriente en un punto común de acoplamiento. Para la tensión se establecen límites en función del nivel y el de corriente en función del nivel de corto circuito y la máxima corriente de carga.
IEEE/ANSI C57-110-98. "Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Non-sinusoidal Load Currents".	Esta norma establece el procedimiento para calcular el tamaño adecuado y factor K de transformadores, para alimentar cargas no lineales.
IEEE Std 1100-1999 (Emerald Book). "Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Equipment".	Ésta establece recomendaciones en el cableado y puesta a tierra para instalaciones con cargas sensitivas.
ANSI C84.1-1995. "Electric Power Systems and Equipment – Voltage Ratings".	Esta Norma ANSI establece los niveles de tensión normalizado y sus niveles de regulación desde baja, media y alta tensión.

Fuente: ABREU M., Augusto. *Manual de la calidad de la potencia*. p. 84.

5. ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA

La energía permite a las empresas alcanzar mayor productividad y calidad en su producción. Sin embargo, la energía se obtiene, mayoritariamente con un proveedor. Por ello, el conocimiento de cómo la empresa contrata su energía, cómo la consume en sus procesos, y cuánto repercute en sus costos, su posición relativa respecto a otras empresas similares y las posibles mejoras para disminuir el costo energético, fue el origen del desarrollo de los estudios de la calidad de la potencia eléctrica.

Figura 10. **Proceso para realizar un estudio de la calidad de la potencia**



Fuente: elaboración propia.

5.1. Introducción

Como consecuencia de la crisis del petróleo en la década de los 1970-1980, se puso de manifiesto la gran dependencia energética. La propia supervivencia de muchas empresas, organizadas en función de unos procesos intensivos en energía, que era hasta esos momentos muy barata, motivó que desde la administración se incentivara la racionalización del consumo energético.

Los estudios técnico-económicos mostraron que podía reducirse el consumo de energía, por ello se aplicaron medidas en empresas grandes y medianas especialmente, y en los sectores con mayor dependencia energética.

La optimización energética no se alcanzó automáticamente, sino que se conjuntaron diferentes esfuerzos como la realización de estudios de la calidad de la potencia eléctrica, operaciones de demostración, introducción de equipos, procedimientos más eficientes y esquemas de financiación que permitieron rebajar la dependencia energética de las empresas, pero con el tiempo el crecimiento económico y nuevas exigencias han modulado la mejora. Este estudio pretende incrementar la penetración de la eficiencia energética en las PYMES con el estudio de PQ como paso inicial.

Un estudio de PQ es un proceso sistemático para:

- Obtener un conocimiento suficientemente fiable del consumo eléctrico de la empresa
- Detectar los factores que afectan al consumo de energía
- Identificar, evaluar y ordenar las distintas oportunidades de ahorro de energía, en función de su rentabilidad

Los modelos de estudios de PQ son variados. El que se ha diseñado y se desarrolla en esta guía pretende ser muy sencillo, fiable, práctico y replicable.

5.2. ¿En qué consiste un estudio de la calidad de la potencia eléctrica?

El cálculo de la eficiencia energética es un aspecto crucial en la actualidad, para la competitividad de cualquier tipo de empresa, incluyendo en este concepto de eficacia, los diferentes aspectos energéticos: consumo eléctrico, de combustibles fósiles (provenientes del petróleo, carbón o gas natural) y otras fuentes de energía alternativas. No obstante, antes de hablar de eficacia es necesario conocer cuál es nuestra situación en este aspecto, es decir, es necesario poder medir para controlar y poder proponer medidas de mejora. Aquí es donde entran en juego las auditorías energéticas y el cálculo de la eficiencia energética.

Los estudios de PQ son un proceso sistemático mediante el que se obtiene un conocimiento suficientemente fiable del consumo energético de la empresa para detectar los factores que afectan a dicho consumo e identificar y evaluar las distintas oportunidades de ahorro en función de su rentabilidad. Las etapas típicas en las que se desarrolla una actividad de este tipo son:

- **Preauditoría o prediagnóstico:** se realiza una primera visita a la instalación como toma de contacto, recabando información sobre los equipos, métodos de trabajo, protocolos de actuación, datos de tarificación y consumos energéticos (eléctricos, combustibles fósiles, energías alternativas). El objetivo de esta etapa es detectar los puntos críticos en cuanto a consumos, malas prácticas, etc. y poder establecer un plan de acción en cuanto a los períodos y puntos de toma de datos.

- Toma de datos: los períodos de toma de datos varían ostensiblemente dependiendo del tipo de empresa, oscilando desde días hasta un mes en función del número de equipos a estudiar, tipos de instalaciones, dimensiones, etc. En cualquier caso, debe ser el suficiente para que los datos sean representativos. Es importante durante esta etapa contar con la colaboración del encargado de mantenimiento y el jefe de planta.
- Diagnóstico: el estudio de los datos anteriores permitirá identificar los puntos donde no se está consiguiendo un uso eficaz de la energía y establecer las medidas correctoras oportunas como sustitución de equipos, nuevos protocolos de actuación. Además de la viabilidad técnica, debe analizarse la económica, determinando inversiones, beneficios, costes y períodos de recuperación.
- Implantación y seguimiento: una vez adoptadas las medidas propuestas, debe realizarse un seguimiento para comprobar que se están ejecutando correctamente y confirmar las mejoras y los ahorros consiguientes.

Los beneficios alcanzables son:

- Optimización del consumo energético: lo que se traduce en una importante reducción de costes.
- Aumentar el tiempo de vida de los equipos: ya que se asegura que estos trabajan en las condiciones más adecuadas, evitando sobredimensionamientos o sobrecargas.
- Mejorar la competitividad de la empresa al reducirse los costes de producción.

- Mayor respeto y conservación del medio ambiente: al no consumirse más energía que la necesaria, se disminuyen las emisiones de CO₂, tanto en la planta como en la producción de la electricidad consumida. Todo esto se traduce en una contribución a la mejora del calentamiento global.

5.3. Objetivos del estudio de la calidad de la potencia eléctrica

- Conocer: mediante el registro de cargas en el tablero general de la edificación, cómo se distribuye la demanda máxima eléctrica en los diferentes intervalos de 15 minutos durante la semana típica.
- Contrastar los medidores correspondientes a los centros de costos de energía eléctrica de la planta.
- Descubrir potenciales de ahorro: verificar y/o seleccionar el plan tarifario más conveniente según la realidad actual; plantear alternativas de reducción de costos de energía.
- Verificar el estado de las corrientes reactivas y diseñar el sistema de compensación de energía reactiva, si fuera el caso.
- Mediante las mediciones realizadas, conocer el estado en que se encuentra la red de alimentación eléctrica, en cuanto a calidad eléctrica, armónicas de voltaje y corriente.

5.4. Identificación de oportunidades y eficiencia de la energía eléctrica en la empresa

- Eficiencia en los sistemas de iluminación

- Eficiencia energética en los motores eléctricos
- Corrección del factor de potencia
- Eficiencia energética en los sistemas de aire comprimido y climatización
- Control de la demanda
- Calidad de la energía eléctrica

5.5. El rol del ingeniero eléctrico

Es el profesional que realiza dicho estudio, en ocasiones coordinando a un grupo de especialistas, por la amplitud o complejidad de la instalación analizada. La diversidad de tipos de empresas, pertenecientes a sectores con procesos muy diferentes, distintos tipos de equipos consumidores y tecnologías energéticas horizontales específicas hacen aconsejable que el ingeniero, o el coordinador al menos, tenga una formación muy amplia, con conocimientos de las técnicas energéticas en profundidad y capacidad, para relacionar los procesos productivos con el consumo de energía.

El ingeniero eléctrico deberá poseer los conocimientos necesarios, para la realización de cálculos técnicos y económicos, así como la capacidad de realizar o dirigir las mediciones que sean necesarias. Los perfiles que más se adaptan a estos requisitos son los de ingenieros que cuenten con especialidades energéticas y experiencia sobre calidad de la potencia eléctrica.

La base teórica debe ir acompañada de una amplia experiencia profesional de trabajo en plantas, de diseño y/o de la realización de estudios de calidad de la potencia eléctrica. La participación de otros profesionales en el ramo, aportando experiencia práctica en determinadas tecnologías horizontales o equipos puede admitirse, siempre que no se pierda la visión de conjunto y se potencie la perspectiva de eficiencia energética.

5.6. Equipos de medición y registro de datos

Una vez realizado el diagnóstico de la situación actual, en la siguiente fase se han de realizar mediciones para la obtención de ciertos parámetros eléctricos de interés. Se necesitan diversos equipos que proporcionan los datos necesarios para una correcta evaluación.

5.7. El analizador de redes eléctricas

Los analizadores de redes son instrumentos de medida que miden directamente tensión e intensidad o bien calcular potencia y energías activas y reactivas, factor de potencia, consumos máximos y mínimos, armónicas, etc., los diferentes parámetros eléctricos de una línea eléctrica (normalmente en baja tensión).

Estos aparatos se instalan, generalmente, antes del circuito eléctrico que se desea evaluar, únicamente se necesita colocar alrededor de los conductores que alimentan las cargas las pinzas o sondas que son la interfaz entre la red y el analizador.

A partir de ese momento, cada uno de los parámetros de la red será monitoreado y sus valores almacenados en la memoria interna del aparato para ser descargado, posteriormente a un computador, para su correspondiente análisis.

Todos los equipos modernos de este tipo disponen, además de la posibilidad de memorizar dichos parámetros mediante diversas funciones de programación. Para una PYME puede ser representativo el período de una semana en intervalos de 15 minutos o según se considere.

Figura 11. **Analizador de redes eléctricas Unilyzer 901 clase A**



Fuente: elaboración propia.

Un equipo analizador de redes eléctricas está compuesto por

- El equipo registrador/analizador.
- Tres pinzas flexibles tipo dona para medición de corriente.
- Cuatro pinzas rígidas tipo lagarto para medición de voltaje.
- Uno o varios sistemas de extracción de los datos de memorizados (impresora, tarjetas de memoria, cable y software específico).

6. CASO PRÁCTICO

6.1. Resumen del estudio de la calidad de la potencia eléctrica en una industria textil

Se buscó una industria textil en la ciudad de Guatemala, para poder realizar un ejemplo práctico para la realización de un estudio de la calidad de la potencia eléctrica, en dicha industria se identificó un área donde recientemente se tuvieron problemas eléctricos; esto para poder realizar allí dicho estudio y análisis, finalmente se realizó en una de sus subestaciones el ansiado proyecto.

6.1.1. Presentación del informe

El objetivo principal de la medición realizada y el posterior análisis de los datos es conocer el comportamiento de los parámetros eléctricos principales de la red eléctrica (voltajes, corrientes, potencia, energía, factor de potencia y armónicas), para determinar el estado de la misma. El análisis realizado permite, a simple vista, conocer los problemas que existen y que afectan directamente la eficiencia y la calidad de la energía en las instalaciones. Finalmente, se presenta las soluciones propuestas y recomendadas junto con la justificación de las mismas.

6.2. Detalle de la medición

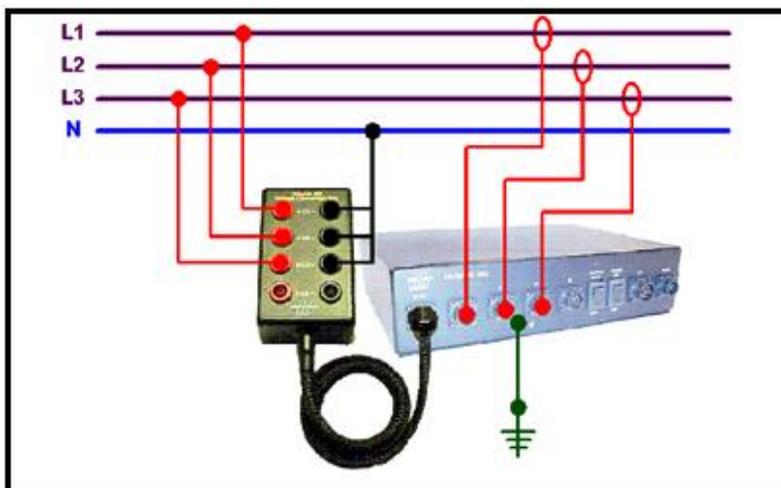
La medición se realizó utilizando un equipo analizador de redes marca UNIPOWER clase A, según el estándar internacional IEC 61000 4-30, modelo UNILYZER 902, el cual registró los parámetros mencionados anteriormente.

La configuración utilizada fue la siguiente:

Voltaje: 480Y/277 voltios B.T.
Período de medición: 11/06/2011 11:30 AM – 18/06/2011 10:10 AM.
Intervalos de medición 1 minuto para potencias y potencias armónicas.
10 minutos para corriente, voltaje, armónicas y *flicker* pst.
120 minutos para *flicker* plt.
Tipo de medición: directa.

La forma en que se instaló el equipo, que básicamente constaba del modulo analizador, las tres pinzas flexibles para la medición de corriente que se colocaron abrazando cada conductor del sistema y las cuatro pinzas tipo lagarto conectadas en las terminales de baja tensión del transformador de la subestación para registrar el voltaje de línea y de fase, fue como aparece en el gráfico de la figura 12.

Figura 12. Configuración para 4 cables de medición



Fuente: UNIPOWER © PQSecure. *Manual Unilyzer 902*. p. 3.

6.3. Resultados

Al finalizar el período de medición, se descargó a un ordenador el archivo electrónico que generó el analizador de redes eléctricas UNIPOWER clase A, con la ayuda del software PQSecure se visualizaron los resultados obtenidos. Todos estos resultados son presentados y analizados a continuación:

6.3.1. Análisis de la regulación y el desbalance de voltaje

La tabla XI indica que el valor máximo de variación en el voltaje fue de 3,2%, que corresponde a la fase 3 y en ese mismo instante el desbalance para la fase 1 correspondió a 2,9%. El desbalance entre fases corresponde a 0,3%. Es importante hacer mención que la mayoría de aparatos o máquinas eléctricas tienen un margen de funcionamiento en cuanto a su voltaje nominal de alimentación, esto significa que pueden operar normalmente a pesar de tener un valor por encima o por debajo de la tensión de alimentación especificada, aunque no ocurre así con el desbalance entre cada una de las fases en el que una variación de este tipo puede ocasionar daños severos a los equipos o maquinas. Los porcentajes máximos de variación de la tensión respecto a la nominal (277 Voltios) se presentan en la tabla XI.

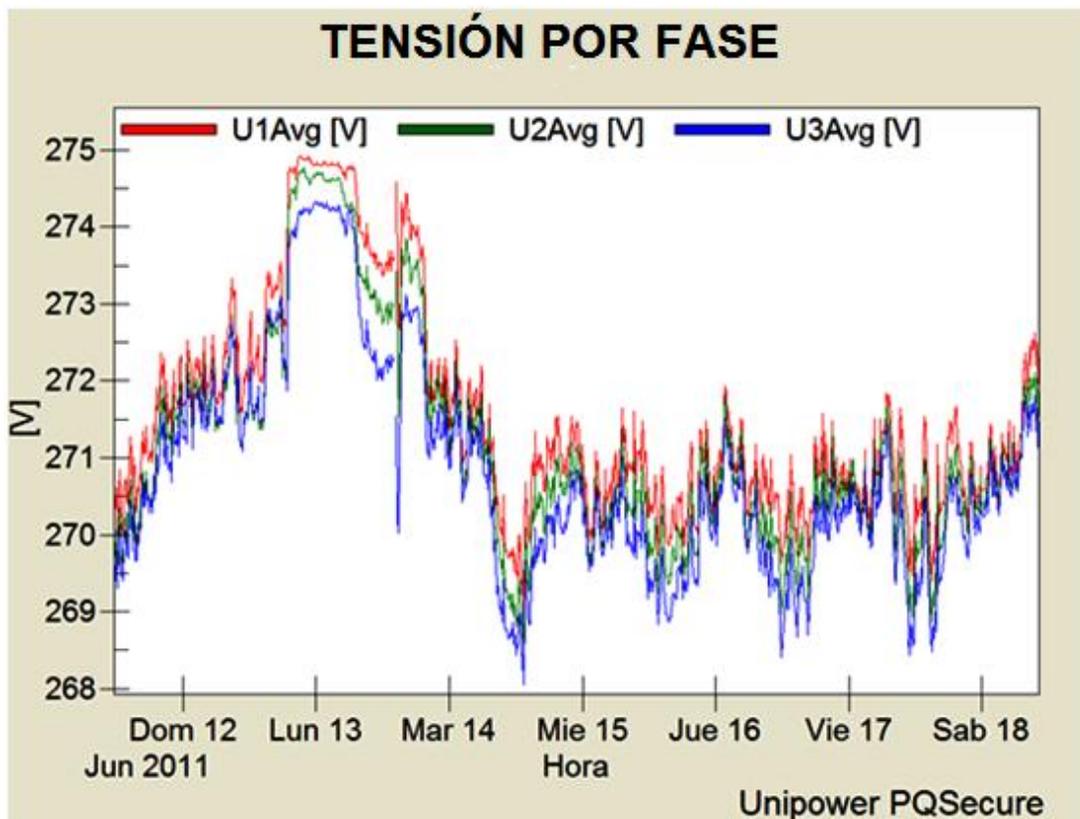
Tabla XI. Análisis del voltaje en las fases

Fase	% de variación de V respecto al valor nominal (Vnom=277 voltios)
1 	2,9%
2 	3,1%
3 	3,2%

Fuente: elaboración propia.

En la figura 13 se muestra el comportamiento de la tensión durante el período que duró la medición. El rango de valores en los que osciló la tensión durante el período de medición estuvo comprendido entre los valores de 275 V y 268 V. La variación que se muestra es normal y se encuentra dentro de los límites permitidos.

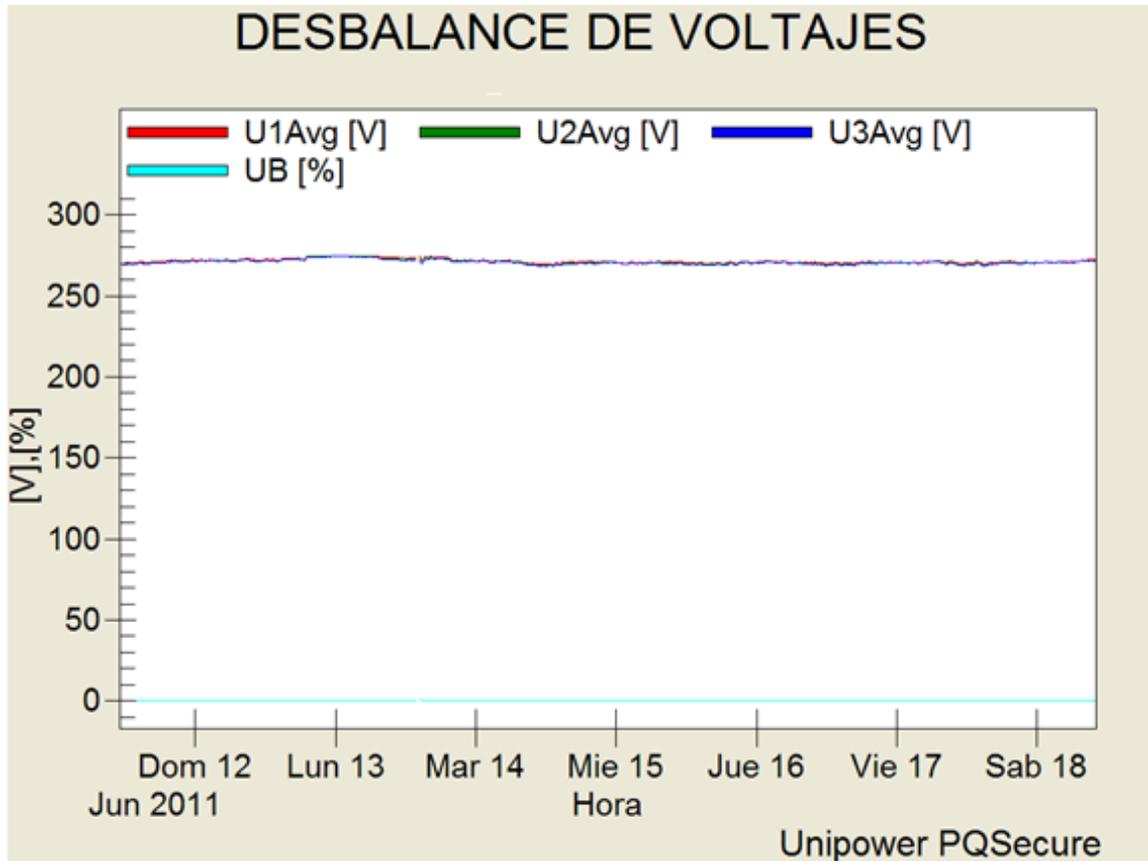
Figura 13. Tensión por fase



Fuente: elaboración propia.

