



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y**  
**ELÉCTRICA**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CALIDAD DE LA ENERGÍA**  
**EN SISTEMAS ELÉCTRICOS CON CARGAS ACTIVAS Y**  
**PASIVAS**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO ELECTRICISTA**

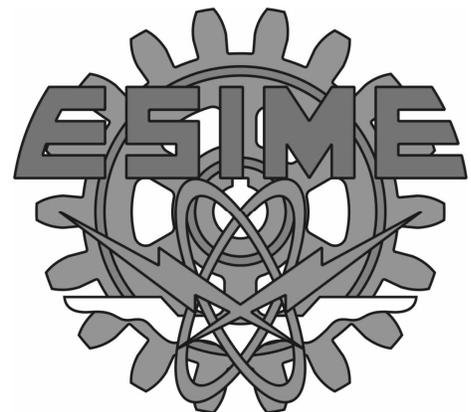
PRESENTAN:

**Monroy Carreño Patricia**  
**Ramírez Jurado José Quetzalcóatl**

ASESORES:

ING. ERIKA VIRGINIA DE LUCIO RODRÍGUEZ  
ING. JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

México DF. 2009



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTRICA**  
**UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”**

**T E M A D E T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN  
DEBERA(N) DESARROLLAR**

**INGENIERO ELECTRICISTA**  
**TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL**  
**C. JOSÉ QUETZALCOATL RAMÍREZ JURADO**  
**PATRICIA MONROY CARREÑO**

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CALIDAD DE LA ENERGÍA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS  
CON CARGAS ACTIVAS Y PASIVOS”**

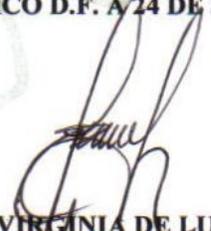
DETERMINAR LA RESPUESTA ELÉCTRICA EN CARGAS PASIVAS Y ACTIVAS MONOFÁSICAS Y TRIFÁSICAS, CON MEDICIONES EN TIEMPO REAL, PARA PREVER LA OPERACIÓN DE SISTEMAS EN TÉRMINOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA.

- INTRODUCCIÓN
- FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA
- MARCO CONTEXTUAL
- ESTUDIO EXPERIMENTAL
- ANÁLISIS DE RESULTADOS E INFERENCIAS
- ESTUDIO DE COSTO BENEFICIO
- CONCLUSIONES
- ANEXOS
- BIBLIOGRAFÍA

**MÉXICO D.F. A 24 DE SEPTIEMBRE 2009**

**ASESORES**

  
**ING. JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ**

  
**ING. ÉRIKA VIRGINIA DE LUCIO RODRÍGUEZ**

  
**ING. JORGE HERRERA AYALA**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE**  
**INGENIERÍA ELÉCTRICA**

  
**JEFATURA DE**  
**INGENIERIA ELECTRIC**

Agradezco:

*A mis padres esta tesis esta dedicada a ellos por su apoyo, amor y consejos, gracias a ello e logrado una de mis mayores metas en mi vida mi carrera profesional. Gracias a su apoyo económico, ético y emocional, admiro su fuerza para solucionar cada problema que se les atraviesa y el amor y apoyo entre ustedes para formar una gran familia. A mi padre Roberto Monroy Zuñiga por ser un gran hombre y por que toda mi vida siempre será la persona que mas sabe. A mi madre Eugenia Lili Carreño que es una gran consejera y una gran mujer por que siempre atendido un consejo para cada momento.*

*Mis hermanos Mireya, Roberto, y Carlos por su apoyo y por los momentos divertidos a su lado.*

*Mis asesores a los ingenieros EriKa Delucio y José Antonio que lograron que esta tesis se hiciera realidad, nos apoyaron tiempo, consejos y accesorias.*

*El tiempo y el apoyo de cada día desde que te conocí pero principalmente el esfuerzo de estar desde el inicio hasta el final de esta tesis gracias a Eduardo Sánchez Arguelles.*

*Mi institución por sus conocimientos que e adquirido durante 5 años de carrera y las pernas que conocí en ella.*

**Patricia Monroy Carreño**

Agradezco a todas aquellas personas que hicieron que este trabajo fuera posible.

*En especial agradezco a mis padres, por confiar siempre en mí y nunca negarme su apoyo ni en las buenas ni en las malas. Por estos larguísimos cinco años de estudios y por toda la vida que nos queda por delante, muchas gracias.*

*A esa persona tan especial para mí, que creyó en mí a pesar de todo y que ahora comparte su vida conmigo, me refiero a ti, Tlaneci Alicia Meza Sánchez, mi Kissita, muchas gracias por todo.*

*A todos mis amigos, por brindarme su confianza y apoyo, sus palabras de aliento y sus reproches, que ayudan muchísimo, y a quienes me tienen en consideración de alguna u otra forma, gracias.*

*A todos aquellos maestros, de quienes me llevo lo mejor, quienes más que impartir solamente conocimientos técnicos, nos daban lecciones de vida, personal y profesional y cátedras sobre el placer de existir, gracias a todos ellos.*

*Y a todas las personas que tuvieron fe en mí, familiares, amigos y gente querida que ya no nos acompaña en este mundo, muchas gracias a todos ustedes.*

*Porque mis triunfos no son solo míos, sino de todos ustedes.*

**José Quetzalcóatl Ramírez Jurado**

# ÍNDICE

Índice de figuras	V
Índice de tablas	XI
Magnitudes y unidades derivadas más usadas en ingeniería eléctrica.	XII
Objetivo	XIV
Introducción	XV

## Capítulo I. Fundamentación Teórica

1.1. Sistemas de distribución de energía eléctrica	2
1.2. Tipos de cargas eléctricas	2
1.2.1. Cargas lineales	2
1.2.2. Cargas no lineales	3
1.3. Elementos para la calidad de la energía eléctrica	4
1.3.1. Continuidad en el servicio	4
1.3.2. Variación de Frecuencia	5
1.3.3. Sobre tensiones	5
1.3.4. Variaciones de tensión	5
1.3.5. Fuentes de disturbio	8
1.3.6. Ruido eléctrico	9
1.3.7. Transitorios	9
1.3.8. Defasamiento	10
1.3.9. Muecas (notch)	11
1.3.10. Factor de cresta	11

1.3.11.	Distorsión armónica	12
1.4.	Mitigación de armónicas	18
1.5.	Corrección de factor de potencia en sistemas con THD	19

## **CAPITULO II. MARCO CONTEXTUAL**

2.1.	El Problema de los Armónicos	22
2.2.	Efectos en el neutro.	23
2.3.	Estudios de casos referenciales.	23
2.3.1.	Conexiones Sueltas.	24
2.3.2.	Errores de instrumentos convencionales por efectos de las armónicas.	27
2.3.3.	Estudio de calidad de la Energía Eléctrica.	28

## **Capitulo III. Estudio Experimental**

3.1.	Metodología para el estudio experimental.	39
3.2.	Desarrollo Experimental	39
3.2.1.	Identificar y armar redes o sistemas	40
3.2.2.	Definir el sistema bajo prueba	41
3.2.3.	Registrar mediciones en tiempo real	41
3.2.4.	Transferencia de datos medidos la PC	44
3.2.5.	Clasificación y estructuración de datos	46
3.2.6.	Análisis de los datos e inferencias.	78

## CAPITULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS E INFERENCIAS

4.1.	Resultados relevantes, cargas pasivas.	80
4.2.	Resultados relevantes, cargas no lineales	81
4.2.1.	Respuesta eléctrica con un sistema trifásico que alimenta 13 pc por medio de 7 ups	81
4.2.2.	Respuesta eléctrica con un sistema trifásico que alimenta 13 pc por medio de 7 ups y 2 sistemas de aire acondicionado bifásicos	83
4.3.	Inferencia de los valores experimentales a la instalación eléctrica	85
4.4.	Mitigación de armónicas.	85
4.4.1.	Reducir la aportación de corrientes armónicas.	85
4.4.2.	Filtros activos.	85
4.4.3.	Filtros pasivos.	86