La Norma NTSD indica que la tolerancia admitida sobre el desbalance de tensión será de 3% para media y baja tensión. Para este caso no se tiene ningún problema con el desbalance, ya que tiene un valor casi cercano al 0% según se puede apreciar en el gráfico de la figura 14.

Figura 14. Desbalance de voltajes

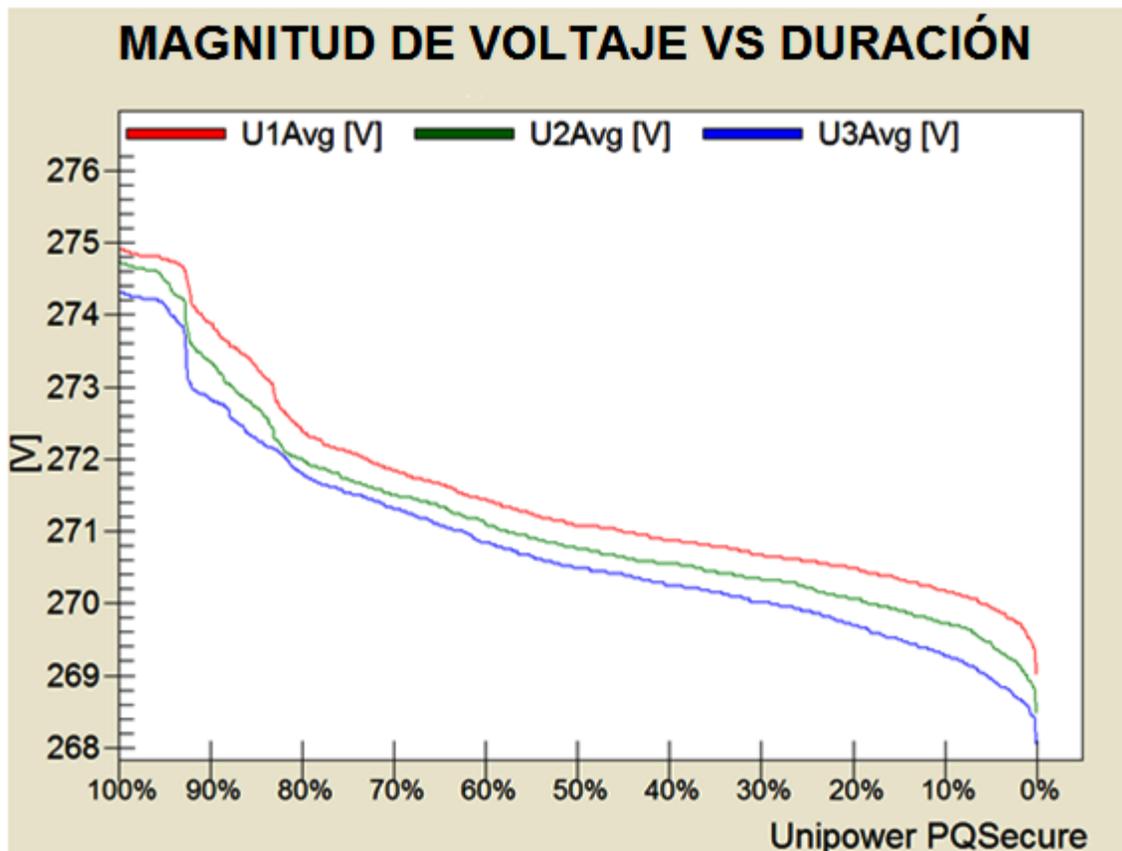


Fuente: elaboración propia.

Para la medición de este parámetro eléctrico, el equipo analizador de redes realizó lecturas y almacenó los valores durante las mediciones instantáneas en cada una de las fases en intervalos de 10 minutos durante la semana típica según el tiempo de duración del estudio, así como resultado se obtuvo el gráfico de la figura 14 en el que a simple vista se puede observar que los valores de las fases se mantuvieron constantes. Además, la línea que representa el porcentaje del desbalance entre las fases es una línea totalmente horizontal que se mantiene en el valor cercano a 0%, lo cual confirma lo analizado hasta este punto.

Analizando la figura 15 que representa el porcentaje de duracion del tiempo total en relación a la magnitud del valor de las mediciones de voltaje observadas, se visualiza que el 90% de los valores se encuentran en el rango de 273 y 268 voltios, asi tambien, se puede decir que el 50% de los valores de voltaje medidos se hallan entre 271 y 268 voltios. Finalmente, el 10% de los valores de voltaje de la medición están comprendidos entre 268 y 269 voltios. Dada esta figura se pueden segmentar por porcentajes los valores de voltaje obtenidos durante la medición para poder realizar un análisis específico.

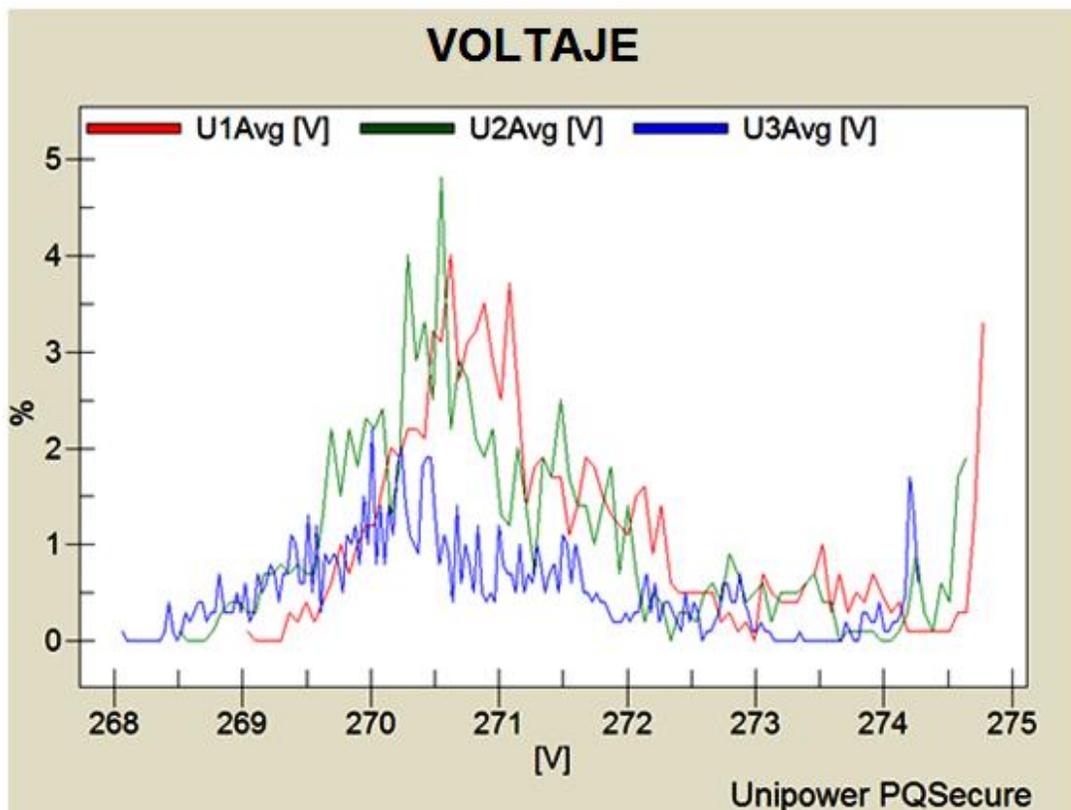
Figura 15. **Gráfico de duración para el voltaje**



Fuente: elaboración propia.

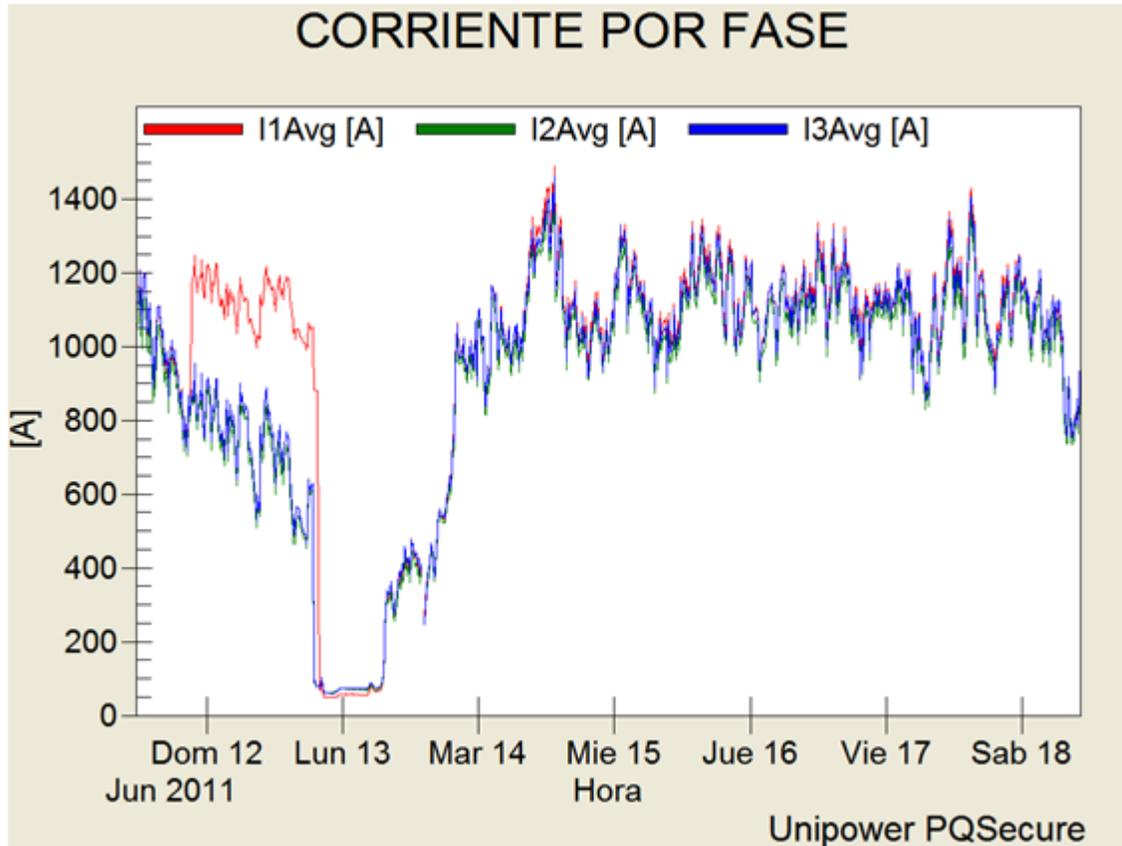
El gráfico de la figura 16 representa en el eje de las abscisas, los valores en los que osciló la magnitud del voltaje durante el período de la medición que corresponde a una semana, por otro lado en el eje de las ordenadas se representa el porcentaje de duración para cada uno de los valores medidos, es muy evidente, y como ya se ha indicado con anterioridad, que para este caso de estudio el valor de voltaje promedio que se mantuvo oscilando cerca de los 271 voltios, según las características nominales del transformador eléctrico de la subestacion, dicho valor promedio debería de ser de 277 voltios; sin embargo, dado que para las tres fases se mantienen ese valor se considera normal.

Figura 16. **Voltaje para el estudio realizado**



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Corriente por fase



Fuente: elaboración propia.

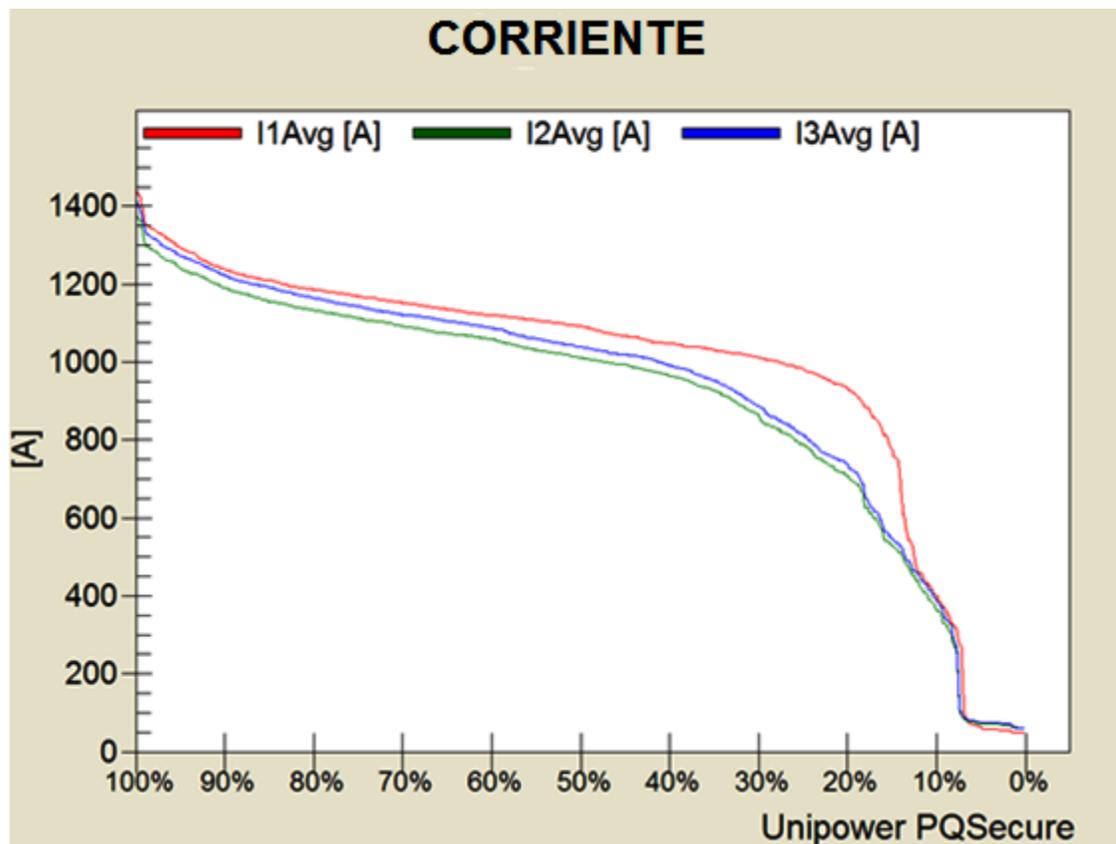
6.3.2. Análisis del desbalance de la corriente eléctrica

En la figura 17 se muestra el comportamiento de la corriente en las tres fases durante el período de la medición. Se puede apreciar que las tres fases varían en forma similar respecto a las otras; sin embargo, se aprecia un desbalance, aunque es importante resaltar el desbalance ocurrido en la fase 1 en relación a las fases 2 y 3, este desbalance ocurrió en la fecha sábado 11 de junio a las 21:15 horas, hasta el domingo 12 a las 19:30 horas (intervalo de 22 horas con 15 minutos) en donde el desbalance obtuvo valores de hasta el 48%.

Según la Norma NTCSTS título V, artículo 32, se establece una tolerancia de diez por ciento (10%), para el desbalance de corriente. Literalmente dice: "...se considera que un participante afecta la calidad del servicio de energía eléctrica cuando en un lapso de tiempo mayor al cinco por ciento, del correspondiente al total del período de medición mensual, las mediciones muestran que el desbalance de la corriente ha excedido el rango de tolerancias establecidas".¹

Este desbalance es evidente en el gráfico de la figura 18.

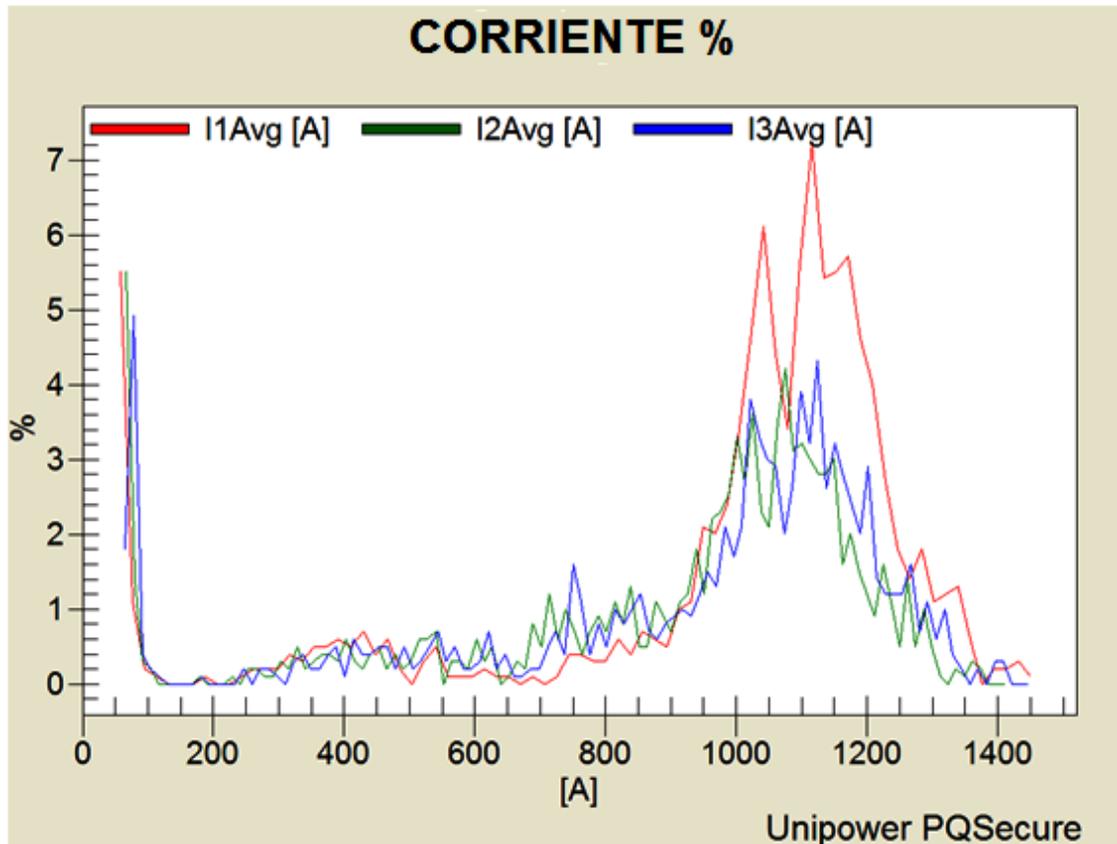
Figura 18. **Magnitud de la corriente vs duración**



Fuente: elaboración propia.

1. CNEE. *Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones*. p. 8.

Figura 19. Corriente para el estudio realizado



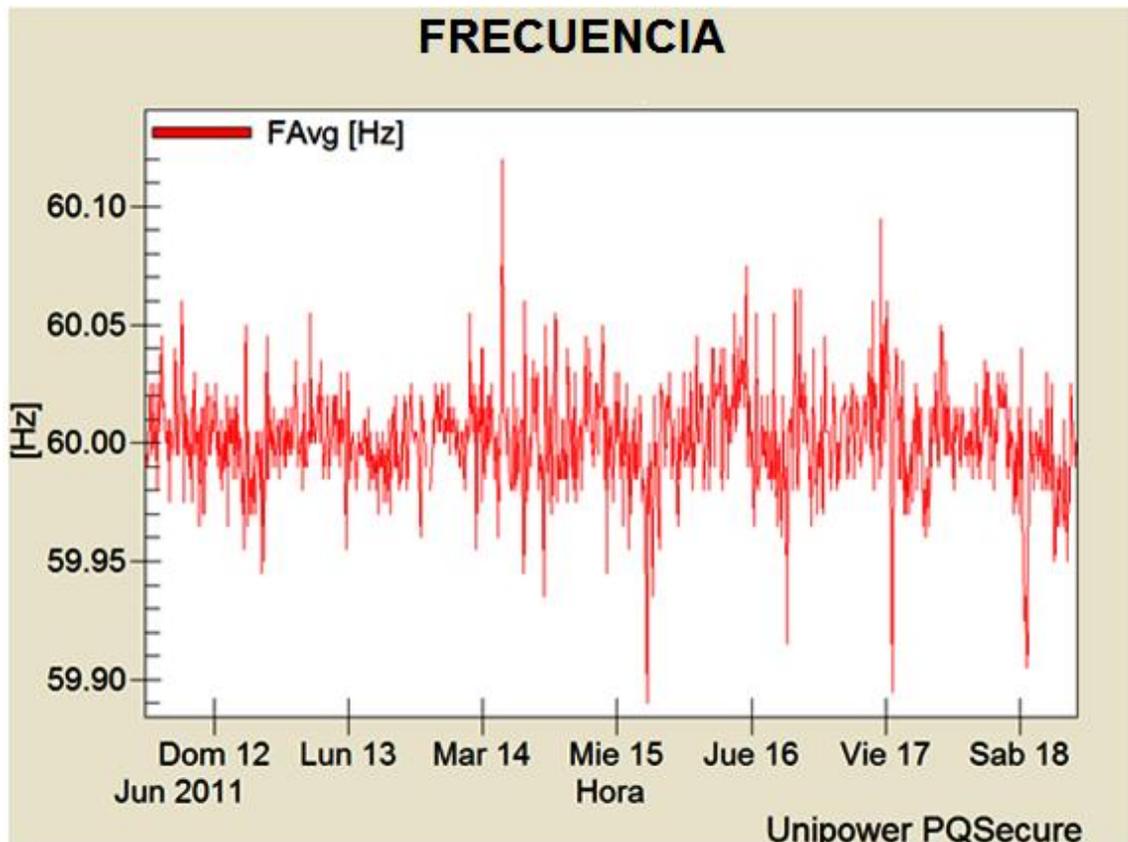
Fuente: elaboración propia.

Como se puede visualizar en los gráficos de las figuras 17, 18 y 19 existe un desbalance en la magnitud de la corriente, dicho desbalance está muy marcado, debido a que los valores para la fase 1 son muy elevados con respecto a los valores de la fase 2 y 3. Este problema puede, sin lugar a dudas, manifestar problemas serios en el sistema eléctrico de la compañía textil, problemas tanto económicos como técnicos, a medida que se desarrolle este análisis del estudio realizado se obtendrán posibles causas que lo originaron, de momento se considera que se ha encontrado un problema que requiere una acción en la que se tiene que trabajar inmediatamente para su corrección.

6.3.3. Análisis de la frecuencia de la red

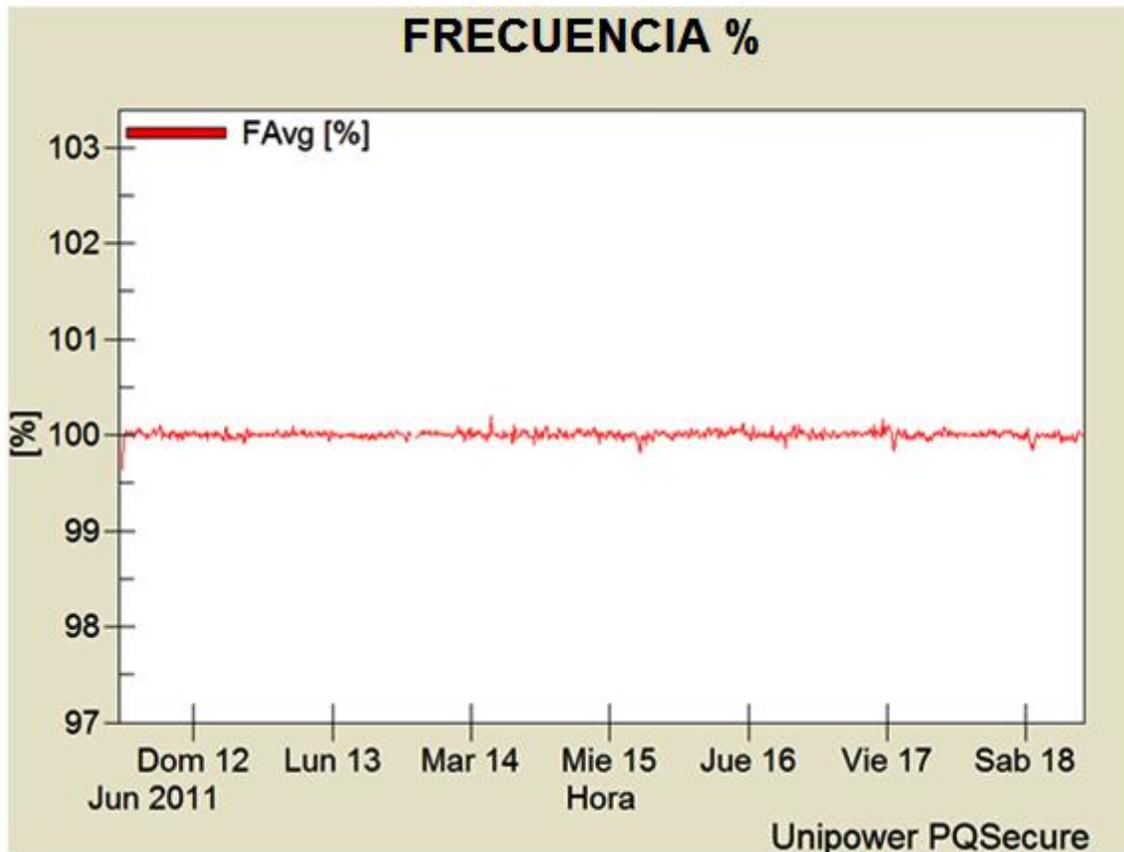
Como se observa en las figuras 20 y 21, la frecuencia de la red eléctrica está oscilando entre 59,9 Hz y 60,1 Hz lo que indica que no hay ningún problema concerniente con este parámetro, ya que se encuentra dentro de los valores estipulados. Es muy importante recordar que este parámetro es muy delicado, ya que el porcentaje de variación para ser aceptado es muy pequeño, una variación relativamente alta puede ocasionar daños serios en los motores eléctricos, equipo electrónico, etc.

Figura 20. Frecuencia del sistema eléctrico



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Frecuencia en porcentaje de la frecuencia nominal



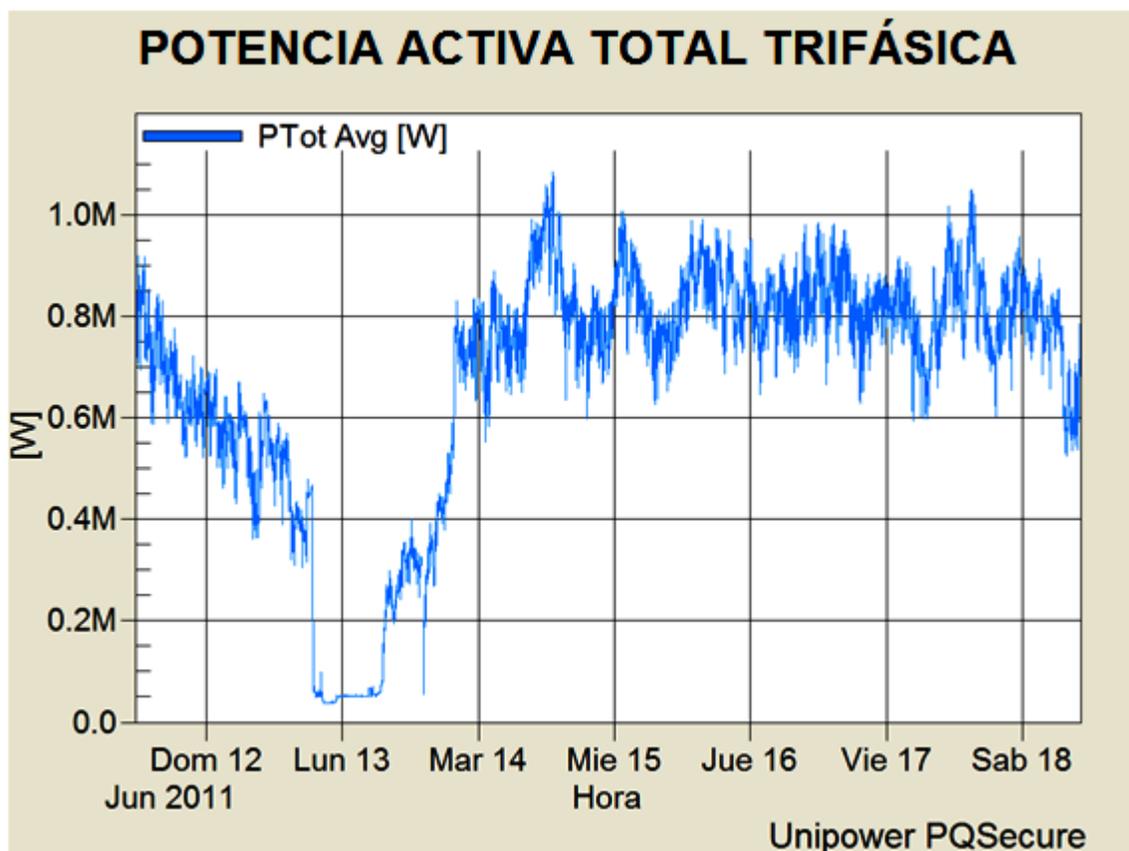
Fuente: elaboración propia.

6.3.4. Análisis de la potencia activa trifásica

En la figura 22 se muestra, básicamente, el comportamiento de la potencia activa, la cual llegó a un nivel máximo de 1,085 MW el martes 14 a las 13:00 horas, en resumen se observa que el promedio de la potencia activa fue de 0,9 MW. Dicha curva es muy interesante y brinda suficiente información cuando se trata de realizar un análisis más detallado en cuanto a costo de operación, por ejemplo; ya que es una herramienta para calcular costos y pérdidas de energía.

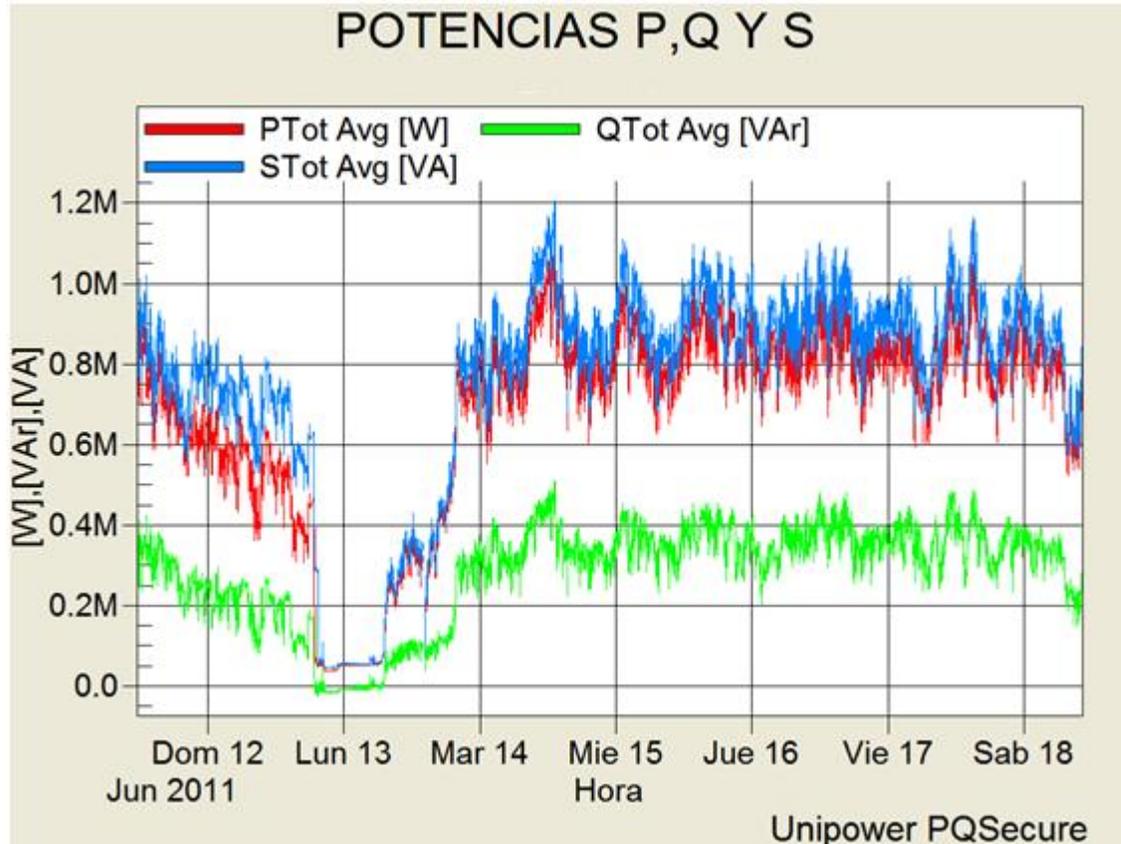
Las mediciones realizadas para obtener este gráfico fueron realizadas por el aparato de medición en integraciones de 1 minuto. Se puede observar que la potencia activa total se mantiene constante en la mayoría del tiempo a partir del día lunes 13 de junio (día en que la planta inicia con la operación) y se mantiene constante incluso, durante la noche, lo que da una idea clara de que la energía eléctrica es indispensable para esta empresa, ya que su producción está ligada a la confiabilidad y a la continuidad del suministro eléctrico, dado la importancia de la misma es necesario garantizar que no se tengan interrupciones debidas a problemas internos de la red.

Figura 22. **Potencia activa total trifásica**



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Potencia trifásica total**



Fuente: elaboración propia.

6.3.5. **Análisis de la potencia activa, reactiva y aparente**

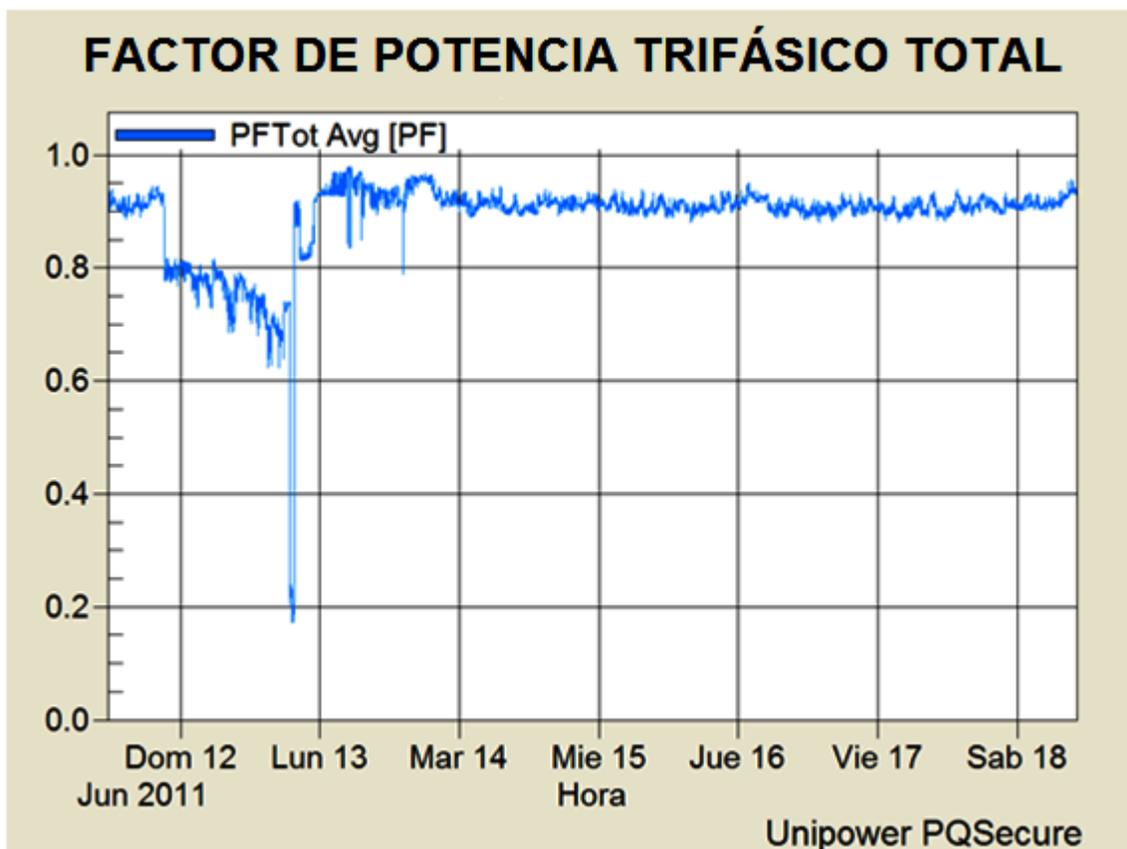
En el gráfico de la figura 23 se observa el comportamiento de las potencia activa (P), reactiva (Q) y aparente (S), como es de esperarse, el valor de S es el de mayor magnitud; sin embargo, se ve que Q tiene un valor relativamente grande, esto debido a que la potencia reactiva es necesaria para crear campos magnéticos y eléctricos en las bobinas o condensadores, dado que las máquinas eléctricas en esta industria son motores de inducción el consumo de esta energía es normal, la tabla XII presenta un resumen de energías.