## CAPITULO V. ESTUDIO DE COSTO BENEFICIO

5.1.	Costos de mantenimiento	89
5.2.	Beneficios	89
5.3.	Penalización y bonificación por factor de potencia	90
	CONCLUSIONES	96
	ANEXO	99
	GLOSARIO	102
	BIBLIOGRAFÍA	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Cargas pasivas	3
Figura 1.2.	Conexión del horno de microondas, a) Esquema eléctrico b) Diagrama físico.	3
Figura 1.3.	Medición del horno de microondas; a) diagrama eléctrico, b) diagrama físico.	3
Figura 1.4.	Interrupción de energía	4
Figura 1.5.	Forma de onda de tensión con variación de frecuencia.	5
Figura 1.6.	Variaciones de tensión. (a) Variación lenta de tensión, (b) Variación rápida de tensión.	6
Figura 1.7.	Variación rápida de tensión	6
Figura 1.8.	Microcortes de tensión.	7
Figura 1.9.	Corte largo de tensión	7
Figura 1.10.	Depresiones en la onda de tensión.	8
Figura 1.11.	(a) Ruido eléctrico presente en la señal senoidal proporcionada por la red eléctrica, (b) Impulso eléctrico.	9
Figura 1.12.	Impulso transitorio.	10
Figura 1.13.	Dos ondas senoidales con $\theta$ grados de defasamiento entre ellas.	11
Figura 1.14.	Muecas en la onda de tensión.	11
Figura 1.15.	Definición del factor de cresta	12
Figura 1.16.	Forma de onda original y sus componentes armónicos 1 <sup>a</sup> , 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> , 11 <sup>a</sup> .	13
Figura 1.17.	Efecto en la tensión por la conmutación de capacitares.	20
Figura 1.18.	Conexión de un capacitor estático para corregir el FP.	20

Figura 1.19.	Circuito con Capacitor que actúa como compensador del FP.	23
Figura 2.1.	Fuente de corriente monofásica tipo “Switch”	24
Figura 2.2.	Las fluctuaciones de tensión provocan el mal funcionamiento de los equipos y el parpadeo de la iluminación.	25
Figura 2.3.	La forma de onda captada muestra las fluctuaciones de tensión entre la fase A y el neutro en valor efectivo debidas al interruptor efectuoso de la compañía eléctrica.	25
Figura 2.4.	Arco en un interruptor trifásico de cuchilla.	26
Figura 2.5.	Diagrama del circuito cuesta	30
Figura 2.6.	Medición registrada el día 31/03/2008, a las 18:58 h, en donde se observa una importante depresión de tensión en la fase A del Transformador 1, el evento de mayor importancia debido a su duración.	30
Figura 2.7.	Medición registrada el día 02/04/2008, a las 13:08 h en donde se observa una importante depresión de tensión en la fase A del Transformador 1, el evento de mayor importancia debido a su magnitud.	32
Figura 2.8.	Medición registrada el día 02/04/2008, en donde se observa una importante depresión de tensión y prácticamente una desaparición de la corriente de línea, entre fases B y C del Interruptor Termomagnético de 300 A, el evento de mayor importancia por su duración y magnitud.	34
Figura 2.9.	Medición registrada el día 02/04/2008, a las 13:08 h, donde se observan disturbios eléctricos importantes en la fase A del Transformador 1, los cuales repercuten en el equipo bajo prueba, en este caso el Transformador 2, el evento de mayor importancia debido a su duración y magnitud.	35
Figura 2. 10.	Medición registrada el día 31/03/2008, a las 18:59 h, donde se observa el brusco cambio en la corriente y una depresión importante de tensión entre fases B y C del Interruptor Termomagnético, el evento de mayor importancia por su duración	39
Figura 3.1.	Método propuesto	40
Figura 3.2.	Fotografías descriptivas de las mediciones	41
Figura 3.3	Power Pad™ Modelo 3945 Características del Producto.	42
Figura 3.4	Ventana de configuración del Power Pad	42

Figura 3.5.	Red a bloques del sistema de cargas pasivas bajo prueba.	42
Figura 3.6.	Red a bloques del sistema de cargas activas bajo prueba.	44
Figura 3.7.	Ventana de Grabaciones	43
Figura 3.8.	Ejemplo de un registro guardado en la Base de Datos	45
Figura 3.9.	Ventana de la pestaña “Fotografías”	45
Figura 3.10.	Ventana de transferencia de datos.	46
Figura 3.11.	Ejemplo del formato obtenido	46
Figura 3.12.	Forma de onda de tensión y corriente de la línea	48
Figura 3.13.	Espectro armónico en tensión y corriente en la línea.	48
Figura 3.14.	Forma de onda de tensión y corriente de la línea	49
Figura 3.15.	Espectro armónico en tensión y corriente en la línea.	49
Figura 3.16.	Forma de onda de tensión y corriente de la línea.	50
Figura 3.17.	Espectro armónico en tensión y corriente en la línea.	50
Figura 3.18.	Forma de onda de tensión y corriente de la línea.	51
Figura 3.19.	Espectro armónico en tensión y corriente en la línea.	51
Figura 3.20.	Forma de onda de tensión y corriente de la línea.	52
Figura 3.21.	Espectro armónico en tensión y corriente en la línea.	52
Figura 3.22.	Forma de onda de tensión y corriente de la línea.	53
Figura 3.23.	Espectro armónico en tensión y corriente en la línea.	53
Figura 3.24.	Comportamiento de la tensión y la corriente de la línea 1.	54
Figura 3.25.	Comportamiento de la tensión y la corriente de la línea 2	54
Figura 3.26.	Comportamiento de la tensión y la corriente de la línea 3.	55
Figura 3.27.	Comportamiento de la tensión y la corriente del neutro.	55

Figura 3.28.	Comportamiento de la distorsión armónica de la línea 1.	56
Figura 3.29.	Comportamiento de la distorsión armónica de la línea 2.	56
Figura 3.30.	Comportamiento de la distorsión armónica de la línea 3.	57
Figura 3.31.	Comportamiento del factor de cresta de la línea 1.	57
Figura 3.32.	Comportamiento del factor de cresta de la línea 2.	58
Figura 3.33.	Comportamiento del factor de cresta de la línea 3	58
Figura 3.34.	Comportamiento de la potencia real.	59
Figura 3.35	Comportamiento de la potencia reactiva.	59
Figura 3.36.	Comportamiento de la potencia aparente.	60
Figura 3.37.	Comportamiento del factor de potencia.	60
Figura 3.38.	Forma de tensión y corriente de la línea 1.	61
Figura 3.39.	Forma de tensión y corriente de la línea 2.	61
Figura 3.40.	Forma de tensión y corriente de la línea 3.	62
Figura 3.41.	Forma de onda de la corriente del neutro.	62
Figura 3.42.	Espectro armónico en tensión y corriente en la línea 1.	63
Figura 3.43.	Espectro armónico en tensión y corriente en la línea 2.	63
Figura 3.44.	Espectro armónico en tensión y corriente en la línea 3.	64
Figura 3.45.	Espectro armónico en la corriente del neutro.	64
Figura 3.46.	Medición de corrientes y tensiones.	65
Figura 3.47.	Mediciones de potencias y factor de potencia.	65
Figura 3.48.	Comportamiento de tensión y corriente de la línea 1.	66
Figura 3.49.	Comportamiento de tensión y corriente de la línea 2.	66
Figura 3.50.	Comportamiento de tensión y corriente de la línea 3.	67