Tabla XII. **Distribución de energías**

Energía Activa	112,9 MWh
Energía Reactiva	46,49 MVARh
Energía Aparente	126,5 MVAh
Periodo de Medición	junio 11 – junio 18

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Factor de potencia total**



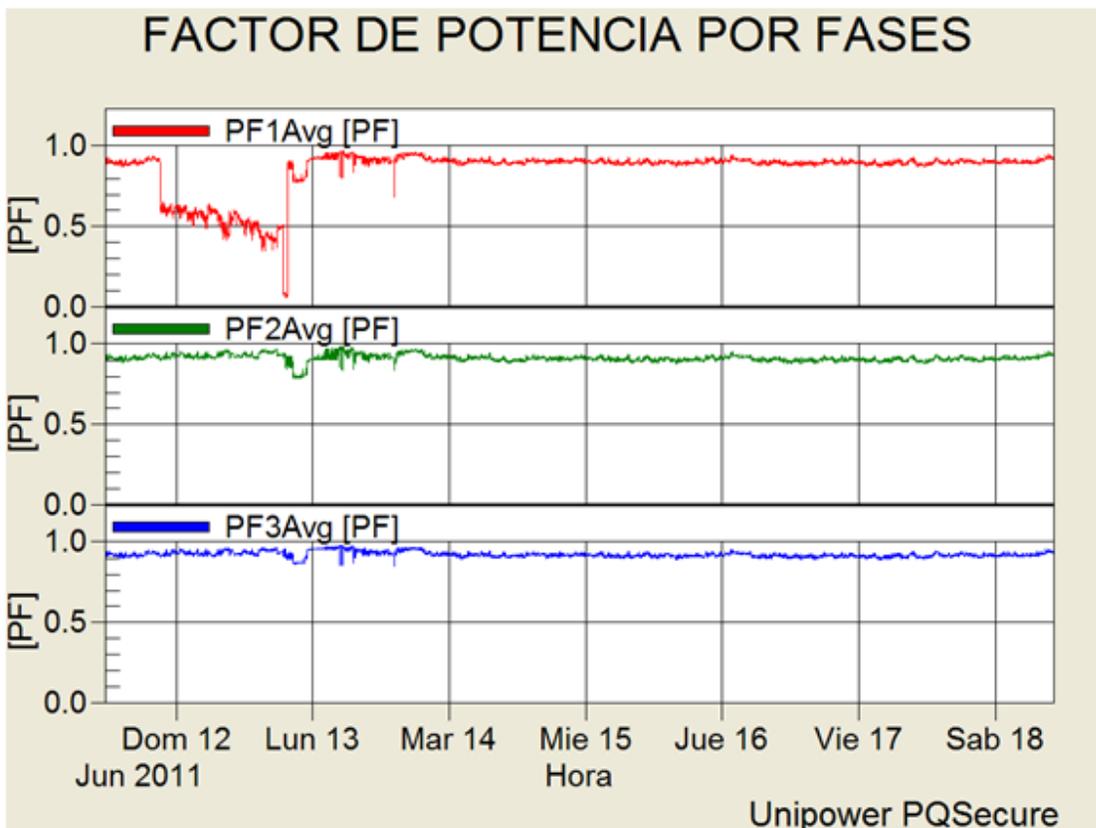
Fuente: elaboración propia.

6.3.6. Análisis del factor de potencia

La NTSD, en su artículo 49, indica los valores mínimos permitidos para el factor de potencia de usuarios con potencias superiores a 11 KW no deberá ser menor a 0,90 para no incurrir en penalizaciones.

Se observa en la figura 24 que el valor se encuentra en el límite; sin embargo, en la gráfica de factor de potencia por fases, figura 25, se observa nuevamente que la fase 1 afecta, considerablemente, el factor de potencia total trifásico, al mismo tiempo, cuando ocurre el desbalance de corrientes.

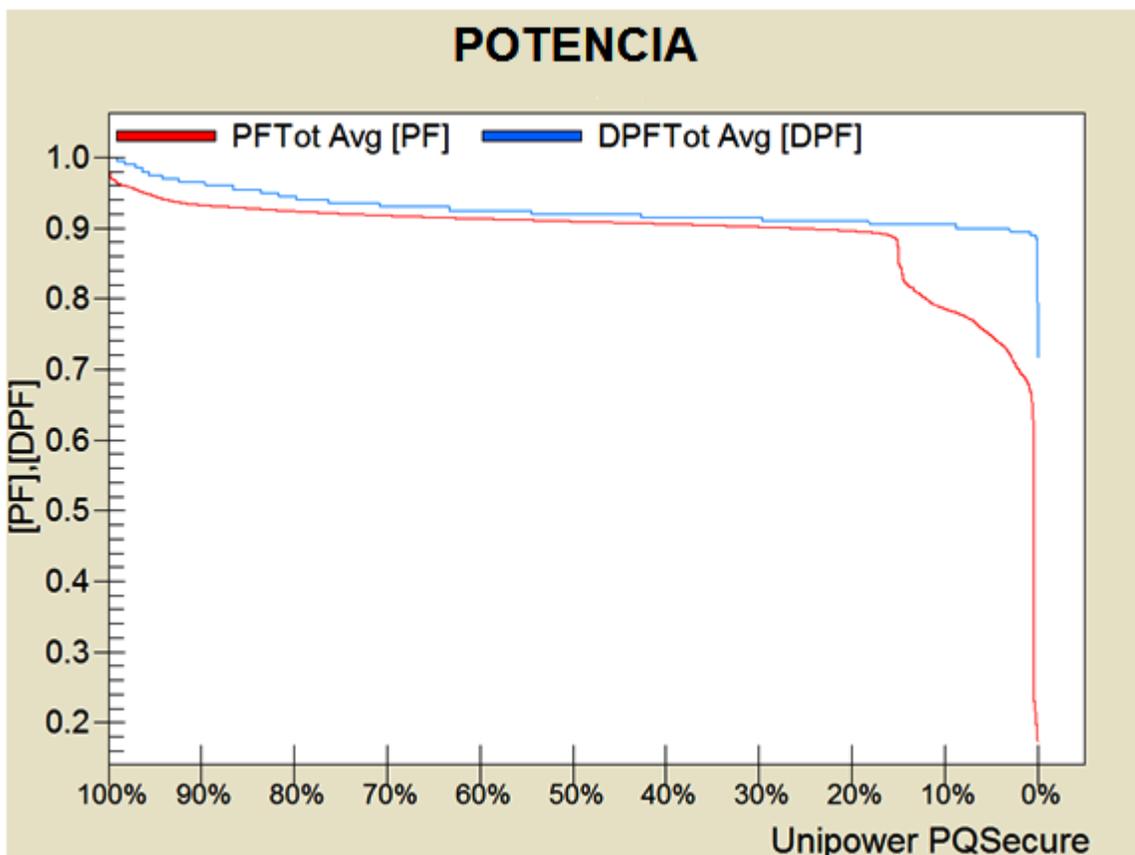
Figura 25. Factor de potencia por fases



Fuente: elaboración propia.

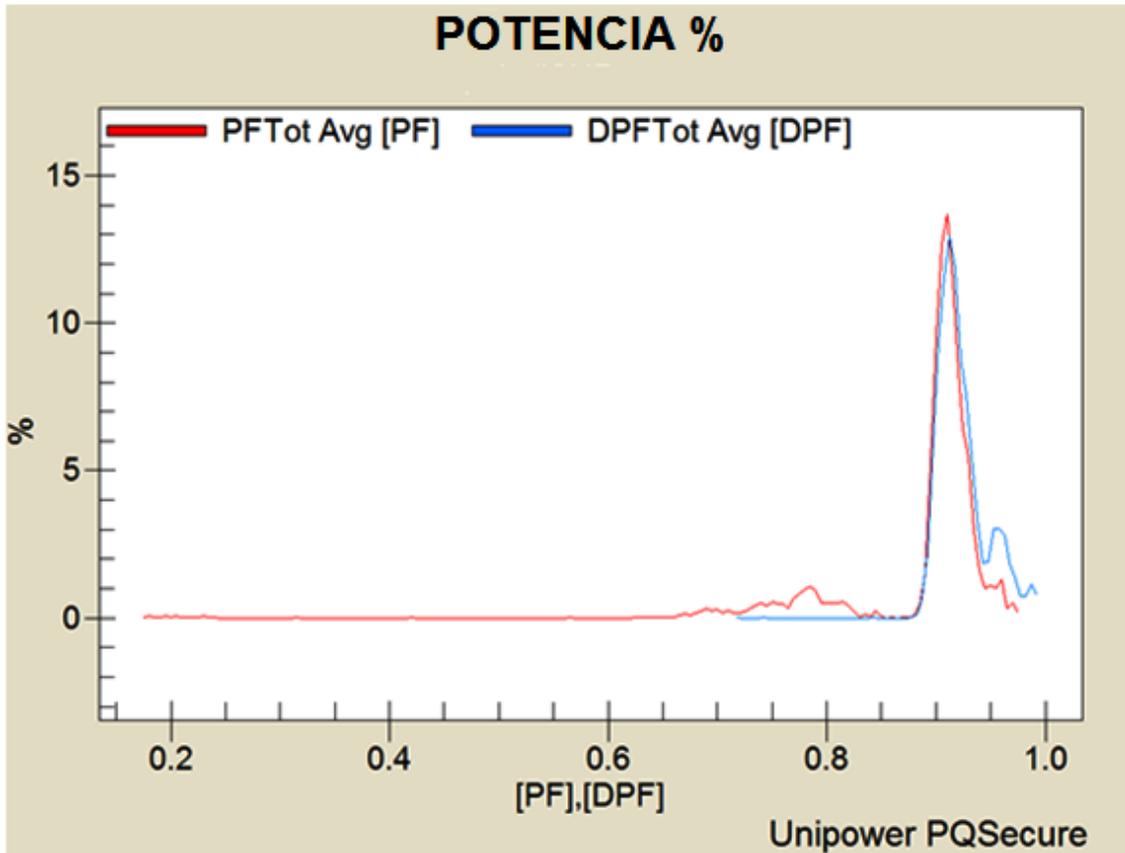
Como se aprecia en la figura 26, para la curva del factor de potencia tomado de la corriente con deformación por armónicas y el voltaje de alimentación se supera el 10% del tiempo de duración de la medición, este gráfico permite obtener conclusiones bastante significativas al momento de discutir si se está o no incurriendo en penalizaciones, ya que por el otro lado se observa una diferente curva que corresponde, también, a un factor de potencia obtenido de la medición; sin embargo, se ve que esta curva si se encuentra dentro de los rangos permitidos, ésta corresponde al valor medido entre la corriente y el voltaje.

Figura 26. **Gráfico/duración del factor de potencia**



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Factor de potencia



Fuente: elaboración propia.

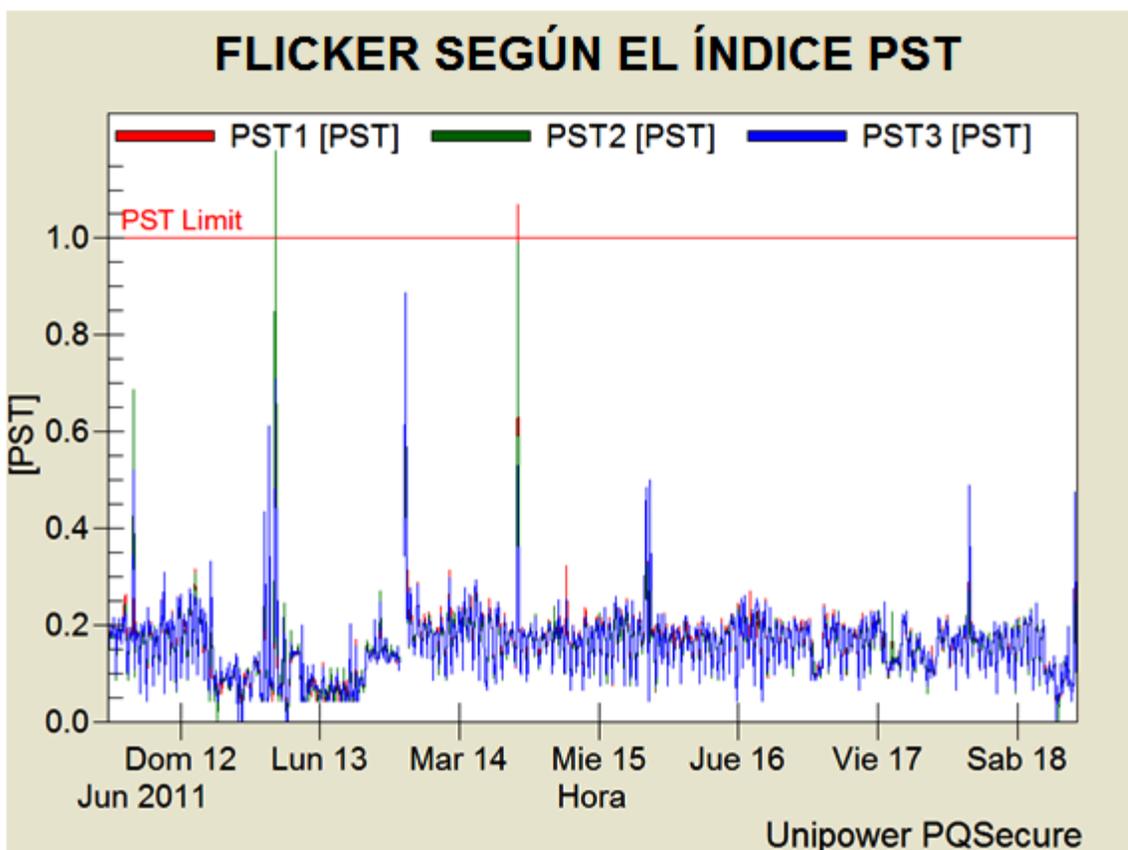
Es muy importante hasta aquí poder hacer una pausa y analizar detenidamente el tema relacionado al factor de potencia, ya que como se observa en las figuras 26 y 27, se presentan dos curvas, en cada una de estas gráficas cada una corresponde a un factor de potencia, lo que podría ocasionar cierta confusión, hay que dejar claro que una curva corresponde al factor de potencia del desfase entre la corriente y el voltaje; y la otra al factor de potencia de deformación, es decir cuando se está analizando la corriente de carga, que debido a las armónicas presenta deformación.

Es necesario indicar que en muchas ocasiones se ha usado incorrectamente dos términos: el primero factor de potencia y el segundo coseno de ϕ .

6.3.7. Análisis de *flicker* según el índice Pst

En la figura 28 se observa que el índice de severidad de *flicker* para intervalos cortos es menor a 1, lo que está de acuerdo a la Norma NTSD en el artículo 46, a pesar de exceder ese valor durante dos ocasiones.

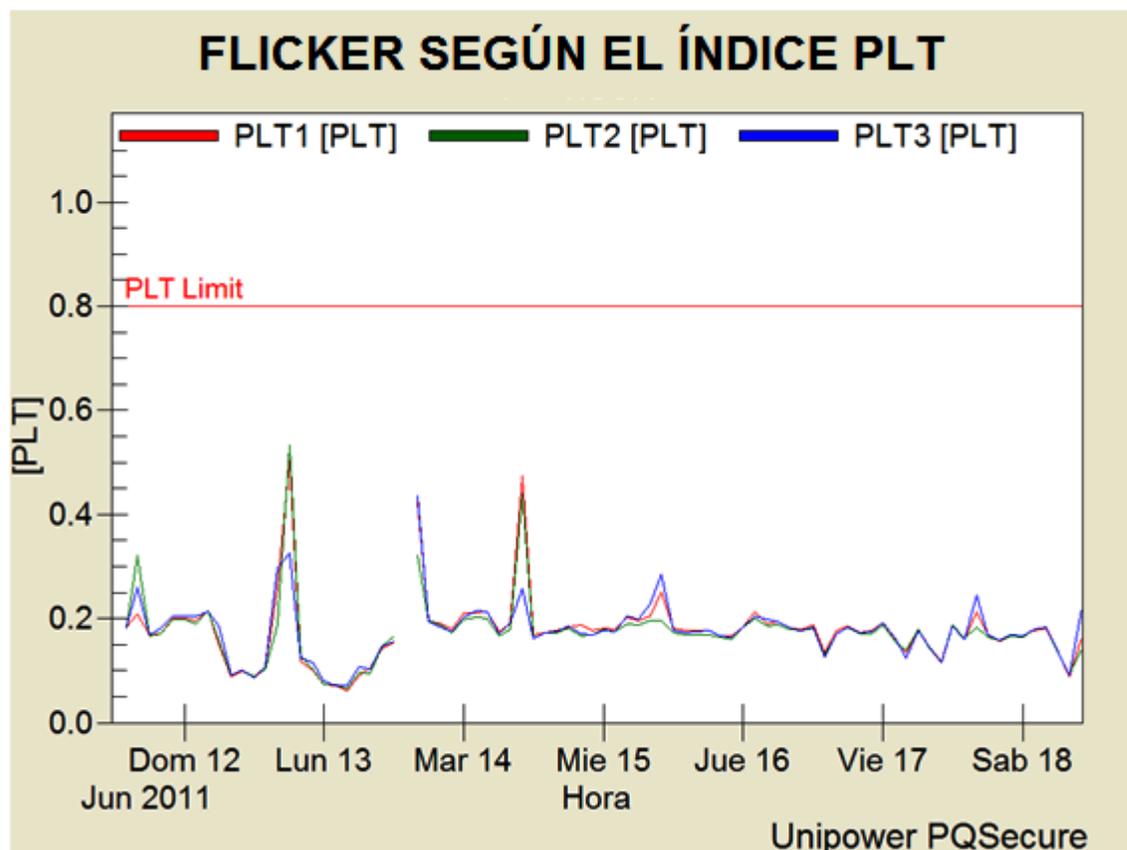
Figura 28. *Flicker* según el índice Pst



Fuente: elaboración propia.

Al referirse al índice Pst, significa que se evalúa la severidad del *flicker* en períodos cortos de tiempo con intervalos de observación de 10 minutos. Los posibles valores obtenidos estarán comprendidos entre 0 y 1. Si el Pst es superior a 1, se considera que afecta negativamente.

Figura 29. **Flicker según el índice Plt**



Fuente: elaboración propia.

6.3.8. Análisis de *flicker* según el índice Plt

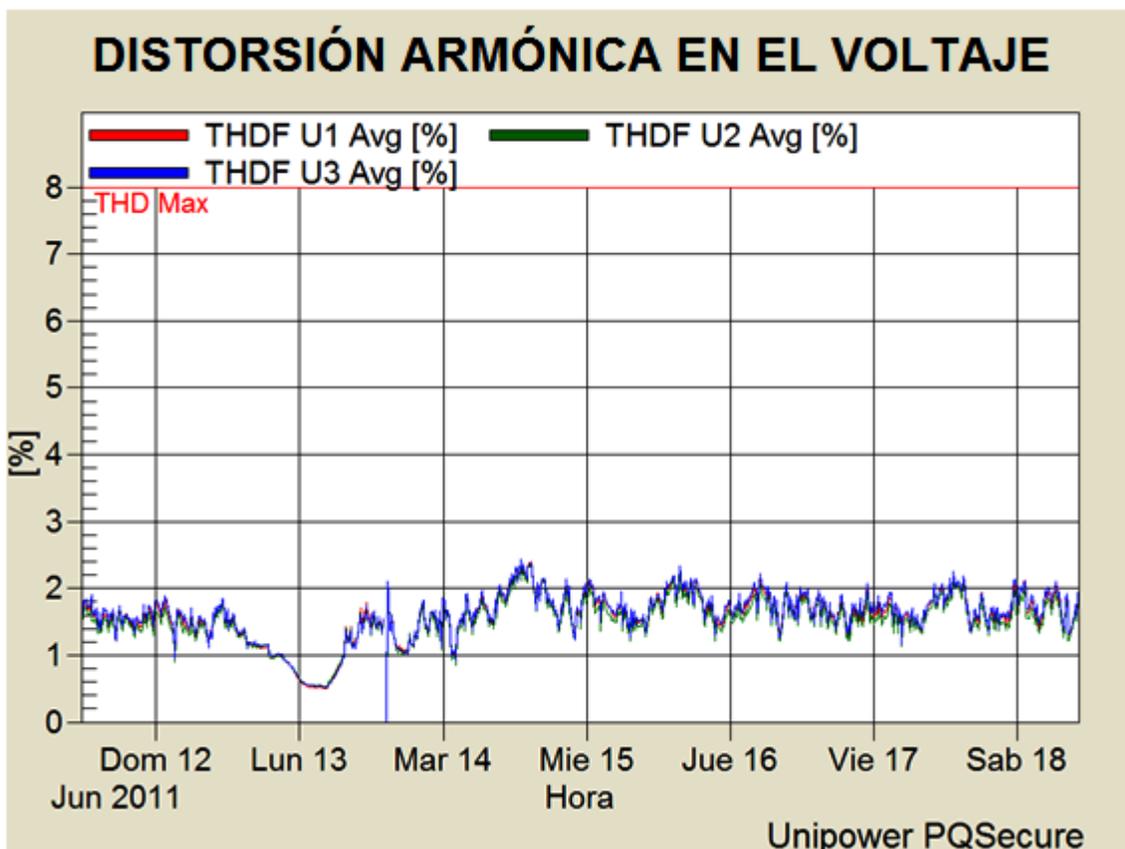
Plt: evalúa la severidad del *flicker* a largo plazo, con intervalos de observación de 2 horas según la Norma IEC 61000-4-30.

Se observa en la figura 29 que, nuevamente en esta diferente evaluación de severidad de *flicker*, los valores obtenidos están dentro de los parámetros permitidos, donde Plt indica el nivel de severidad del *flicker* en el largo período.

6.3.9. Análisis del THD para el voltaje

La Norma Nacional NTSD, artículo 32, indica que el porcentaje de distorsión armónica en el voltaje no debe ser mayor de 8%. Como se observa en la figura 30 el valor de THD (*Total Harmonic Distortion*) no supera el 3%.

Figura 30. Distorsión armónica en el voltaje



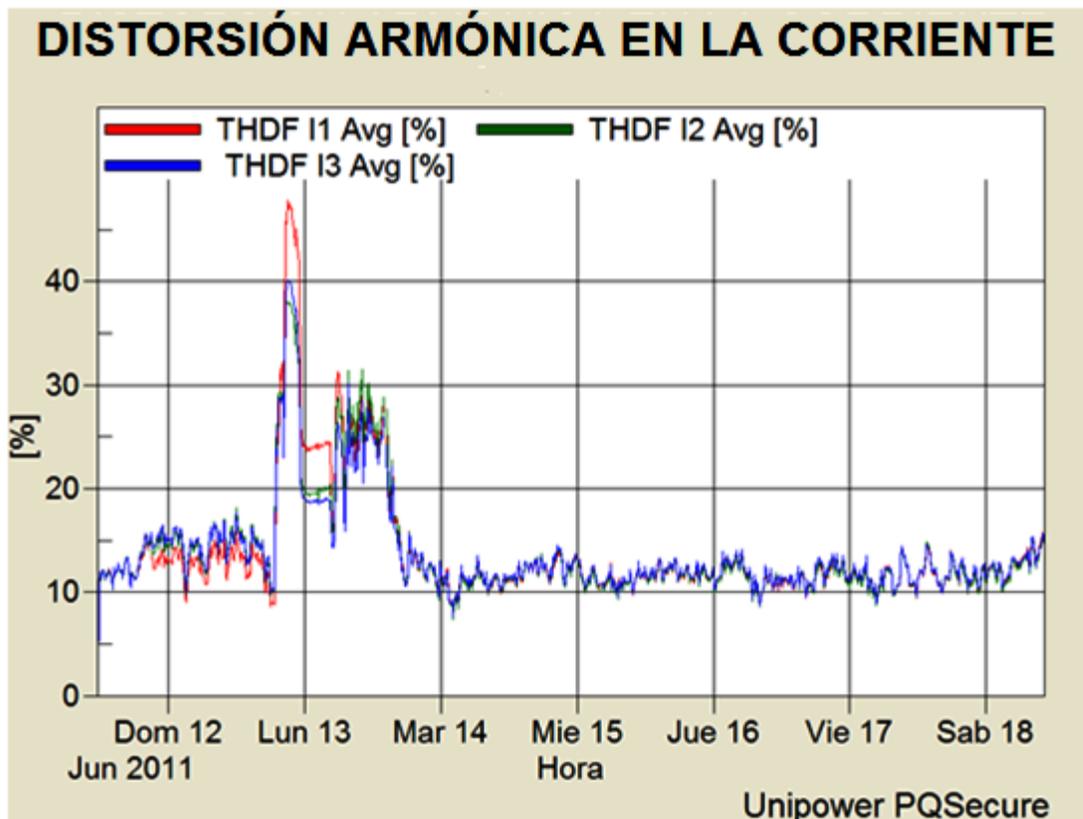
Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, el estándar IEEE 519 indica que para valores de tensiones menores a 69 KV no se debe superar el 3% para la distorsión armónica individual y para el THD del voltaje el límite máximo permitido es del 5%.

6.3.10. Análisis del THD para la corriente

La Norma Nacional NTSD en el artículo 41, indica que el porcentaje de distorsión armónica en la corriente no debe ser mayor de 20%. En resumen: Para potencias mayores a 10 KW comprendidas entre los voltajes de 1 KV a 60 KV el THD máximo es del 20%.

Figura 31. Distorsión armónica en la corriente



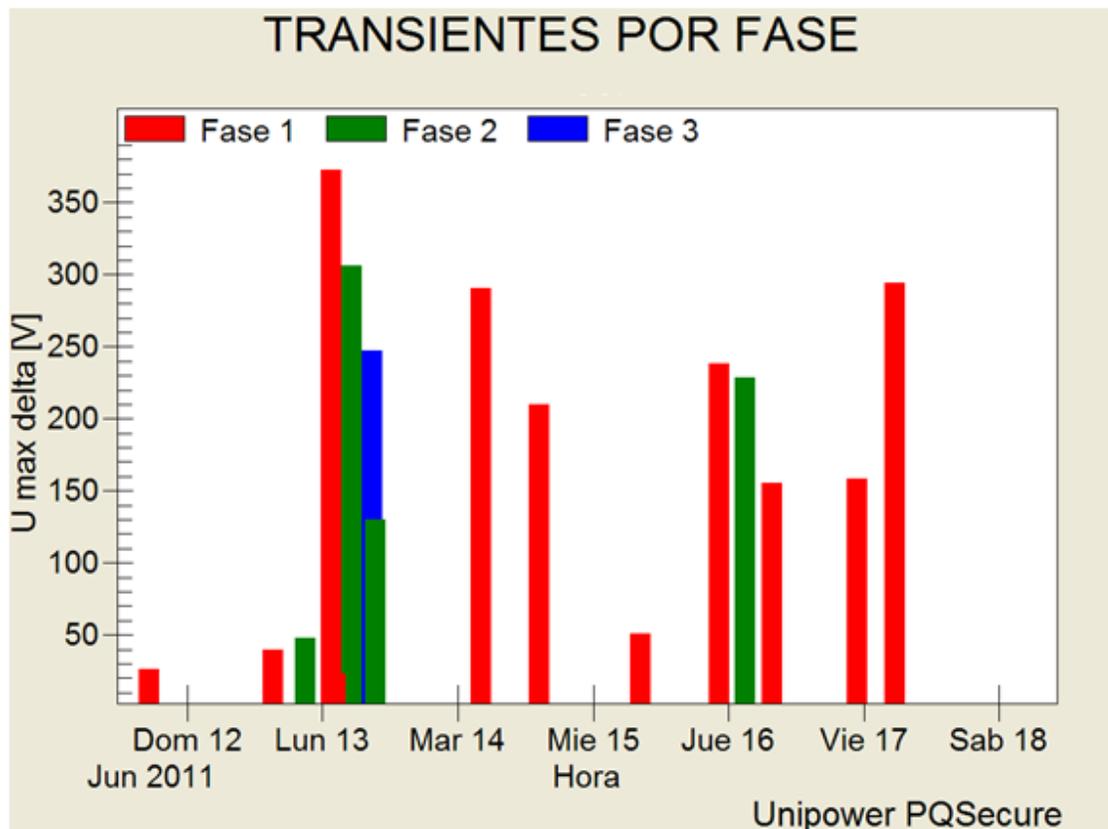
Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la figura 31, el valor de THD para la corriente (*Total Harmonic Distortion*) supera considerablemente este valor, dicho intervalo inició el domingo 12 a las 19:30 horas y finalizó el lunes 13 a las 16:30 horas. Se llegó a observar un valor de hasta el 47%.

6.3.11. Análisis de transitorios de voltaje

En la figura 32 se observan los valores en los que se percibieron transitorios de voltaje, con mucha claridad se puede ver que la fase 1 (marcada en rojo) es la que presenta una mayor cantidad de transitorios.

Figura 32. Transientes por fase



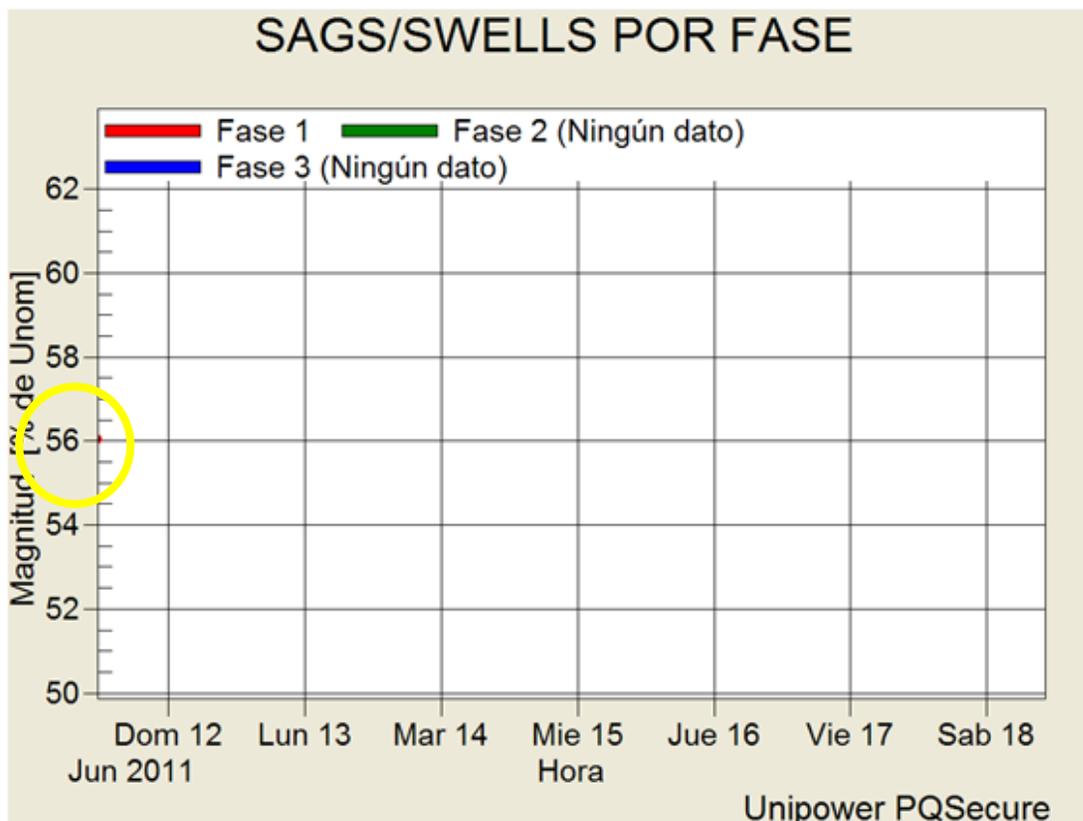
Fuente: elaboración propia.

Los transitorios en el voltaje son muy rápidos y de corta duración, por lo general, duran menos de 200 microsegundos, pero llegan a alcanzar valores bastante altos. Principalmente el equipo electrónico es más susceptible a este tipo de problemas.

6.3.12. Análisis de *sags* y de *swells*

Como se observa en la figura 33, tanto la fase 1 y fase 2 no registraron ningún evento durante el período de la medición, de hecho sólo hay registro de un problema de este tipo, el cual se puede ver en el círculo marcado.

Figura 33. **Sags y swells por fase**



Fuente: elaboración propia.

6.3.13. Recomendaciones presentadas en el informe

Finalmente, se presentó un informe sobre el estudio de la calidad de la potencia eléctrica que se realizó en la empresa textil, ese informe contenía básicamente lo analizado y discutido en esta sección (6. caso práctico), de tal manera que el ingeniero encargado de la planta pudiera conocer el estado del sistema eléctrico, se informó referente a cada uno de los parámetros eléctricos que fueron sometidos al estudio y se hizo énfasis en las siguientes recomendaciones que están enfocadas a reducir a valores permitidos los parámetros eléctricos o a eliminarlos.

- La corriente en la fase 1 experimentó en un intervalo de tiempo indicado un desbalance con respecto a las demás fases, este aumento incidió en el factor de potencia durante ese tiempo, valores que tanto en desbalance de corrientes como en factor de potencia están sujetos a penalización, por lo tanto; se recomienda identificar la carga que originó este problema a fin de que se pueda hacer una propuesta de solución, esto podría analizarse evaluando el diagrama unifilar de la instalación, ya que esa carga seguramente durante los demás días está en operación, pero como se tienen todas las cargas en funcionamiento no se percibe. Por lo que se evidencia en este estudio podría decirse que es una carga monofásica la que origina este problema al que hay que prestarle atención inmediata.
- Considerar la instalación de un filtro supresor de armónicas debido al problema que se evidencia con el alto THD para la corriente, este filtro deberá mantener el THD de corriente por debajo del 20%; sin embargo, este filtro es una propuesta apresurada, ya que como se aprecia el problema se debe a una carga monofásica y no a una trifásica.

- Los transitorios de voltaje o mejor conocidos como picos de voltaje, pueden ocasionar daños en equipos susceptibles, por lo general equipo electrónico, esto debido a los altos valores instantáneos que se alcanzan en la red, usualmente éstos son generados por la conmutación en el encendido y arranque de equipos que demandan valores altos de corriente, por lo que se recomienda instalar un módulo supresor de transientes de tal manera que exista una adecuada protección en la instalación eléctrica.
- Por último, es necesario conocer más en detalle las cargas que están conectadas en cada una de las fases, ya que como se observó la fase 1 presentó mayores problemas relacionados con factor de potencia, THD, transitorios de voltaje, entre otros, por lo que es importante conocer las características de cada equipo conectados a la red y compararlos para proponer arreglos y/o mejoras.
- Debido a la incidencia que presenta una de las fases en los resultados obtenidos, es importante analizar el diagrama unifilar de la subestación (tipo de cargas: motores giratorios, hornos, iluminación, etc.), de esta manera se podría proponer una reestructuración de la distribución de la cargas conectadas a cada una de las fases.

7. SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS DE LA CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA

7.1. Corregir el factor de potencia

La finalidad de corregir el factor de potencia es reducir o aun eliminar el costo de energía reactiva en la factura de electricidad. Para lograr esto, es necesario distribuir las unidades capacitivas, dependiendo de su utilización, en el lado del usuario del medidor de potencia. Existen varios métodos para corregir o mejorar el factor de potencia, entre los que destacan la instalación de capacitores eléctricos o bien, la aplicación de motores sincrónicos que finalmente actúan como capacitores.

Figura 34. Banco de capacitores para corregir el fdp



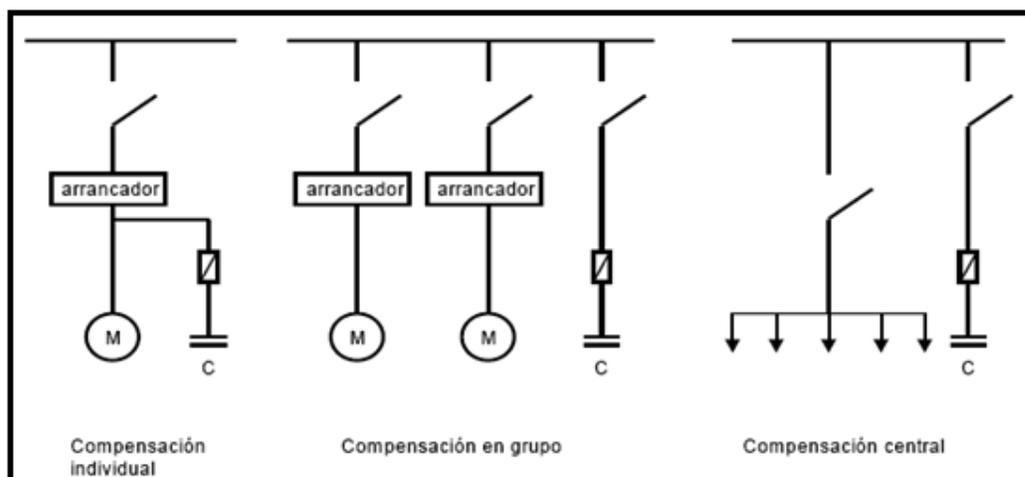
Fuente: <http://www.onar.com.co/INDUSTRIAS%20ONAR/Productos.htm>. Consulta: abril-2011.

Los capacitores eléctricos o banco de capacitores, pueden ser instalados en varios puntos en la red de distribución en una planta, y pueden distinguirse cuatro tipos principales de instalación de capacitores para compensar la potencia reactiva:

- Compensación individual en motores
- Compensación por grupos de cargas
- Compensación centralizada
- Compensación combinada

Cada una de las posibles instalaciones observadas en la figura 35 corresponden a una aplicación específica, no obstante, es importante mencionar que antes de instalar capacitores eléctricos, se debe de tomar en cuenta los siguientes factores: tipos de cargas eléctricas, variación y distribución de las mismas, factor de carga, disposición y longitud de los circuitos, tensión en las líneas de distribución, entre otros.

Figura 35. **Tipos de instalación de banco de capacitores**



Fuente: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/mendez/. Consulta: Octubre-2011.

7.1.1. Compensación individual

La compensación individual se refiere a que cada consumidor de carga inductiva (motor eléctrico, transformador, horno, etc.) se le asigna un capacitor que suministre potencia reactiva para su compensación. La compensación individual es empleada principalmente en equipos que tienen una operación continua y cuyo consumo de la carga inductiva es representativo. A continuación se describen dos métodos de compensación individual:

7.1.2. Compensación individual en motores eléctricos

El método de compensación individual es el tipo de compensación más efectivo, ya que el capacitor se instala en cada una de las cargas inductivas a corregir, de manera que la potencia reactiva circule únicamente por los conductores cortos entre el motor y el capacitor. La compensación individual presenta las siguientes ventajas.

- Los capacitores son instalados cerca de la carga inductiva, la potencia reactiva es confinada al segmento más pequeño posible de la red.
- El arrancador para el motor puede también servir como interruptor para el capacitor eliminando así el costo de un dispositivo de control del capacitor solo.
- El uso de un arrancador proporciona control semiautomático para los capacitores, por lo que no son necesarios controles complementarios.
- Los capacitores son puestos en servicio solo cuando el motor está trabajando.