Figura 3.51.	Comportamiento de la corriente del neutro.	67
Figura 3.52.	Comportamiento de la distorsión armónica en la línea 1.	68
Figura 3.53.	Comportamiento de la distorsión armónica en la línea 2.	68
Figura 3.54.	Comportamiento de la distorsión armónica en la línea 3.	69
Figura 3.55.	Comportamiento del factor de cresta en la línea 1.	69
Figura 3.56.	Comportamiento del factor de cresta en la línea 2.	70
Figura 3.57.	Comportamiento del factor de cresta en la línea 3.	70
Figura 3.58.	Comportamiento de la potencia real.	71
Figura 3.59.	Comportamiento de la potencia reactiva.	71
Figura 3.60.	Comportamiento de la potencia aparente.	72
Figura 3.61.	Comportamiento del factor de potencia.	72
Figura 3.62.	Forma de onda de tensión y corriente en la línea 1.	73
Figura 3.63.	Forma de onda de tensión y corriente en la línea 2.	73
Figura 3.64.	Forma de onda de tensión y corriente en la línea 3.	74
Figura 3.65.	Forma de onda de corriente en el neutro.	74
Figura 3.66.	Espectro armónico en tensión y corriente de la línea 1.	75
Figura 3.67.	Espectro armónico en tensión y corriente de la línea 2.	75
Figura 3.68.	Espectro armónico en tensión y corriente de la línea 3.	76
Figura 3.69.	Espectro armónico en la corriente del neutro.	76
Figura 3.70.	Medición de corriente y tensiones	77
Figura 3.71.	Medición de potencias y factor de potencia.	77
Figura 4.1.	Comportamiento de la potencia real	81
Figura 4.2.	Comportamiento de la potencia aparente	82

Figura 4.3.	Comportamiento de la potencia reactiva	82
Figura 4.4.	Comportamiento del factor de potencia	82
Figura 4.5.	Comportamiento de la potencia real	83
Figura 4.6.	Comportamiento de la potencia aparente	84
Figura 4.7.	Comportamiento de la potencia reactiva	84
Figura 4.8.	Comportamiento del factor de potencia	84
Figura 4.9.	Filtro activo	86
Figura 4.10.	Filtro serie	86
Figura 4.11.	Filtro paralelo	87
Figura 4.12.	Filtro pasivo industrial (sistema de 13.8 kv)	87
Figura 5.1.	Factura de consumo de energía eléctrica con bonificación por alto factor de potencia	91
Figura 5.2.	Factura de consumo de energía eléctrica con penalización por bajo factor de potencia	92

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.	EEE 519	14
Tabla 1.2.	FE L0000-45	14
Tabla 1.3.	EEE 519 Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida	15
Tabla 1.4.	CFE L0000-45 Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida	16
Tabla 1.5.	Niveles de comportamiento para las tensiones armónicas individuales en una red publica VT	18
Tabla 5.1.	Costos de mantenimiento	93
Tabla 5.2.	Costos de beneficios	94

### Magnitudes y unidades derivadas más usadas en ingeniería eléctrica.

Magnitud	Símbolo de la magnitud	Unidad	Símbolo de la unidad y equivalencias
Admitancia	Y	simens	<b>S</b>
Capacitancia	C	farad	<b>F(C/V)</b>
Carga eléctrica	Q	coulomb	<b>C(A.s)</b>
Conductancia eléctrica	G	simens	<b>S(A/V)</b>
Densidad de flujo magnitud	B	tesla	<b>T(Wb/m<sup>2</sup>)</b>
Diferencia de potencial o tensión	V,U	volt	<b>V(J/C)</b>
Energía	W	joule	<b>J(N.m)</b>
Flujo luminoso	Lm	lumen	<b>lm(cd.sr)</b>
Flujo magnitud	$\Phi$	weber	<b>Wb(V.s)</b>
Frecuencia	f	hertz	<b>Hz(s-1)</b>
Fuerza	F	newton	<b>N(m.kg.s<sup>-2</sup>)</b>
Fuerza electromotriz	V,U	volt	<b>V(J/C)</b>
Fuerza magnetomotriz	F <sub>m</sub>	ampere vuelta	<b>A.v</b>
Impedancia	Z	ohm	<b><math>\Omega</math>(V/A)</b>
Inductancia mutua	M	henry	<b>H(Wb/A)</b>
Inductancia o auto inductancia	L	henry	<b>H(Wb/A)</b>
Intensidad de campo magnético	H	ampere.vuelta/metro	<b>A.v/m</b>
Luminosidad o iluminancia	lx	lux	<b>lx(lm/m<sup>2</sup>)</b>
Permeabilidad	$\mu$	henry por metro	<b>H/m</b>
Permeabilidad del vacío	$\mu_0$	henry por metro	<b>H/m</b>
Permeabilidad relativa	$\mu_r$		
Permitividad	$\epsilon$	farad/metro	<b>F/m(C/V.m)</b>
Permitividad del vacío	$\epsilon_0$	farad/metro	<b>F/m(C/V.m)</b>
Permitividad relativa	$\epsilon_r$	adimensional	
Potencia activa	P	watt	<b>W(J/s)</b>
Potencia aparente	S	volt-ampere	<b>VA</b>
Potencia reactiva	Q	volt-ampere reactivo	<b>VAR</b>
Ángulo de defasamiento	$\theta$	grados geométricos	<b>°</b>
Factor de Potencia	FP	adimensional	
Reluctancia	R <sub>m</sub>	henry <sup>-1</sup>	<b>H<sup>-1</sup></b>
Resistencia eléctrica	R	ohm	<b><math>\Omega</math>(V/A)</b>
Resistividad	$\rho$	ohm metro	<b><math>\Omega.m</math></b>
Susceptancia	$\beta$	simens	<b>S</b>



**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE  
CALIDAD DE LA ENERGÍA EN  
SISTEMAS ELÉCTRICOS CON  
CARGAS ACTIVAS Y PASIVAS**



## Objetivo

Determinar la respuesta eléctrica en cargas pasivas y activas monofásicas y trifásicas, con mediciones en tiempo real, para prever la operación de sistemas en términos de calidad de la energía.

## Introducción

En la actualidad los usuarios de energía eléctrica, centros de desarrollo industrial, comercial, pequeña y mediana industria, se enfrentan a problemas de energía tales como: discontinuidad en el servicio, variaciones de tensión, variaciones del factor de potencia, parpadeos, Interrupciones cortas y prolongadas de tensión, disminución de vida útil de equipos electrónicos, errores en almacenamiento y lectura de información en los sistemas de cómputo y variaciones en la recepción de imágenes de TV, entre otros.

En este contexto y con el propósito de atender esta problemática este proyecto se enfoca a la realización de un estudio, sustentado en experimentos con mediciones en tiempo real, de las diferentes variables eléctricas tales como: tensión, corriente, factor de potencia, potencia activa, reactiva y aparente, relacionadas con esta problemática y que correspondan a efectos producidos por diferentes cargas eléctricas pasivas y no lineales (electrónicas).

El alcance de este estudio esta proyectado para sistemas eléctricos monofásicos y trifásicos en bajas tensión (tensiones de operación menores o iguales a 440 V) y potencia activas de hasta 5 kW; sin embargo, los resultados se proyectan para la determinación del comportamiento en la operación de sistemas eléctricos de mayor magnitud.

La primera parte de esta tesis consiste en establecer una fundamentación teórica de los diferentes parámetros relacionados con la calidad de la energía, aspecto que nos permitió y sustentar el desarrollo experimental.

En el capítulo II se hace una descripción de algunos estudios de casos que sirvieron de referencia para establecer analogías y análisis de los resultados para establecer analogías y análisis de los resultados experimentales de este trabajo.

El capítulo III describe la parte experimental; misma que inicia con un planteamiento metodológico del desarrollo de experimentos. Se precisa que se analizaron las respuestas eléctricas tanto de cargas pasivas como activas y se hace una descripción de los registros espectros de las diferentes variables eléctricas: tensión, corriente, distorsión armónica, factor de cresta, potencia y defasamiento angular que producen las cargas.

En el capítulo IV se presenta el análisis de resultados los cuales permiten establecer inferencias eléctricas con criterios de calidad.

Finalmente en el capítulo V se presenta un estudio de costo beneficio ejemplificando que nos permite comprobar que la calidad de la energía no cuesta por el contrario trae beneficios.



**CAPITULO I**

**FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

En todo estudio de calidad de la energía se requiere conocer la parte conceptual de diferentes parámetros inherentes. En este capítulo se hace una descripción de los conceptos principales o incluidos en esta tesis, que son: tipos de cargas eléctricas, los elementos para la calidad de la energía tales como: continuidad en el servicio, variaciones de frecuencia, sobre-tensiones, variaciones de tensión, fuentes de disturbio, ruido eléctrico, transitorios, desplazamiento angular y en general de todo lo relativo a la distorsión armónica.