No obstante, este método presenta las siguientes desventajas:

- El costo de varios capacitores por separado es mayor que el de un capacitor individual del valor equivalente.
- Existe subutilización de aquellos capacitores que no son usados con frecuencia.

Es importante mencionar que, para no incurrir en una sobre compensación en la carga inductiva que provoque alteraciones en el voltaje que pueda dañar la instalación eléctrica, la potencia del banco de capacitores deberá limitarse al 90% de la potencia reactiva del motor en vacío.

7.1.3. Compensación individual en transformadores de distribución

Otro método para corregir el factor de potencia es compensar la potencia reactiva en los transformadores de distribución. La potencia del banco de capacitores se calcula para compensar la potencia reactiva absorbida por el transformador en vacío, que es del orden del 5% al 10% de la potencia nominal. De acuerdo con las normas técnicas, con el fin de evitar fenómenos de resonancia y sobretensión en vacío, la potencia del banco de capacitores no debe exceder al 10% de la potencia nominal (en VA) del transformador.

7.1.4. Compensación en grupo

Es aconsejable compensar la potencia inductiva de un grupo de cargas, cuando éstas se conectan simultáneamente y demandan potencia reactiva constante, o bien cuando se tienen diversos grupos de cargas situados en puntos distintos.

La compensación en grupo presenta las siguientes ventajas:

- Se conforman grupos de cargas de diferentes potencias, pero con un tiempo de operación similar, para que la compensación se realice por medio de un banco de capacitores común con su propio interruptor.
- Los bancos de capacitores pueden ser instalados en el centro de control de motores.
- Se reducen los costos de inversión para la adquisición de bancos de capacitores.
- Aumenta la capacidad de transporte de las diferentes líneas de distribución de energía eléctrica.
- En las líneas de alimentación principal se presenta la ventaja de que la sobrecarga de potencia reactiva no se reduce, es decir, que seguirá circulando entre el centro de control de motores y los motores.

7.1.5. Compensación central con banco automático

Este tipo de compensación ofrece una solución generalizada para corregir el factor de potencia, ya que la potencia total del banco de capacitores se instala en la acometida, cerca de los tableros de distribución de energía, los cuales, suministran la potencia reactiva demandada por diversos equipos con diferentes potencias y tiempos de operación. La potencia total del banco de capacitores se divide en varios bloques que están conectados a un regulador automático de energía reactiva, que conecta y desconecta los bloques que sean necesarios para obtener el factor de potencia previamente programado.

La compensación centralizada presenta las siguientes ventajas:

- Mejor utilización de la capacidad de los bancos de capacitores
- Se tiene una mejora en la regulación del voltaje en sistema eléctrico
- Suministro de potencia reactiva según los requerimientos del momento
- Es de fácil supervisión

La desventaja de compensar la potencia mediante la compensación centralizada, es que las diversas líneas de distribución no son descargadas de la potencia reactiva, además, se requiere de un regulador automático en el banco de capacitores, para compensar la potencia reactiva, según las necesidades de cada momento.

7.2. Reducción de corrientes armónicas

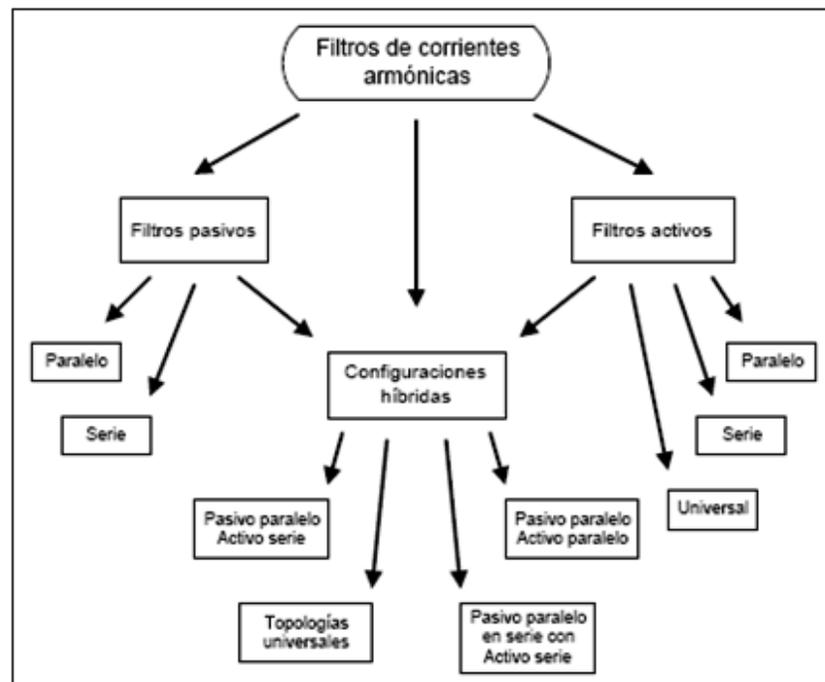
Las soluciones para reducir la magnitud o el efecto de las corrientes armónicas en una red eléctrica pueden dividirse en las siguientes:

- Aumentar el número de pulsos de los rectificadores ó la configuración de cargas para que estas se comporten como convertidores con un mayor número de pulsos.
- Utilizar técnicas de inyección de corriente del lado de tensión en CD, para así reducir el contenido de corrientes armónicas.
- Emplear rectificadores PWM.
- Emplear filtros pasivos y activos.

Las tres primeras opciones implican una modificación en la topología del circuito que genera las corrientes armónicas. Las dos últimas son medidas externas para tratar de corregir el problema, o encerrar en una trayectoria definida el flujo de corrientes armónicas. Por eso, únicamente se analizarán las técnicas basadas en filtros. Los filtros pasivos basan sus esquemas en elementos pasivos, tales como: inductores, condensadores y resistencias. La topología de filtros activos emplea convertidores electrónicos basados en estructuras de potencia con patrones PWM.

Las configuraciones híbridas emplean una combinación de estructuras pasivas y estructuras activas, tratando de que el conjunto tenga un mejor desempeño que sus partes, además de tener un costo económicamente aceptable.

Figura 36. **Diferentes combinaciones de filtros**



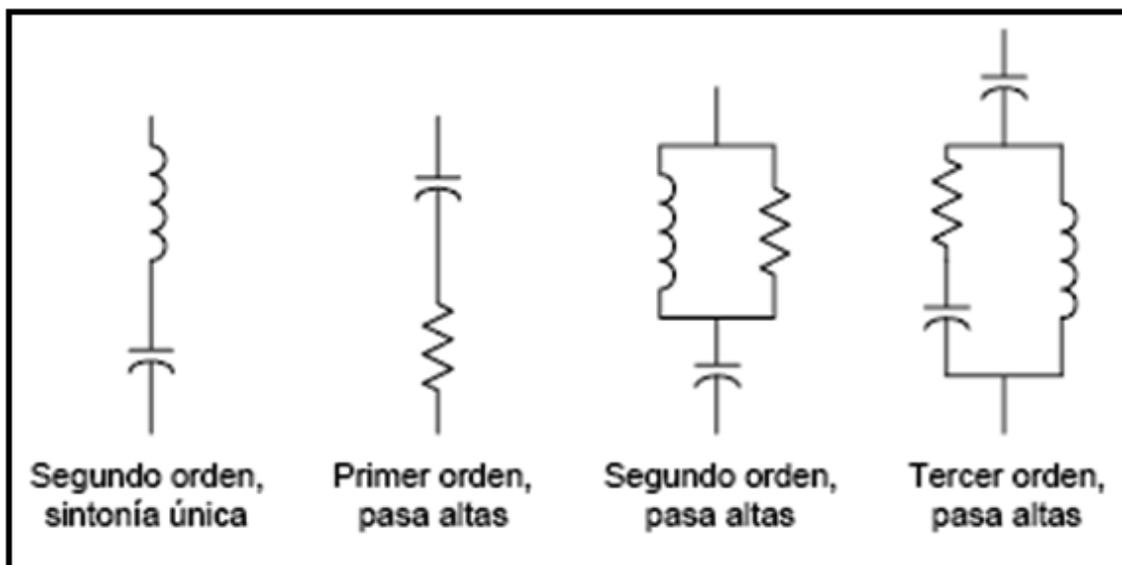
Fuente: CÁRDENAS, Victor. *Filtros activos híbridos*. p. 7.

7.2.1. Filtros pasivos

Los filtros pasivos pueden ser esquemas en paralelo con la carga, o en serie con la red. Esta última opción, normalmente, no se emplea en configuraciones de potencia, ya que la totalidad de la corriente de carga circula a través de ellos, lo que complica el diseño y eleva los costos. Una variante del filtro pasivo serie sería un filtro de primer orden, formado por un inductor que en serie con la carga, limita las armónicas de corriente inyectados a la red.

Sin embargo, sigue siendo un esquema que cuando al emplearla, se implanta con un valor de inductancia reducido. Los filtros pasivos paralelos (denominados en adelante simplemente como filtros pasivos) basan su funcionamiento en proporcionar a las corrientes armónicas una trayectoria de baja impedancia, mucho menor que la impedancia de la red.

Figura 37. Configuraciones básicas de filtros pasivos



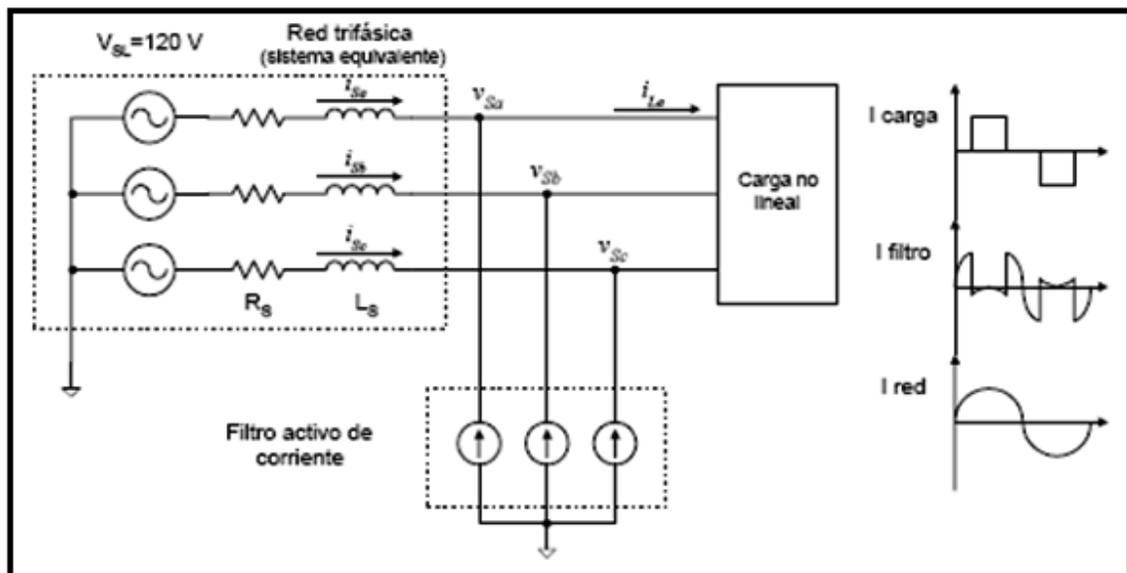
Fuente: CÁRDENAS, Victor. *Filtros activos híbridos*. p. 8.

7.2.2. Filtros activos

Los filtros pasivos paralelos funcionan como una trayectoria de baja impedancia para las corrientes armónicas generadas por la carga, los filtros activos funcionan como una fuente de corriente controlada, aunque también, puede configurarse como una impedancia variable.

Los filtros activos paralelos se diseñan usando inversores alimentados en tensión, con salida y control en corriente. En la figura 36 el filtro activo se modela como una fuente de corriente en paralelo con la carga no lineal. El objetivo es que el filtro activo suministre las componentes armónicas demandadas por la carga, y la red sólo suministre la componente fundamental, además, un filtro activo podría tener características para que realice el balance de carga en las fases, la compensación del factor de potencia, entre otros.

Figura 38. Estructura y forma de onda de un filtro activo de corriente



Fuente: CÁRDENAS, Victor. *Filtros activos híbridos*. p. 10.

7.3. Supresor de transientes

Los supresores de transientes son requeridos en instalaciones donde se utiliza equipo electrónico sensible (crítico). Los transientes o picos de voltaje pueden presentarse de manera repetida tales como: picos debidos a la conmutación de voltaje, *switches* o conmutación de cargas inductivas, o de manera aleatoria, tal como las descargas atmosféricas (rayos) o los provenientes de la red de alimentación. Los supresores se instalan, generalmente, en las terminales donde se alimenta la carga.

Hay dos categorías principales de supresores de transientes o de picos:

- Aquellos que atenúan los transientes, previniendo su propagación hacia los circuitos sensibles.
- Aquellos que desvían los transientes de las cargas sensibles de tal manera que limitan el voltaje remanente.

La atenuación de picos consiste en evitar la propagación de la fuente del transiente o evitar la incidencia del mismo en las cargas sensibles, esto se logra introduciendo filtros en serie dentro del circuito. El filtro, por lo general del tipo paso-bajo, atenúa el transitorio (alta frecuencia) y permite que la señal de potencia (baja frecuencia) continúe sin disturbios. El desvío de transitorios se logra con un dispositivo tipo limitador de voltaje. Un dispositivo limitador de voltaje es un componente que tiene una impedancia variable en función de la corriente que fluye a través del dispositivo o en la tensión entre sus terminales. El uso del dispositivo limitador de voltaje, permite que el circuito no se vea afectado por la presencia del dispositivo antes y después del transitorio, para cualquier tensión de estado estable por debajo del nivel de fijación o límite.

8. MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE ENERGÍA BAJO EL ESTÁNDAR IEC 61000-4-30

8.1. ¿Qué es la IEC 61000-4-30 clase A en un medidor de la calidad de energía?

El estándar IEC 61000-4-30 clase A elimina las suposiciones al momento de seleccionar con precisión un instrumento de calidad de energía. Este estándar define los procedimientos de medida de cada parámetro de calidad de energía para obtener resultados fiables, repetibles y comparables.

Además, determina la precisión, el ancho de banda y el conjunto de parámetros mínimos. Y lo que es más, los fabricantes ya tienen un parámetro de referencia para diseñar según los estándares de la clase A, allanando el campo para los técnicos a la hora de elegir instrumentos y mejorando así la precisión y fiabilidad de las medidas, así como la eficacia del trabajo.

Figura 39. **Standard IEC 61000-4-30**



Fuente: http://webstore.iec.ch/preview/info_iec61000-4-30. Consulta: noviembre-2011.

La medida y control de la calidad de energía aún se encuentra en desarrollo y es un campo en donde la aplicación de medidores es relativamente nuevo. A pesar de que las medidas eléctricas básicas como: la tensión y corriente se definieron hace tiempo, una gran cantidad de parámetros no se habían estandarizado antes, obligando a los fabricantes a desarrollar sus propios métodos de medida.

Actualmente, existen cientos de fabricantes en todo el mundo con procedimientos de medida exclusivos. Con tanta variedad de instrumentos, los ingenieros deben dedicar cierto tiempo a intentar comprender la funcionalidad de los mismos y los algoritmos de medida, en vez de ello se debería dedicar más tiempo a conocer la calidad de los sistemas eléctricos.

El IEC 61000-4-30 clase A estandariza las medidas de:

- Frecuencia de alimentación
- Magnitud de la tensión de alimentación
- *Flicker* (parpadeo), armónicas e interarmónicas
- Fluctuaciones
- Interrupciones
- Desequilibrios en la tensión de alimentación
- Transmisión de señales a través de la alimentación
- Cambios rápidos de tensión

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la IEC 61000-4-30 no estandariza aún las medidas de transitorios de alta frecuencia o fenómenos relacionados con la corriente, en concordancia con el desarrollo de las normativas al respecto de cada una de estas variables.

8.1.1. Los requisitos de la clase A

- La incertidumbre de medida se establece en el 0,1% de la tensión de entrada declarada. Los sistemas de medida de bajo costo con incertidumbres superiores al 1% pueden detectar de forma incorrecta fluctuaciones del -9%, cuando el umbral está establecido en el -10%. Gracias a un instrumento con certificación clase A, se puede clasificar con seguridad eventos con incertidumbres aceptadas internacionalmente. Ésta es especialmente importante al verificar la conformidad con las normas o al comparar los resultados entre los distintos instrumentos o partes.
- Las fluctuaciones e interrupciones se deben medir sobre un ciclo completo de señal y actualizar cada medio ciclo, permitiendo así a los instrumentos combinar la alta resolución del muestreo a medio ciclo con la precisión del cálculo del valor eficaz de un ciclo completo.
- Intervalos de agregación: un instrumento de calidad eléctrica comprime los datos adquiridos en períodos concretos que se denominan intervalos de agregación. Un instrumento de la clase A debe proporcionar datos en los siguientes intervalos de agregación:
 - 10/12 ciclos (200 ms) a 50-60 Hz; el tiempo del intervalo varía según la frecuencia de red.
 - 150/180 ciclos (3 s) a 50-60 Hz; el tiempo del intervalo varía según la frecuencia de red.
 - Las armónicas se deben medir con intervalos de 200 ms con conformidad al nuevo estándar IEC 61000-4-7/2002.

El uso de intervalos de 200 ms permite que los cálculos de armónicas se puedan sincronizar con otros valores como, por ejemplo, los de valor eficaz, THD y desequilibrio o desbalance en tensión.

- El algoritmo utilizado para el cálculo de armónicas (FFT) se especifica con exactitud de forma que los instrumentos de clase A alcancen magnitudes armónicas similares. La metodología de la FFT permite algoritmos infinitos que pueden dar como resultado una amplia serie de magnitudes de armónicas distintas. Si se estandariza a porciones de 5 Hz y se suman las armónicas e interarmónicas según las normas específicas, las medidas efectuadas con instrumentos de la clase A serán coherentes y comparables.

- La sincronización externa de tiempo es necesaria para alcanzar indicaciones de tiempo precisas, permitiendo la correlación exacta de datos entre distintos instrumentos. La precisión se especifica con un margen de ± 20 ms para los instrumentos de 50 Hz y $\pm 16,7$ ms para los de 60 Hz.
 - Sincronización del intervalo de 10 minutos con el reloj
 - Sincronización del intervalo de 2 horas con el reloj

Los instrumentos correspondientes a la clase B, son de mayor incertidumbre y su aplicación es en relevamientos estadísticos (campañas de medición) y la solución de problemas generales en la red. Se analizará el procesamiento de información que se realiza para las estimaciones de estos parámetros eléctricos para un instrumento de clase A.

8.2. Medición de *flicker* en redes eléctricas

La IEC 61000-4-30 indica, para la clase A, que la medición de *flicker* debe realizarse bajo las condiciones de la 61000-4-15, que es la norma en vigencia para la medición de este parámetro, siendo la IEC 868 su antecesora. Éstas describen el procesamiento de información, el diseño de filtros y la metodología para la medición estadística del fenómeno.

8.2.1. Introducción al índice de severidad PST del fenómeno del *flicker* de tensión

En la definición de la IEC 868, un instrumento de medición de *flicker* (*Flicker meter* – FlkM), es un equipo que simula el proceso fisiológico de percepción visual de un individuo frente a cualquier tipo de parpadeo luminoso y que entrega un indicador confiable sobre la reacción del observador independientemente de la fuente que la ocasione. Un medidor de *flicker* se expone a parpadeos de naturaleza secuencial (periódica) e individual (aleatoria). La medición de esta variable es en unidades de perceptibilidad. La evaluación estadística entrega unos indicadores del nivel de severidad del parpadeo conocidos como PST y PLT, que corresponden a una ventana temporal de 10 minutos y 2 horas respectivamente.

Los umbrales de percepción unitaria y PST unitario, corresponden a dos familias de amplitudes y frecuencias de modulación, tales que el primero permitirá evaluar el diseño de los filtros que reproducen el efecto fisiológico y el segundo el análisis estadístico del equipo. Los umbrales mencionados de perceptibilidad unitaria, a su vez se distinguen por frecuencia y tensión nominal de la red, siendo esta última la magnitud de selección de curvas para la aplicación en distintas redes.

En la cadena de procesamiento de información para medir PST se distinguen cinco bloques de análisis, que pueden agruparse en tres etapas:

- La primera corresponde a la adaptación de señal, que es una normalización de la envolvente de la señal según un valor RMS de larga duración.
- En la segunda etapa interviene una cadena de filtros que emulan las propiedades del filamento de una lámpara incandescente y el proceso fisiológico sensorial, conocido como cadena de efectos lámpara - ojo - cerebro (*lamp - eye - brain*). La información saliente es el *flicker* instantáneo en unidades de perceptibilidad.
- La tercera etapa corresponde al análisis estadístico del *flicker* instantáneo durante 10 minutos, para entregar el indicador PST y luego PLT.

8.2.2. Primera etapa: desmodulación

El proceso corresponde a desacoplar la señal de modulación de la portadora que sería principalmente la componente fundamental de red. Pero no solo ésta ocasiona *flicker* o puede contener modulación, sino que también, existe la modulación de armónicas, de manera que esta etapa debe contemplar un ancho de banda mayor al de 50 Hz más el ancho de banda de la modulación.

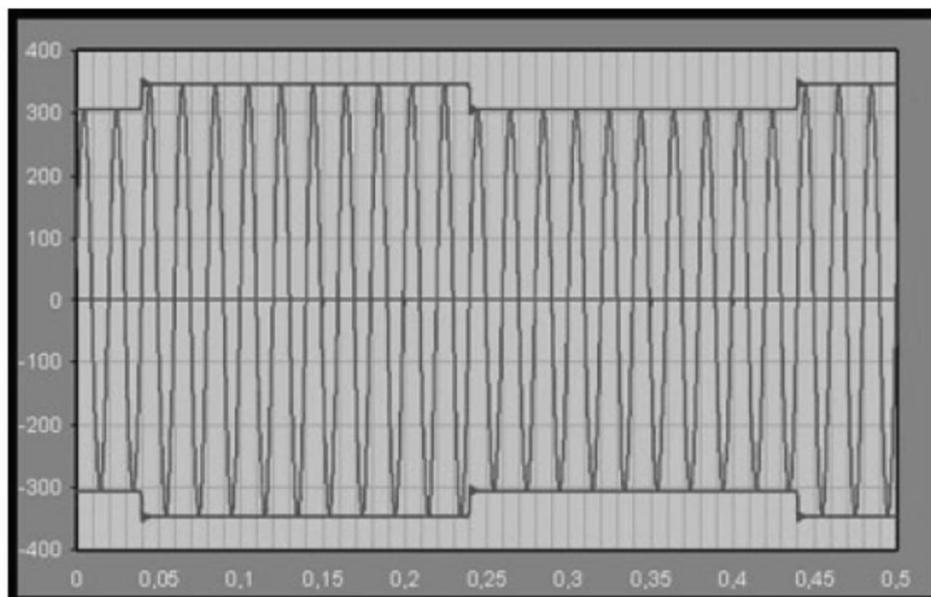
En la IEC 61000-4-15 se indica que el transformador de adaptación debe tener al menos un ancho de banda de 700 Hz, lo que permitiría visualizar sin distorsión hasta la armónica 13^o más la banda de *flicker* (35 Hz para sistemas de 50 Hz) y aproximadamente hasta el 14^o más 42 Hz para sistemas de 60 Hz.

El desacople es similar a la desmodulación de señales AM, la IEC propone un método cuadrático, consistente en la elevación a cuadrado de la señal, y un posterior filtrado de baja frecuencia.

Otros métodos más eficientes, como la transformación de Hilbert, permiten entregar mayor información acerca de la señal entrante, a través de la generación de una señal en el dominio complejo, es decir; tiene módulo y fase muestra a muestra, y permite informar por cada muestra de la señal el valor de la modulación, la frecuencia de red y el valor RMS instantáneo.

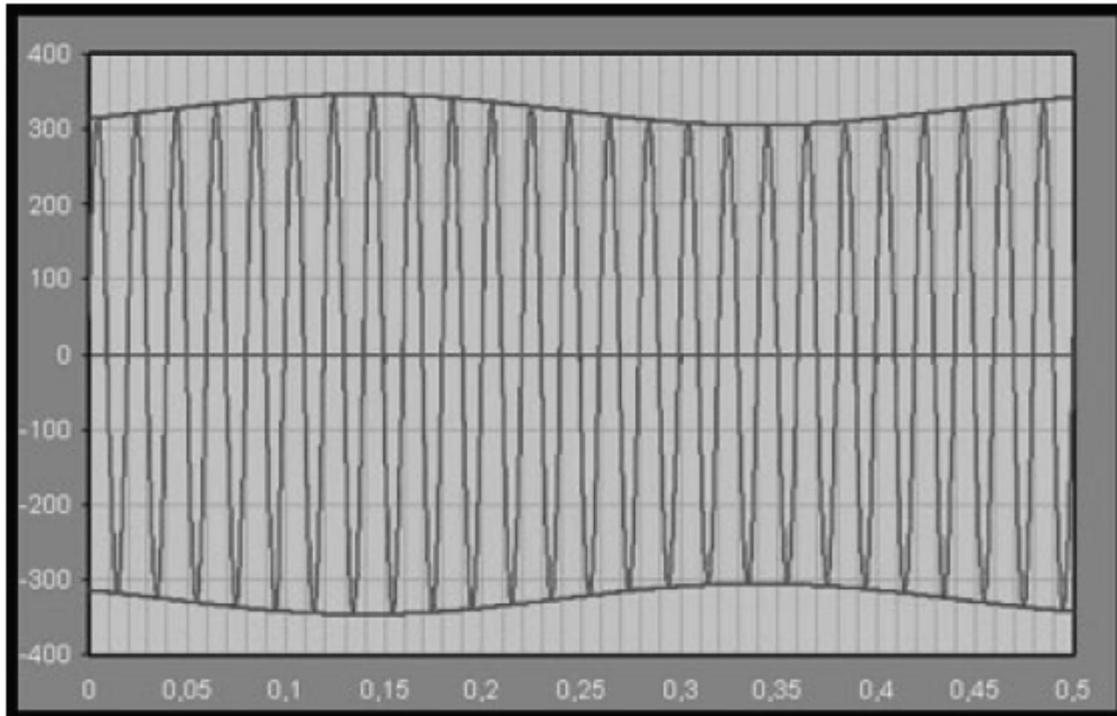
Otro método se le conoce como operador de energía Teager, correspondiente a un proceso no lineal que entrega muestra a muestra una señal equivalente a la modulación de la tensión de red. En comparación con la transformada de Hilbert pierde precisión frente al contenido armónico.

Figura 40. **Modulación cuadrada**



Fuente: <http://www.ecamec.com>. Consulta: noviembre-2011.

Figura 41. **Modulación sinusoidal**



Fuente: <http://www.ecamec.com>. Consulta: noviembre-2011.

8.2.3. Segunda etapa: proceso lámpara - ojo - cerebro

El ancho de banda que se evalúa en *flicker* es 0,05 ~ 35 Hz y 0,05 ~ 42 para sistemas 220 V/ 50Hz y 120 V/ 60Hz respectivamente. Para ello se procede a realizar un filtrado en una o múltiples etapas tal, que se considera un filtro de primer orden pasa altos y un pasa bajos *Butterworth* de sexto orden para el recorte de ancho de banda de la señal desmodulada. La señal en esta etapa debe contener valores de continua y de componentes generadas por el sistema de desmodulación nulas, tal que si se eleva al cuadrado se tendrán las siguientes magnitudes, sin considerar armónicas:

- Duplo de la Frecuencia de red (FRED)
- Duplo de la FRED +/- FFLK
- Duplo de la FRED +/- duplo de FFLK

El filtrado de mayor importancia corresponde a la cadena lámpara - ojo, denominado filtro de pesaje, el cual tiene ganancia unitaria para 8,8 Hz y luego decae para ambos sentidos de frecuencia, lo que implica que el ojo humano tiene mayor predisposición a fatigarse a 8,8 Hz. Para el resto de las frecuencias las amplitudes de modulación son mayores para causar el mismo efecto.

Además, de las características numéricas es importante resaltar que el filtro de pesaje representa la respuesta en frecuencia del ojo en forma conjunta con el filamento de un bulbo incandescente de 60 W. Lógicamente habrá filtros para los diferentes bulbos como ser 220 V/ 50 Hz, 120 V/ 60 Hz y 110 V/ 60 Hz. A medida que el bulbo es de mayor potencia, mayor es la constante de tiempo, observándose una mayor tolerancia al parpadeo de alta frecuencia, o bien un corrimiento de la respuesta en frecuencia hacia las bajas frecuencias.

El último bloque de esta etapa es la representación ojo - cerebro, representando el comportamiento no lineal y el efecto de acumulación de fatiga. La salida temporal de este último bloque corresponde al *flicker* instantáneo.

8.2.4. Tercera etapa: procesamiento estadístico

El proceso de esta etapa consiste en caracterizar el *flicker* instantáneo a partir del estudio de la curva de probabilidad acumulada. Es decir, no es meramente importante reconocer los picos, valores mínimo, máximos o medios, sino que a partir del mapa de probabilidades acumuladas deben identificarse quince percentiles que ponderados darán la estimación de PST.

8.3. Medición de la frecuencia de red

La medición de frecuencia de la red eléctrica tiene las más diversas aplicaciones en el campo de las mediciones, desde sencillos indicadores portables o de tablero hasta complejos sistemas de control y sincronismo de generación. La IEC61000-4-30 tiene sus requisitos bien tabulados para la medición de frecuencia, para los instrumentos definidos como clase A, con dos objetivos:

- El registro de frecuencia como índice de calidad
- La sincronización de la frecuencia de muestreo

Esta característica consiste en que la frecuencia de muestreo acompañe a las variaciones de red, para disminuir los errores en la estimación de magnitudes RMS de la fundamental y armónicas, evitando así la propagación a las demás variables medidas. Los rangos operativos de la medición según IEC clase A corresponden a 50 Hz +/- 7.5 Hz y en 60 Hz +/- 9 Hz con una misma exactitud para ambos casos de +/-10 mHz medidos cada 10 segundos.

La técnica sugerida en esta normativa es la medición de cruce por cero, pero permite alternativamente implementar otras técnicas siempre que los resultados sean equivalentes. Queda abierta así la posibilidad de implementar técnicas de filtrado y descomposición ortogonal entre otras.

Analizando la historia del arte, las técnicas digitales emplazadas desde los años 80 hasta la actualidad, pueden agruparse en tres familias principales y una cuarta clasificación que agrupa otras técnicas menos difundidas.

8.3.1. Zero xing (cero alterno)

A partir de la definición de frecuencia que corresponde a la cantidad de períodos por segundo, podríamos aseverar teóricamente que el método más sencillo es la contabilización del tiempo entre cruces por cero de la tensión, conociendo ciclo a ciclo el período y así entonces la frecuencia.

La técnica de cruce por cero, muy utilizada en mediciones analógicas tiene sus bemoles en cuanto a la implementación a nivel digital. Hay técnicas basadas en cruce por cero modificado que detectan las muestras que están en el entorno de cero y luego se interpola mediante cuadrados mínimos con un polinomio de grado L , para estimar el instante más próximo a cero. La aplicación más común es la interpolación lineal o cuadrática, donde $L = 1$ y 2 respectivamente. Si bien se presenta como un proceso simple requiere pre-procesamiento debido a que no es inmune a ruidos y componentes de mayor frecuencia.

Las metodologías basadas en técnicas de Fourier y Hilbert permiten ser más eficientes debido al uso de información precalculada para otras aplicaciones.

8.3.2. FFT

Es la abreviatura usual del inglés *Fast Fourier Transform* de un eficiente algoritmo que permite ejecutar un cálculo matemático básico y de frecuente empleo, la transformada rápida de *Fourier* (implementada como FFT) tiene como objetivo principal el cálculo de valores RMS y fase de la componente fundamental y sus armónicas. A partir de esto se podrá reutilizar la medición de fase de la fundamental y estimar la frecuencia red con excelente precisión.

En los sistemas de medición sin implementación de la FFT se podrá recurrir a procesos similares más eficientes que indicarán solo las armónicas de interés, generando baja carga computacional extra.

8.3.3. Hilbert

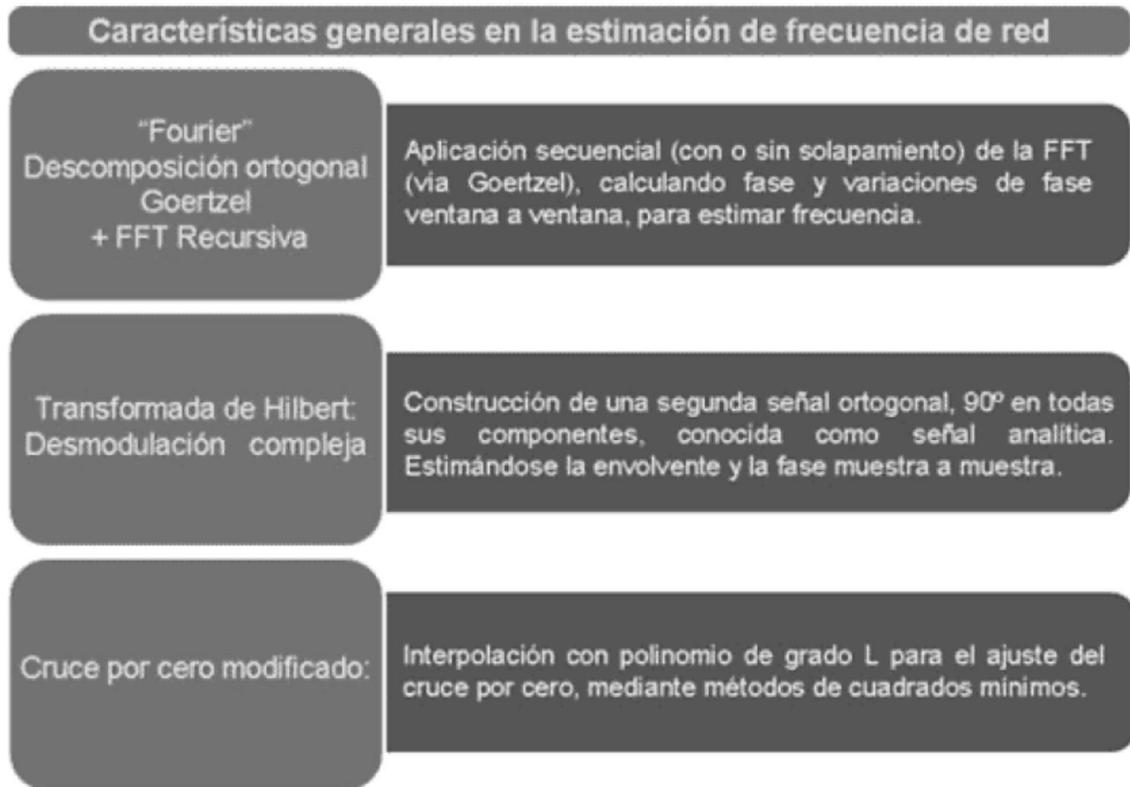
El método de la transformada de Hilbert se utiliza en la demodulación de señales para extraer la información de la envolvente. Su aplicación más conocida es la demodulación de señales AM en sistemas de comunicación. En el campo de la medición de parámetros eléctricos puede utilizarse para la obtención de la envolvente de la señal de tensión (ΔV), para la posterior determinación del Pst.

La medición de frecuencia se deriva a partir de la información provista por la envolvente y fase de la señal muestra a muestra. No es aconsejable su aplicación con fines únicos de medición de frecuencia, pero demuestra ser un método altamente ventajoso al aplicarlo paralelamente con la medición de *flicker* y valores RMS de la señal.

Las estimaciones de frecuencia pueden ser procesadas con frecuencias de muestreo relativamente bajas, con un piso de 200 Hz. A partir de 4 muestras por ciclo de fundamental de 50 Hz puede medirse la frecuencia de red con precisión, en un rango operativo menor a 40 Hz y hasta los 99 Hz inclusive.

En el gráfico de la figura 42 se presenta un resumen de las tres técnicas descritas hasta el momento que se utilizan como algoritmos para determinar el valor de la frecuencia en las redes eléctricas.

Figura 42. **Técnicas de estimación de la frecuencia**



Fuente: <http://www.ecamec.com>. Consulta: noviembre-2011.

8.4. Lineamientos de la IEC61000-4-30 para la detección de eventos

La IEC61000-4-30 indica la resolución tanto temporal como de amplitud, para la detección e indicación de los eventos de variación del valor RMS. El contenido de la medición de RMS debe considerar, además de la componente fundamental todo el espectro frecuencial que incluye armónicas, inter-armónicas y eventos transitorios hasta el orden 50^o, es decir, el valor RMS contiene un ancho de banda mínimo de 2500 Hz y 3000 Hz para 50 Hz y 60 Hz respectivamente.

La incertidumbre exigida por la norma para la indicación de amplitud del evento es mayor que la requerida para mediciones RMS del intervalo de agregación de por ejemplo 10 minutos. El error para los instrumentos clase A es el siguiente:

$$\Delta U = \pm 0.2 \% U_n$$

8.4.1. Resolución temporal

Los registros de tensión propuestos por la IEC indican ventanas sin solapamiento de 200 mseg para redes de 50 y 60 Hz. En cambio, la detección de eventos propuesta por la IEC se basa en la medición de RMS con resolución temporal de 1 ciclo actualizado cada ½ ciclo. Se manifiesta como ventana deslizante con un 50% de solapamiento. La resolución temporal para detectar inicios y fin de perturbaciones será de ½ ciclo de fundamental, es decir 10 mseg y 8,33 mseg para 50 Hz y 60 Hz respectivamente.

8.4.2. Criterio de detección y caracterización de eventos

Los tres eventos que se detectan son las subtensiones (*dips*), sobretensiones (*swells*) e interrupciones. La asignación de umbrales de detección no es propiedad de la IEC61000-4-30 sino que corresponden a otras normativas vigentes ó a contratos de prestación de servicios.

Se deberán fijar al menos tres umbrales uno para cada evento. Con respecto al estudio de duración de éstos dependiendo los casos suelen determinarse entre dos y tres rangos de duración para los eventos. Los eventos quedarán caracterizados por la duración y el mínimo o máximo valor ocurrido entre los intervalos de detección, según sea una sub o sobre tensión.

8.4.3 Subtensiones (*sags*)

Los umbrales, generalmente utilizados, están entre 85-90% destinados a estudios estadísticos y valores del entorno del 70% para cuestiones contractuales. Suele indicarse un segundo parámetro, el umbral de histéresis, para diferenciar la referencia entre un inicio y fin de evento.

El inicio de una subtensión se determina cuando la tensión es menor al umbral y la extinción cuando la tensión es mayor al mismo umbral más la histéresis. Los cruces de tensión por cada umbral deben registrar con fecha y hora. La duración total del evento depende si del tipo de red analizado. En monofásica, la duración corresponde al tiempo entre marcas de inicio y fin.