## 1.1. Sistemas de distribución de energía eléctrica

Un sistema de distribución de energía eléctrica consiste en una red eléctrica compuesta por elementos de control, conductores y una serie de equipos que permiten la distribución de energía a un número determinado de cargas que pueden operar con distintos niveles de tensión, normales 120, 220 o 440V.

Dependiendo de las características de las cargas, los volúmenes de energía involucrados, y las condiciones de confiabilidad y seguridad con que deban operar, los sistemas de distribución se clasifican en:

- Residenciales
- Rurales
- Comerciales.
- Industriales
- Urbanos

## 1.2. Tipos de cargas eléctricas

Los tipos de cargas eléctricas se clasifican en cargas lineales y no lineales, las características de operación son:

### 1.2.1. Cargas lineales

Las cargas lineales, también llamadas pasivas, almacenan o disipan energía eléctrica, y son de tres tipos:

Resistivas.- establecen una relación lineal entre corriente y tensión haciendo uso de la ley de ohm, este elemento relaciona la tensión y la corriente de la siguiente manera:

$$R = \frac{V}{I} \dots\dots\dots (1)$$

Capacitivas.-tienen la propiedad de almacenar energía en forma de campo eléctrico y la corriente alterna que puede circular a través de ella se relaciona con la ecuación

$$i = C \frac{dv}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

Inductivas.-tienen la propiedad de almacenar energía en forma de campo magnético, ecuación (3)

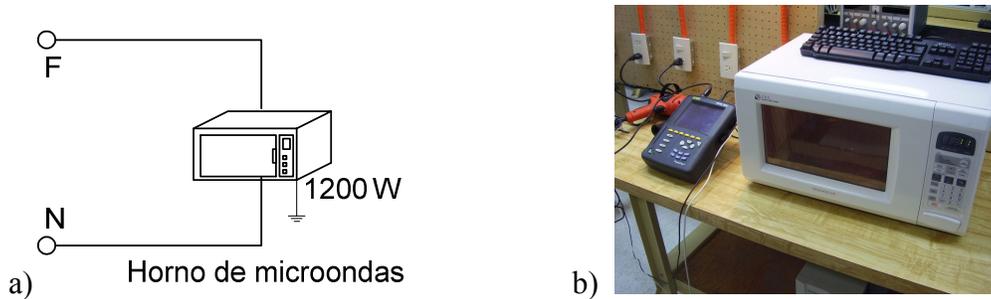
$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \dots\dots\dots (3)$$



**Figura 1. 1.** Cargas pasivas

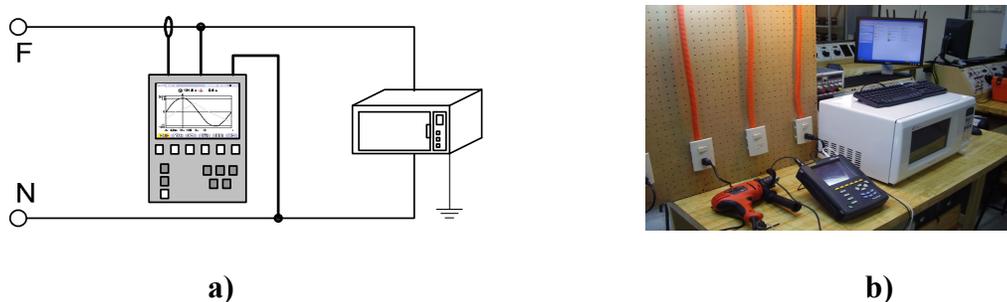
**1.2.2. Cargas no lineales**

Las cargas no lineales son todas aquellas que generan corrientes no senoidales, es decir, corrientes que además de la componente fundamental tienen otras que son múltiplos enteros de la fundamental y que se conocen como armónicos. Un ejemplo clásico de cargas no lineales es el horno de microondas de la figura 1.2.



**Figura 1. 2** Conexión del horno de microondas, a) Esquema eléctrico b) Diagrama físico.

La conexión física de esta carga se muestra en la figura 1.3; donde además se muestra una fotografía donde se están realizando pruebas de calidad.



**Figura 1. 3.** Medición del horno de microondas; a) diagrama eléctrico, b) diagrama físico.

### 1.3. Elementos para la calidad de la energía eléctrica

El propósito de todo sistema eléctrico es que tenga continuidad en el servicio y que opere de manera eficaz y eficiente para evitar daños en los equipos y en el propio sistema.

Algunos de los disturbios más comunes que afectan la calidad de la energía:

- Continuidad en el servicio
- Variación de frecuencia
- Sobre tensión
- Variaciones de tensión
- Fuentes de disturbio
- Ruido eléctrico
- Transitorios
- Desfasamientos
- Muecas (notch)
- Distorsión armónica
- Mitigación de armónica
- Coerción de factor de potencia en sistemas con THD

#### 1.3.1. Continuidad en el servicio

Las interrupciones instantáneas de energía provocadas por una condición de falla del aislamiento después de una operación exitosa del equipo de restablecimiento tiene una duración de hasta varios ciclos. Figura 1.4.

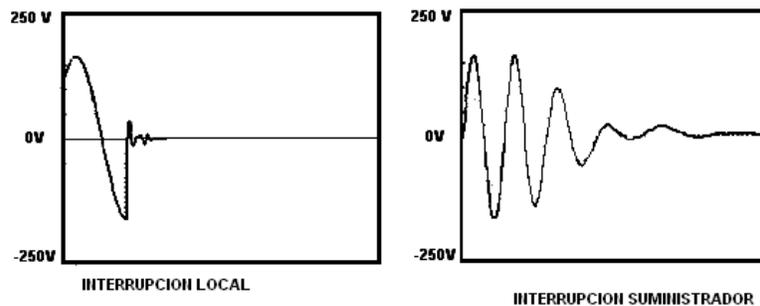
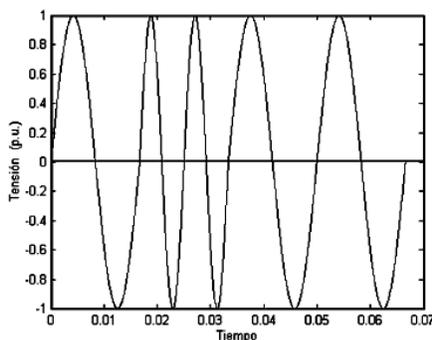


Figura 1. 4. Interrupción de energía <sup>[2]</sup>

### 1.3.2. Variación de Frecuencia

Son cambios en la frecuencia de la señal senoidal proporcionada por la red. Normalmente resulta muy raro que se presente este problema en la red eléctrica en condiciones normales y llega a ocurrir debido a la interconexión de los centros de generación de energía eléctrica. Generalmente sólo se producen en centros con generación aislada de tensión como lo son las redes eléctricas rurales.



**Figura 1. 5.** *Forma de onda de tensión con variación de frecuencia.*<sup>[1]</sup>

### 1.3.3. Sobre tensiones

Las sobre tensiones producen descargas que, además de destruir o averiar seriamente el material, en ocasiones es la causa de nuevas sobre tensiones. Muchas veces, los peligros de las sobre tensiones no se deben solamente a su magnitud, sino también a la forma de onda.

- Transitorios
- Variaciones de tensión de corta duración
- Variaciones de tensión de larga duración.

### 1.3.4. Variaciones de tensión

Existen eventos de elevación o disminución de tensión en regiones cercanas a zonas industriales que ocasionan cambios repentinos de carga en la línea de energía derivados del encendido de motores o maquinaria.

#### Variaciones lentas y rápidas de tensión

Se considera una variación lenta de tensión, aquella que se presenta con una duración de 10 segundos o más. Se produce debido a la variación de las cargas en redes eléctricas con impedancia alta de cortocircuito. Si sobrepasan los límites estáticos permitidos por los equipos, producen fallos en su operación. Figura (a).

Por otra parte, una variación rápida de tensión tiene una duración menor a los 10 segundos. Se producen debido a la conexión y desconexión de cargas grandes y maniobras en las líneas de la red eléctrica. El daño que causa en los equipos depende de su amplitud y su duración, dado que un equipo soporta una mayor amplitud en un menor tiempo y viceversa. Figura (b).

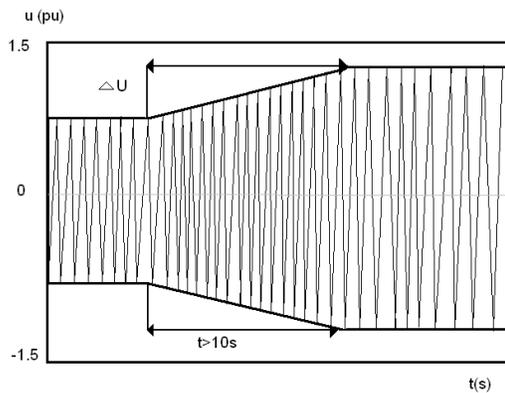


Figura (a)

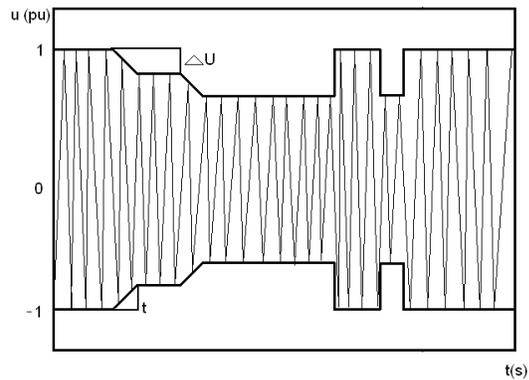
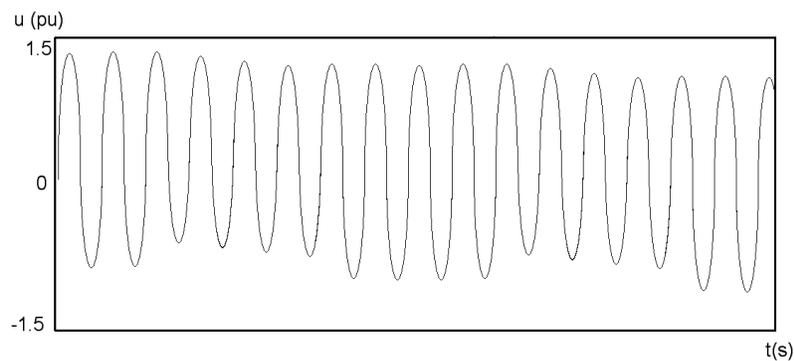


Figura (b)

**Figura 1. 6.** Variaciones de tensión. (a) Variación lenta de tensión, (b) Variación rápida de tensión. <sup>[1]</sup>

### Parpadeo (Flicker)

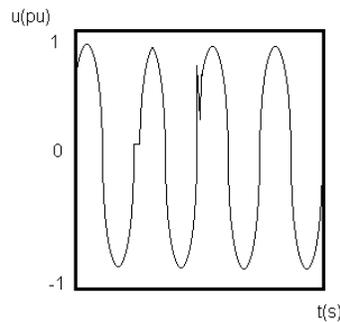
Es una variación rápida de tensión de forma repetitiva, similar a la modulación de amplitud de una onda de alta frecuencia por una onda de baja frecuencia, la cual se observa en la figura 1.7. Produce en las lámparas un parpadeo visible y molesto (de aquí el nombre); se debe principalmente al funcionamiento de hornos de arco y equipos de soldadura. En general no produce daños en los equipos a menos que la variación sea muy pronunciada.



**Figura 1. 7.** Variación rápida de tensión <sup>[1]</sup>

## Microcortes

Son anulaciones en la tensión de la red eléctrica (o reducciones por debajo del 60% de su valor nominal) con una duración menor a un ciclo. Se deben principalmente a defectos en la red eléctrica o en la propia instalación del usuario. Producen mal funcionamiento en cargas muy sensibles y errores en las computadoras.

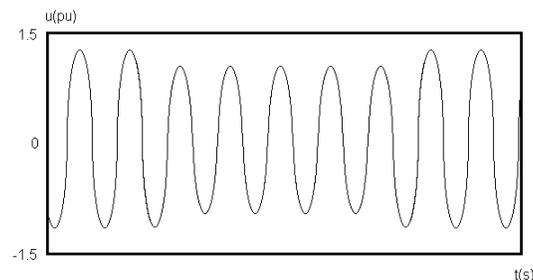


**Figura 1. 8.** *Microcortes de tensión.*<sup>[1]</sup>

## Cortes largos

Son anulaciones de la tensión de red (o reducciones por debajo del 50% de su valor nominal) de duración mayor a un ciclo. Se producen generalmente por fallas o desconexión de las líneas de alimentación y por averías en los centros de generación y de transformación.

La figura 1.9., muestra un corte largo de tensión, que si bien, ésta no cae a cero, sí es menor al 50% del valor nominal. También afectan a máquinas eléctricas con núcleo magnético saturado, convertidores estáticos (rectificadores controlados y no controlados, sistemas de alimentación ininterrumpida, fuentes conmutadas) y otras cargas no lineales. Casi todas las cargas críticas como lo son los equipos electrónicos soportan una distorsión máxima del 5%.



**Figura 1. 9.** *Corte largo de tensión*<sup>[1]</sup>

## Fluctuaciones

Significa una disminución momentánea en la magnitud de tensión RMS, con una duración que va desde 10 ms (0,6 ciclos) hasta 2,5 s. (150 ciclos), causado por una falla remota en algún lugar del sistema de potencia. También existen las elevaciones de tensión (“swells”), que no son tan comunes. Las condiciones de alto o bajo tensión se representan en circuitos durante la desconexión de cargas de gran tamaño.

## Depresiones de tensión

Una reducción en el valor eficaz (RMS) de la tensión de corriente alterna a la frecuencia del sistema, con duración entre medio ciclo a algunos segundos.

En el sistema eléctrico, es frecuente la presencia de distribución y de problemas inesperados causados por fenómenos naturales, accidentes o por la operación misma de la red. La mayoría de los usuarios de energía eléctrica experimentan pocos problemas con la calidad de la energía, ya que sus cargas son insensibles a variaciones rápidas en la tensión de alimentación (conocidas como abatimientos o depresiones de tensión).

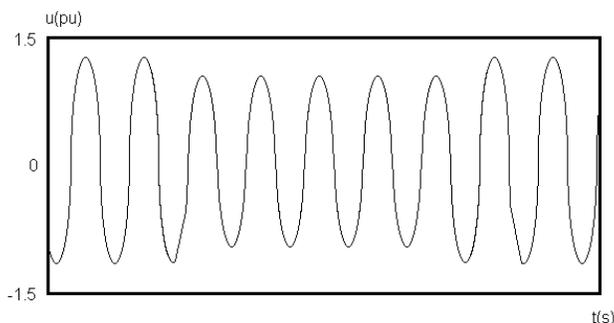


Figura 1. 10. Depresiones en la onda de tensión.<sup>[2]</sup>

### 1.3.5. Fuentes de disturbio

Las fuentes de disturbio son las siguientes:

- i. Fuentes de disturbios en el sistema
  - interrupción del suministro eléctrico
  - efectos de las protecciones
  - variaciones en la frecuencia
- ii. Variaciones de tensión
  - fluctuaciones de tensión
  - regulación de tensión
  - sobretensiones
    - sobretensiones externas
    - sobretensiones internas
    - efectos de las descargas atmosféricas en sistema aéreos
- iii. Descargas electrostáticas

- iv. Ruido
  - ruido eléctrico (campos electrostáticas)
  - ruido magnético (campos magnéticos)
- v. Armónicas
- iv. Puesta a tierra
- iiiv. Factor de potencia

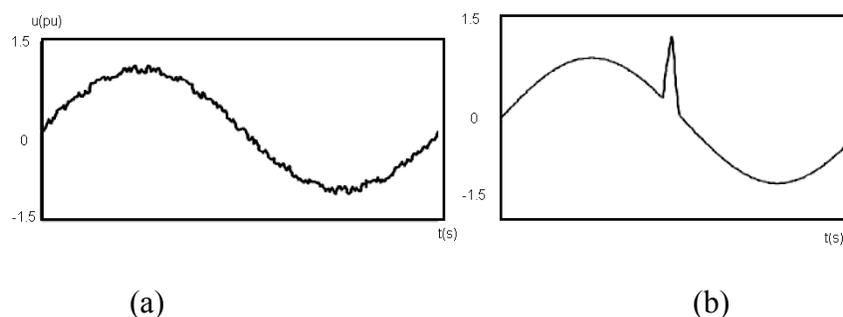
### 1.3.6. Ruido eléctrico

Son perturbaciones de tensión que tienen lugar entre los conductores activos de alimentación (fase y neutro en sistemas monofásicos; entre fases o fase y neutro en sistemas trifásicos). Si son frecuentes y de escaso valor (tensiones mayores o menores), se llaman ruidos.