En cambio, en registros trifásicos el inicio se marca cuando algunas de las tres fases activas cruzan el umbral y la finalización del evento cuando las tres fases recuperan su tensión en la banda de operación. Finalmente, el evento detectado tendrá las fechas y horas de inicio y fin indicadas con resolución de 10ms, junto con el mínimo RMS registrado. También, este último valor puede ser reemplazado por la diferencia entre la tensión de referencia y el mínimo registrado.

8.4.4. Sobretensiones (*swells*)

El umbral de detención que suele utilizarse corresponde a valores mayores a 110% de la tensión nominal, junto con el mismo nivel de histéresis del caso anterior. La detección en registros monofásicos es idéntica a la de subtensiones. En cambio para registros trifásicos el inicio del evento es cuando, al menos, una de las fases cruza el umbral y finaliza cuando todas las fases retornan a la banda de operación.

El evento quedará catalogado con la duración a partir del intervalo señalado por las marcas de inicio y fin, más el máximo valor de RMS registrado.

8.4.5. Interrupciones (*dips*)

Las interrupciones son registros similares al de subtensiones aplicándose la misma metodología de detección. Los umbrales utilizados suelen depender de los criterios utilizados para designar que un sistema carece de tensión. Teóricamente una red interrumpida tendrá valor de 0 V, pero resultaría improbable solo indicar un evento de interrupción cuando se mida cero volts. Para ello algunos casos la IEEE designa 1% y la IEC 10% de la tensión nominal. La caracterización del evento sólo toma los valores de inicio y fin, sin importar el valor de RMS mínimo

8.5. Medición de armónicas e interarmónicas

La presencia de armónicas en las redes eléctricas es un fenómeno existente y conocido en el mundo de la transmisión de energía eléctrica. Las características que identifica este fenómeno es que la frecuencia de estas componentes no se corresponde con la generación. La existencia de dichas componentes en las redes de distribución y transmisión no es causa de una única fuente, sino de aportes de transformadores, (debido a la corriente de magnetización), sistemas de control de iluminación electrónicos y electromagnéticos, sistemas complejos de electrónica de potencia industrial y de posibles casos de resonancia en bancos de capacitores con la red amplificándose una zona del espectro.

El objetivo del análisis armónico de tensión y corriente es identificar las condiciones de la red eléctrica y llevar a cabo estudios de índole contractual entre usuario y empresa de servicio eléctrico, de mantenimiento y mejora de la calidad de potencia.

8.5.1. Instrumental para medición de armónicas

El instrumental para adquisición de la señal de tensión o corriente tiene que garantizar un ancho de banda determinado de modo que los transductores no distorsionen el ancho de banda analizado.

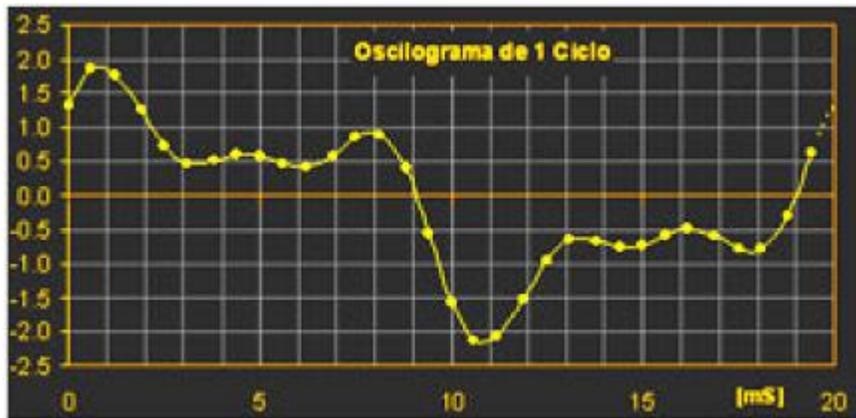
La técnica de procesamiento digital de información conocida Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés). La ventana de tiempo (VT) de procesamiento tiene un papel fundamental en la FFT. Cuando mayor sea la VT mas información espectral contiene, por lo tanto mayor resolución espectral (RE) se consigue. La RE es la inversa de VT, y su valor es equivalente a la mínima subdivisión de la escala de frecuencias que el proceso podrá resolver. De esta manera, todas las intensidades de las componentes frecuenciales corresponderán a la escala de frecuencias graduada en múltiplos de RE, hasta el límite de frecuencia máximo conocido como frecuencia de *Nyquist*.

En los siguientes gráficos se expone el efecto de la ventana sobre el resultado del análisis espectral, para un mismo espectro de frecuencias:

- Fundamental → 1
- Armónicas 3° y 5° → 0,66 y 0,4 respectivamente
- Interarmónicas → 40 y 60 Hz
- Interarmónicas → 125 y 175 Hz

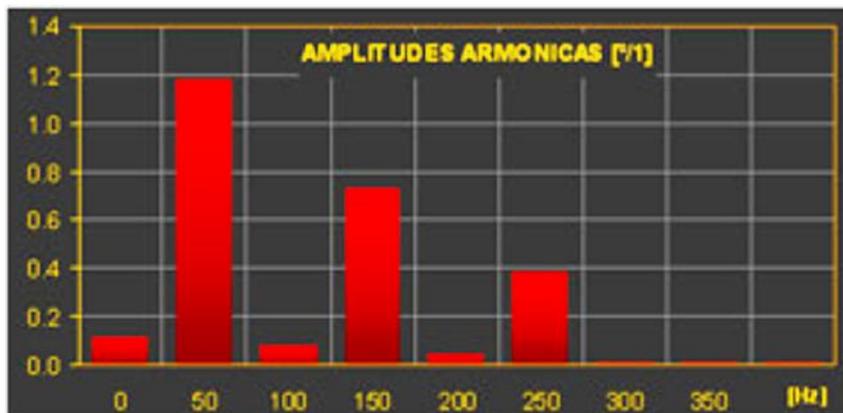
En la figura 43 se presenta un oscilograma con una VT de 20 mseg, con el contenido espectral en la posterior figura. Este caso tiene una RE=50 Hz lo cual permite reconocer la existencia de armónicas de 3° y 5°, y también de armónicas pares, pero ficticios. A este efecto se lo denomina desparramo o en inglés *leakage* de energía.

Figura 43. **Oscilograma de 1 ciclo**



Fuente: <http://www.ecamec.com>. Consulta: noviembre-2011.

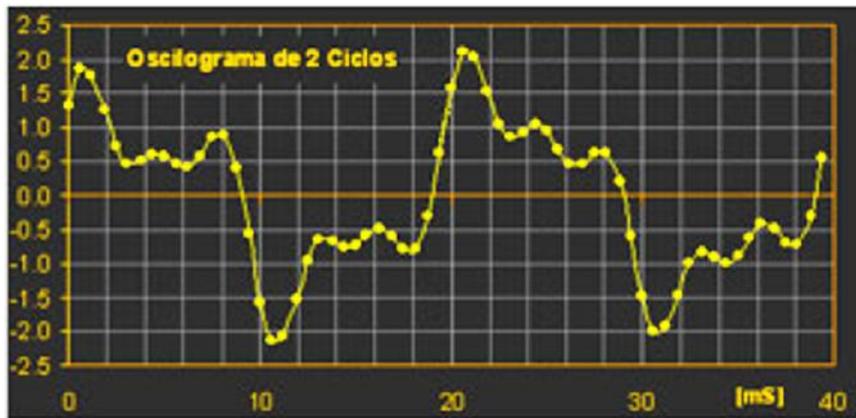
Figura 44. **Amplitudes armónicas**



Fuente: <http://www.ecamec.com>. Consulta: noviembre-2011.

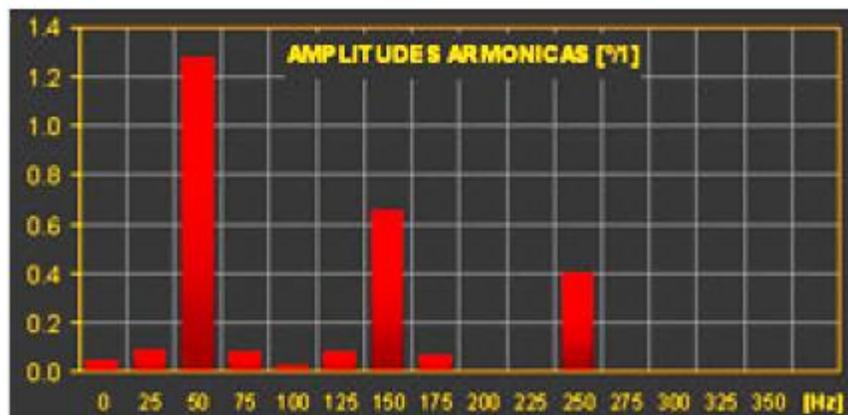
En las figuras 45 y 46 se presenta el análisis con VT de 40 ms y con RE=25 Hz. Este análisis supera al anterior en resolución espectral y permite visualizar las interarmónicas de 150+/-25Hz. Sin embargo, la RE no logra resolver las interarmónicas 50+/-10Hz, obteniendo el efecto de *leakage* en la zona adyacente y sobre estimando la componente fundamental.

Figura 45. **Oscilograma de 2 ciclos**



Fuente: <http://www.ecamec.com>. Consulta: noviembre-2011.

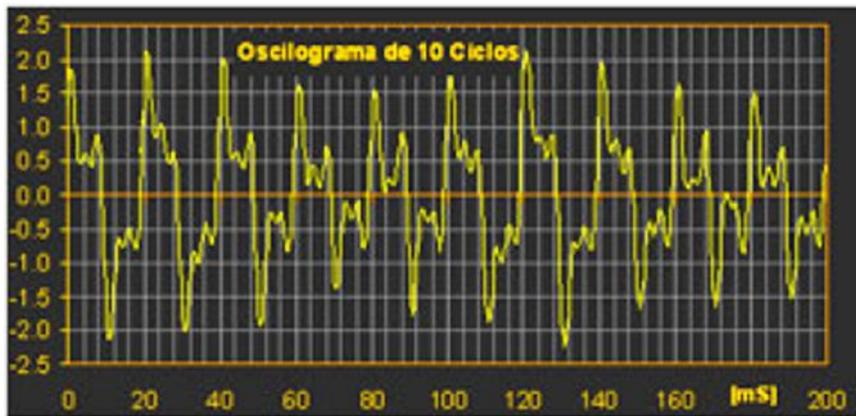
Figura 46. **Amplitudes armónicas**



Fuente: <http://www.ecamec.com>. Consulta: noviembre-2011.

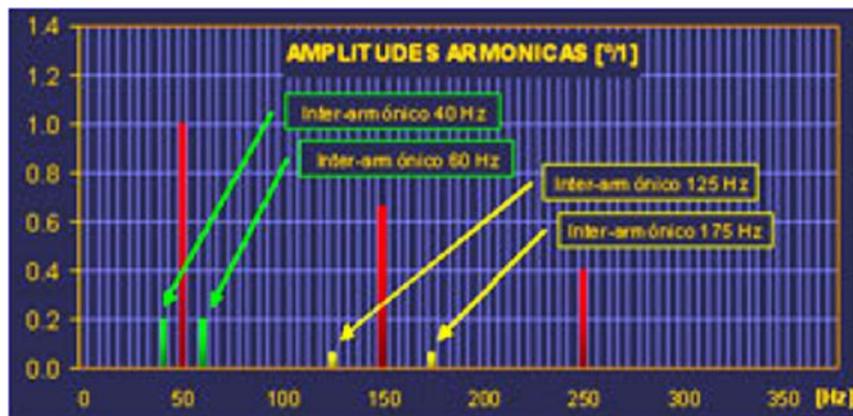
Por último, en las figuras 47 y 48, la VT es de 200 mseg, con RE=5 Hz. Esta resolución permitirá identificar sin efectos de componentes ficticias la componente fundamental y sus armónicas, además de las cuatro interarmónicas.

Figura 47. **Oscilograma con 10 ciclos**



Fuente: <http://www.ecamec.com>. Consulta: noviembre-2011.

Figura 48. **Amplitudes armónicas**



Fuente: <http://www.ecamec.com>. Consulta: noviembre-2011.

8.6. Requerimientos de la IEC

Los requisitos de la IEC se encuentran detallados en la IEC61000-4-30 y IEC61000-4-7. Entre ambos estándares determinan:

- El método de agregación de información
- La resolución espectral
- El ancho de banda (máxima armónica)
- Las incertidumbres
- Método de medición de armónicas
- Método de medición de armónicas e interarmónicas

El método de agrupación es el mismo utilizado para mediciones RMS, correspondiente a tres clases de agrupaciones:

- Agregación por ciclos: media cuadrática de 150 ciclos (180 ciclos para 60Hz de frecuencia nominal de red).
- Agregación temporal de ciclos: media cuadrática de 10 minutos de paquetes de 10 ciclos.
- Agregación temporal: media cuadrática de 12 paquetes de 10 minutos.

La ventana temporal no se encuentra asignada por un determinado tiempo, sino identificada con 10 y 12 ciclos de la componente fundamental, para 50 Hz y 60 Hz nominales respectivamente. Esto impone que la frecuencia de muestreo sea variable, siguiendo las variaciones de la frecuencia de red en el rango 50 +/- 7,5 Hz y 60 +/- 9 Hz.

CONCLUSIONES

1. La realización de un estudio de la calidad de la potencia eléctrica en una industria permite conocer con exactitud el comportamiento y los valores de los parámetros eléctricos, de tal manera que se obtienen resultados muy valiosos en cuanto a magnitudes de corriente, voltaje, factor de potencia, distorsión armónica, *flicker*, *sags*, *swells*, transitorios de voltaje, etc. así también, su incidencia tanto en el sistema propio como en el sistema interconectado.
2. Las principales causas de problemas y perturbaciones en la red eléctrica de una industria están relacionados con desbalance de cargas en sistemas trifásicos, arranque directo de cargas trifásicas grandes que elevan considerablemente el valor de la corriente, motores eléctricos de inducción por sus características de operación y finalmente el uso de electrónica de potencia que originan armónicas en la red.
3. Un estudio de la calidad de la potencia eléctrica, es un proceso en el que se analiza cuidadosamente el estado de la instalación eléctrica en una industria o en un sistema, se evalúan los resultados obtenidos con ese estudio y finalmente se proponen cambios o modificaciones que corrijan los problemas hallados.
4. El efecto que tiene la distorsión armónica y un bajo factor de potencia es operación incorrecta en el sistema y en las máquinas eléctricas, además del riesgo de tener penalizaciones cuando sus magnitudes sobrepasan las establecidas en los reglamentos.

5. El uso de filtros activos híbridos es una solución bastante práctica para resolver problemas con factor de potencia y distorsión armónica, dado que este filtro LC se sintoniza a frecuencias de las armónicas impares lo cual tiene un efecto directo en la eliminación o reducción de las mismas.

6. En Guatemala se cuenta con las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD) emitidas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), cuyo objetivo es establecer los derechos y obligaciones de los prestatarios y usuarios del servicio eléctrico de distribución, índices o indicadores de referencia, para calificar la calidad con que se proveen los servicios de energía eléctrica.

7. El estándar IEC 61000-4-30 clase A elimina las suposiciones al momento de seleccionar con precisión un instrumento de calidad de energía. Este estándar define los procedimientos de medida de cada parámetro de calidad de energía para obtener resultados fiables, repetibles y comparables.

RECOMENDACIONES

1. La normalización o estandarización respecto a los parámetros de la calidad de la potencia eléctrica es muy importante, debido a que permite mantener un sistema eléctrico confiable, seguro, pero principalmente dentro de los valores establecidos para funcionar correctamente, por lo que es necesario que todo profesional en esta área conozca y practique las normas allí indicadas.
2. Toda industria, ya sea textil, agropecuaria, manufacturera, alimenticia, etc., consume grandes cantidades de energía eléctrica, por lo que se debe considerar seriamente como parte del plan de mantenimiento preventivo verificar cada uno de los parámetros definidos en este trabajo de graduación con el propósito de evaluar posibles oportunidades de ahorro, fallas potenciales y principalmente cumplir con las normas nacionales para evitar penalizaciones.
3. Actualmente, la calidad de la potencia eléctrica está tomando bastante importancia debido al ahorro energético que está ligado a la reducción de costos por operación, por lo que se vuelve necesario que todo profesional en la ingeniería eléctrica desarrolle sus labores profesionales basado no sólo a normas nacionales; sino que utilice los estándares internacionales respecto a estos temas.

4. Actualmente, existen varias soluciones para cada tipo de problema encontrado en el sistema eléctrico de una planta industrial, cada problema tiene una causa raíz que lo origina, para saberlo es necesario contar con la experiencia y conocimiento del tema, por lo que se debería enfocar la preparación del futuro profesional egresado de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, en la resolución de problemas debido a la mala calidad de la potencia eléctrica en el sector industrial de Guatemala.

BIBLIOGRAFIA

1. ABREU M., Augusto. *Manual de la calidad de la potencia*. Venezuela: 2005. 126 p. [en línea] <http://grupos.emagister.com>. [Consulta: 12 de febrero de 2011].
2. Asociación Guatemalteca de Exportadores. *Internacionalización de pymes*. [en línea]: <http://www.export.com.gt>. [Consulta: 19 de febrero de 2011].
3. Cámara de Madrid. *Manual de auditorías energéticas*. [en línea]: <http://www.camaramadrid.es>. [Consulta: 4 de noviembre de 2011].
4. CÁRDENAS, Víctor Manuel. *Filtros activos híbridos*. México: 1999. 125 p. [en línea]: www.cenidet.edu.mx. [Consulta: 3 de agosto de 2011].
5. CIDRÁS, J.; CARRILLO, C. *Análisis de redes eléctricas*. España: 1995. 466 p. [en línea]: <http://webs.uvigo.es>. [Consulta: 21 de mayo de 2011].
6. Comisión de la Industria de Vestuario y Textiles. *Guatemala delivers*. [en línea]: <http://www.vestex.com.gt>. [Consulta: 10 de febrero de 2011].
7. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Compendio de normas técnicas*. Guatemala: Serviprensa, 2010. 287 p.

8. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Girona, [en línea]: <http://eia.udg.es>. [Consulta: 19 de julio de 2011].
9. DGIEYM. *Manual de auditorías energéticas*. España: Imprenta Modelo, 2003. 222 p.
10. ECAMEEC. *Calidad de energía*. [en línea]: <http://www.ecameec.com>. [Consulta: 2 de julio de 2011].
11. GONZÁLEZ, Francisco Javier. *Fundamentos teóricos sobre armónicas*. 2ª ed. Guatemala: Formación Siglo XXI, 1999. 170 p.
12. International Electrotechnical Commission. *Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*. 2ª ed. Suiza: 2008. 270 p. [en línea]: <http://www.iec.ch>. [Consulta: 13 de abril de 2011].
13. MÉNDEZ, Jael. *Corrección del factor de potencia*. México: 2004. 195 p. [en línea]: <http://catarina.udlap.mx>. [Consulta: 5 de mayo de 2011].
14. *Power Quality & Energy Monitoring*. [en línea]: <http://www.pqint.com>. [Consulta: 22 de abril de 2011].
15. *PQ Global*. [en línea]: <http://www.pqglobal.com>. [Consulta: 1 de agosto de 2011].
16. VEDAM, R. Sastry; SARMA, Mulukutla S. *Power quality*. United States of America: Taylor & Francis, 2002. 283 p.