Si son esporádicos y de valor elevado (mayor tensión), se denominan impulsos, es decir, cuando su duración es inferior a 2 ms. Los ruidos eléctricos se producen debido al funcionamiento de máquinas eléctricas con escobillas, soldadoras de arco, timbres, interruptores, etc., los cuales se encuentran conectados en algún punto cercano a la carga utilizada. No producen daño en los equipos, pero si causan un mal funcionamiento.

Por otro lado, los impulsos eléctricos suelen producirse por conexión y desconexión de bancos de condensadores, funcionamiento de hornos de arco, máquinas con escobillas, interruptores, termostatos y por descargas eléctricas.

De todas las perturbaciones, son las más aleatorias y menos predecibles. Este tipo de perturbaciones producen daños muy serios en los equipos. Una forma de onda de tensión con ruido eléctrico se muestra en la Figura (a), mientras que en la Figura (b), se muestra una forma de onda de tensión con la presencia de un impulso eléctrico.



**Figura 1. 11.** (a) Ruido eléctrico presente en la señal senoidal proporcionada por la red eléctrica, (b) Impulso eléctrico.<sup>[1]</sup>

### 1.3.7. Transitorios

Los transitorios son eventos indeseables y de naturaleza momentánea, estos transitorios tienen 2 categorías los impulsos transitorios y los oscilatorios.

## Los impulsos transitorios

Un transitorio de impulso es un cambio repentino, no previsto de la frecuencia, de la condición de estado estacionario de tensión o corriente, o ambas, y que es unidireccional en polaridad (negativo o positivo). Los transitorios de impulso se caracterizan normalmente por sus tiempos de subida o de frente y de bajada.

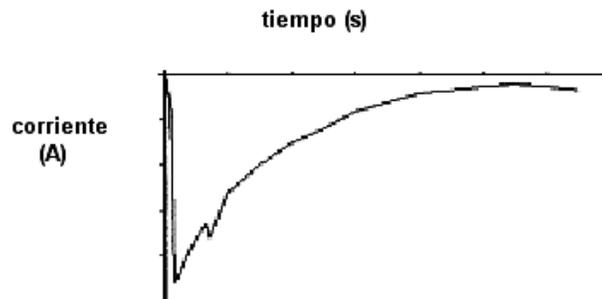


Figura 1. 12. Impulso transitorio.<sup>[2]</sup>

## Oscilaciones transitorias.

Un transitorio oscilatorio es un cambio repentino, de frecuencia de las condiciones de estado estacionario de tensión o corriente, o ambos que incluye tanto valores positivos como negativos.

Consiste de una tensión o corriente cuyos valores instantáneos cambian rápidamente en polaridad, esta descrito por su contenido espectral duración y magnitud. El contenido espectral se divide en frecuencias altas, medias y bajas.

### 1.3.8. Defasamiento

En la figura número 1.13 se observan dos ondas senoidales desplazadas  $\theta$  grados, la señal que cruza primero el eje horizontal (eje de tiempo) es la señal que está adelantada.

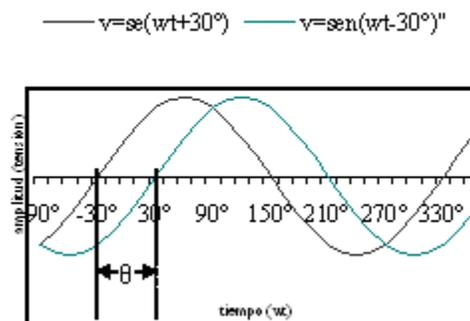
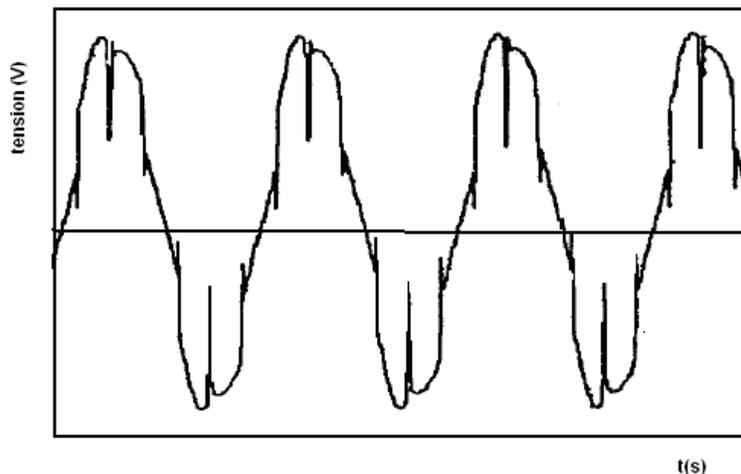


Figura 1. 13. Dos ondas senoidales con  $\theta$  grados de defasamiento entre ellas.

### 1.3.9. Muecas (notch)

Se refiere a una conmutación u otro disturbio en la forma de onda de tensión del sistema con duración menor a medio ciclo la cual es inicialmente opuesta en polaridad a la forma de onda normal, siendo por lo tanto substractiva en términos de la amplitud. Incluye la pérdida completa de tensión por medio ciclo.

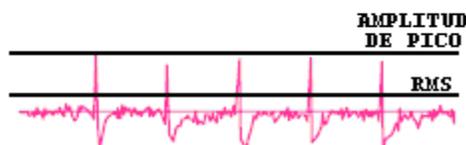


**Figura 1. 14.** Muecas en la onda de tensión.<sup>[2]</sup>

### 1.3.10. Factor de cresta

El Factor Cresta es igual a la amplitud del pico de la forma de onda dividida por el valor RMS. El propósito del cálculo del factor cresta es dar al analista una rápida idea de que tanto impacto está ocurriendo en la forma de onda. Figura 1.15.

$$\text{Factor de Cresta} = \frac{\text{amplitud de pico}}{\text{RMS}}$$



**Figura 1. 15.** Definición del factor de cresta<sup>[19]</sup>

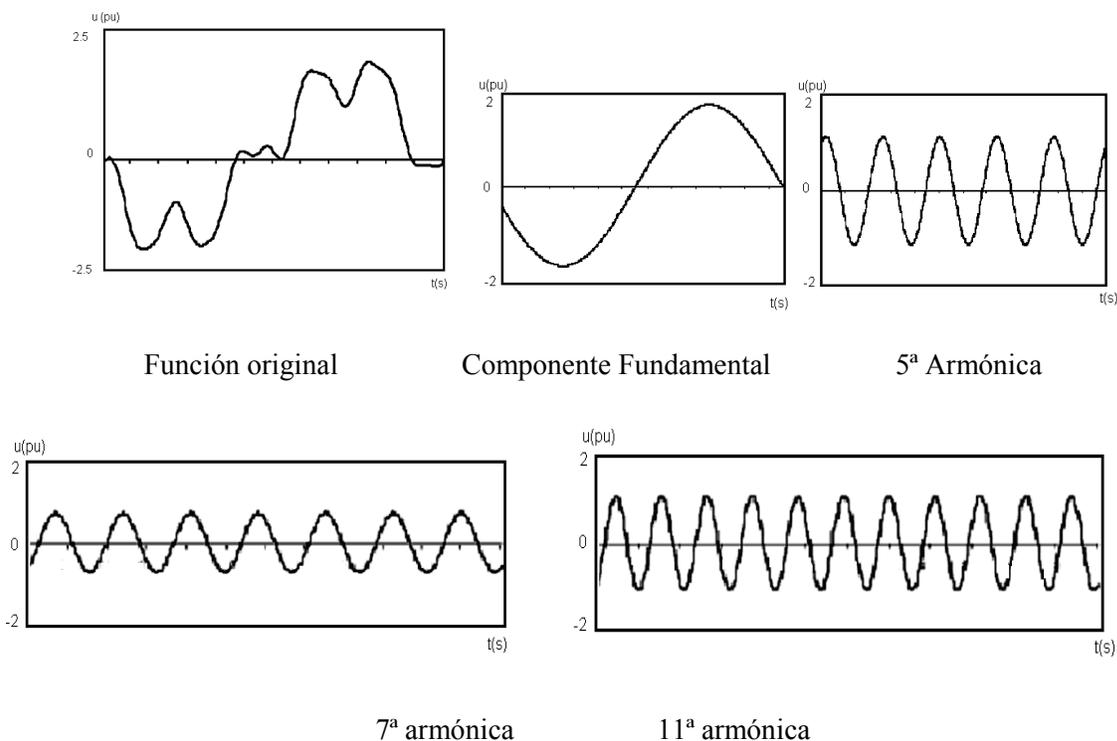
En una perfecta onda sinusoidal, con una amplitud de “1”, el valor RMS es igual a .707, y el factor cresta es entonces igual a 1.41. Una perfecta onda sinusoidal no contiene impactos y por lo tanto el factor cresta con un valor superior a 1.41 implica que hay algún grado de impacto.

### 1.3.11. Distorsión armónica

Un parámetro fundamental en el estudio de calidad de la energía para el proceso de análisis y propuesta de soluciones es sin duda la distorsión armónica.

#### Definición de armónicas

Primera armónica, denominada también señal fundamental, del mismo período y frecuencia que la función original y el resto serán funciones senoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental, que se suman a la función original. Estas componentes son denominadas armónicas de la función periódica original.

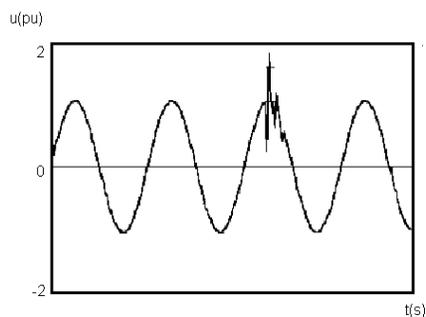


**Figura 1.16.** Forma de onda original y sus componentes armónicos 1ª, 5ª, 7ª, 11ª.<sup>[3]</sup>

Cuando la tensión o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal, se dice que la señal está distorsionada.

La distorsión se debe a:

- Fenómenos transitorios tales como arranque de motores, conmutación de capacitores, efectos de tormentas o fallas por cortocircuito entre otras.



**Figura 1. 17** Efecto en la tensión por la conmutación de capacitores. [3]

- Condiciones permanentes que están relacionadas con armónicas de estado estable. En los sistemas eléctricos es común encontrar que las señales tendrán una cierta distorsión que cuando es baja, no ocasiona problemas en la operación de equipos y dispositivos. Existen normas que establecen los límites permisibles de distorsión, dependiendo de la tensión de operación y de su influencia en el sistema.

### Características de la distorsión armónica

Cuando la onda de corriente o de tensión medida en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada, con relación a la onda sinusoidal que idealmente deberíamos encontrar, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicas.

Para que se considere como distorsión armónica las deformaciones en una señal, se deben de cumplir las siguientes condiciones:

- Que la señal tenga valores definidos dentro del intervalo, lo que implica que la energía contenida es finita
- Que la señal sea periódica, teniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de corriente o tensión.
- Permanente.- Cuando la distorsión armónica se presenta en cualquier instante de tiempo, es decir, que no es pasajera.

### Condiciones permanentes que están relacionadas con armónicas de estado estable.

En los sistemas eléctricos es común encontrar que las señales tendrán una cierta distorsión que cuando es baja, no ocasiona problemas en la operación de equipos y dispositivos. Existen normas que establecen los límites permisibles de distorsión, dependiendo de la tensión de operación y de su influencia en el sistema.

## Estándares de calidad

### Límites de distorsión en tensión

El suministrador es responsable de mantener la calidad del tensión en el sistema global, especificándose los límites para diferentes niveles de tensión.

Es importante notar que la definición de la *distorsión armónica total (THD)* que se utiliza es diferente a la convencional ya que se expresa la distorsión en función al tensión nominal, que es un valor constante para cada usuario, estableciéndose así, una base fija de evaluación a lo largo del tiempo.

Tabla 1.1. *IEEE 519*<sup>[4]</sup>

Límites de Distorsión Armónica en la Tensión En % de la tensión nominal		
Nivel de tensión en la Acometida ( $V_n$ )	Distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THD $V_n$
$V_n \leq 69$ kV	3,0%	5,0%
$69$ kV < $V_n \leq 161$ kV	1,5%	2,5%
$V_n > 161$ kV	1,0%	1,5%

$$THD_{V_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\%$$

Donde:

$V_h$  : Magnitud de la componente armónica individual

$h$  : orden armónico

$V_n$ : Tensión nominal fundamental del sistema

Tabla 1. 2. *CFE L0000-45* <sup>[5]</sup>

Límites de Distorsión Armónica en Tensión en % del tensión nominal		
Nivel de tensión en la Acometida ( $V_n$ )	Distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THD $V_n$
$V_n < 1$ kV	5,0%	8,0%
$1 < V_n < 69$ kV	3,0%	5,0%
$69$ kV < $V_n < 138$ kV	1,5%	2,5%
$V_n > 138$ kV	1,0%	1,5%

$$THD_{V_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\%$$

Donde:

$V_h$  : Magnitud de la componente armónica individual

$h$  : orden armónico

$V_n$ : Tensión nominal fundamental del sistema

### Límites de distorsión en Corriente

Las corrientes armónicas para cada usuario son evaluadas en la acometida y los límites se establecen en base a la relación entre la corriente de cortocircuito y la demanda máxima de corriente de la carga del usuario.

Tabla 1.3. IEEE 519 Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida <sup>[4]</sup>

I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub>	TDD	h<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	h>35
<b>V<sub>n</sub> &lt; 69 kV</b>						
<20	5,0%	4,0%	2,0%	1,5%	0,6%	0,3%
20-50	8,0%	7,0%	3,5%	2,5%	1,0%	0,5%
50-100	12,0%	10,0%	4,5%	4,0%	1,5%	0,7%
100-1000	15,0%	12,0%	5,5%	5,0%	2,0%	1,0%
>1000	20,0%	15,0%	7,0%	6,0%	2,5%	1,4%
<b>69 kV &lt; V<sub>n</sub> &lt; 161 kV</b>						
<20	2,5%	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%
20-50	4,0%	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%
50-100	6,0%	5,0%	2,25%	2,0%	0,75%	0,35%
100-1000	7,5%	6,0%	2,75%	2,5%	1,0%	0,5%
>1000	10,0%	7,5%	3,5%	3,0%	1,25%	0,7%
<b>V<sub>n</sub> &gt; 161 kV</b>						
<50	2,5%	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%
>50	4,0%	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%

- Todos los equipos de generación de energía están limitados a estos valores de corriente, sin importar la relación  $\frac{I_{cc}}{I_L}$ .
- Para las armónicas pares, los límites son el 25% de los valores especificados en la tabla
- No se permite la existencia de componentes de corriente directa, que corresponden a la armónica cero.
- Si las cargas que producen las armónicas utilizan convertidores con número de pulsos  $q$  mayor a 6, los límites indicados en la tabla se incrementan por un factor  $\sqrt{\frac{q}{6}}$

La distorsión de demanda total TDD está definida como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\%$$

Donde:

I<sub>h</sub>: Magnitud de la armónica individual

I<sub>L</sub>: Demanda máxima de la corriente fundamental de la carga

h : orden armónico impar

- I<sub>cc</sub>: Debe utilizarse aquella que bajo condiciones normales de operación, resulte en la mínima corriente de cortocircuito en la acometida, ya que este valor reduce la relación I<sub>cc</sub>/I<sub>L</sub> y la evaluación es mas severa.
- I<sub>L</sub>: Es la demanda máxima de la corriente fundamental en la acometida y se calcula como el promedio de las demandas máximas de corriente mensuales de los últimos 12 meses o se estima para usuarios que inician su operación.

Que la relación I<sub>cc</sub>/I<sub>L</sub> es menor.

Los sistemas más robustos se transmiten mayores niveles de corrientes armónicas sin producir una distorsión excesiva de tensión que los sistemas más débiles.

Tabla 1. 4. CFE L0000-45 Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida <sup>[5]</sup>

I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub>	TDD	h<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	h>35
<b>V<sub>n</sub> &lt; 69 Kv</b>						
I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub> <20	5,0%	4,0%	2,0%	1,5%	0,6%	0,3%
20 <I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub> <50	6,0%	7,0%	3,5%	2,5%	1,0%	0,5%
50<I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub> <100	12,0%	10,0%	4,5%	4,0%	1,5%	0,7%
100<I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub> <1000	15,0%	12,0%	5,5%	5,0%	2,0%	1,0%
I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub> >1000	20,0%	15,0%	7,0%	6,0%	2,5%	1,4%
<b>69 kV &lt;V<sub>n</sub> &lt; 161 kV</b>						
I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub> <20	2,5%	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%
20<I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub> <50	4,0%	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%
50<I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub> <100	6,0%	5,0%	2,25%	2,0%	0,75%	0,35%
100<I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub> <1000	7,5%	6,0%	2,75%	2,5%	1,0%	0,5%
I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub> >1000	10,0%	7,5%	3,5%	3,0%	1,25%	0,7%
<b>V<sub>n</sub> &gt; 161 kV</b>						
I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub> <50	2,5%	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%
I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub> >50	3,75%	3,0%	1,5%	1,15%	0,45%	0,22%

- Para las armónicas pares, los límites son el 25% de los valores especificados en la tabla
- Los límites deben ser usados como el caso mas desfavorable de operación normal. Para arranque de hornos eléctricos de arco, que toman un tiempo máximo de un minuto, se permite exceder los límites en 50%
- No se permiten corrientes de carga con componentes de corriente directa

La distorsión de demanda total TDD está definida como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\%$$

Donde:

I<sub>h</sub>: Magnitud de la armónica individual

I<sub>L</sub>: Demanda máxima de la corriente fundamental de la carga

h : orden armónico impar

### Fuentes y efectos THD

Es la relación entre el contenido armónico de la señal y la primera armónica o fundamental. Su valor se ubica entre 0% e infinito.

Es el parámetro de medición de distorsión más conocido, por lo que es recomendable para medir la distorsión en parámetros individuales (I y V). Al igual que el CD es útil cuando se trabaja con equipos que deben responder sólo a la señal fundamental, como en el caso de algunos relevadores de protección. *THD*: (*Total Harmonic Distorsion*) Distorsión armónica total.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\%$$

### Normalizaciones

En México existe la especificación CFE L0000-45 denominada “Perturbaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente del suministro de energía eléctrica” concerniente a la distorsión armónica permisible.

En los Estados Unidos de América la norma IEEE 519 “Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia” define entre sus puntos los valores máximos de distorsión permisible.

Ambas normatividades están diseñadas para limitar las corrientes armónicas de cada usuario en lo individual de forma que los niveles armónicos en tensión en la totalidad del sistema de potencia sean aceptables, siendo su cumplimiento una responsabilidad compartida entre suministrador y usuarios.

- **Suministrador.** Es su responsabilidad que en la acometida, la distorsión armónica en tensión THD<sub>v</sub> se encuentre dentro de los límites establecidos, por lo que debe asegurarse que condiciones de resonancia en el sistema de generación, transmisión o distribución no ocasionen niveles inaceptables de distorsión en tensión, aun si los usuarios se encuentran dentro de los límites de generación armónica en corriente.
- **Usuarios.** Deben de asegurar que en la acometida, la generación de armónicas en corriente se ubique dentro de los límites establecidos, tanto para componentes armónicas individuales como para la Distorsión de Demanda Total TDD, especificándose dichos límites como porcentaje de la demanda promedio de corriente del usuario en lugar de la corriente fundamental instantánea, con el fin de proporcionar una base común de evaluación a lo largo del tiempo.

La norma IEC 61000-2-2, que define los niveles de compatibilidad de tensiones armónicas en las redes publicas BT. Como se muestra en la tabla.1.5.

*Tabla 1.5. Niveles de comportamiento para las tensiones armónicas individuales en una red publica VT<sup>191</sup>*

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Rango armónico	Tensión armónico	Rango armónico	Tensión armónico	Rango armónico	Tensión armonio
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	0,5
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			<12	0,2
>25	0,2+0,5x25/n				

#### 1.4. Mitigación de armónicas

Para que los sistemas eléctricos operen en términos de calidad, con eficiencia, eficacia y continuidad, se requiere realizar monitoreos periódicos para prever variaciones del espectro de las señales eléctricas, distorsión, interrupciones, aspectos de carácter transitorio y defasamiento entre señales.

## Eliminación de armónicas

Existen diferentes formas de mitigar los problemas de armónicos, algunas maneras se describen a continuación.

### Reducir la aportación de corrientes armónicas

Una forma para lograr la reducción de las corrientes armónicas es reducir la aportación de las fuentes que las generan, como por ejemplo cambiar la conexión de los transformadores de modo que se atrapen las armónicas de secuencia cero, cambiar los transformadores o liberarles carga o conectar un reactor limitador en la alimentación, entre otros. Con el uso de filtros como:

- Filtros activos
- Filtros pasivos
- Filtros resintonizados

## 1.5. Corrección de factor de potencia en sistemas con THD

En el consumo de la energía eléctrica, generalmente de tipo industrial, se tiene presencia de elevado efecto reactivo, debido a la utilización de equipos como sistemas de refrigeración, motores de inducción y otros. Este efecto origina altos defasamientos entre la corriente y la tensión lo que a la vez produce bajo Factor de Potencia(F.P.); mismo que origina que gran cantidad de energía sea regresada de la carga hacia la fuente, con algunas consecuencias que repercuten en el ámbito económico, aumento de inversión para disponer de conductores con mayor capacidad de conducción eléctrica y disminución de la vida útil de transformadores y de las propias plantas de generación, haciendo necesario cambios de equipos con más frecuencia.

A nivel industrial generalmente se tiene un predominio inductivo por la cantidad de motores que tienen operando en los procesos de producción. Esto hace que el defasamiento entre la corriente y la tensión tienda a elevarse y por lo tanto el F.P. disminuya a niveles por debajo de la norma.

$$\text{En general } 0 \leq FP \leq 1 \text{ Por norma } 0,9 \leq FP \leq 1$$

Para corregir dicho defasamiento se conectan capacitores al primario o secundario del transformador. Esto permite contrarrestar el efecto inductivo provocado por los motores

La energía reactiva presente en las cargas inductivas y capacitivas origina alta demanda de la potencia aparente recibida de la fuente. Esta demanda se mitiga compensando los efectos reactivos ya que, mientras una bobina adelanta la tensión  $90^\circ$  respecto a la corriente, un capacitor retrasa dicha tensión  $90^\circ$ ; es decir, tienen efectos contrarios.

Por lo general, en el desarrollo de procesos industriales se presenta, en gran medida, el efecto inductivo toda vez que dichos procesos por lo general requieren de varios motores, este efecto inductivo provoca un defasamiento alto entre la tensión y la corriente, dando lugar a un bajo factor de potencia y a una alta demanda de potencia aparente.

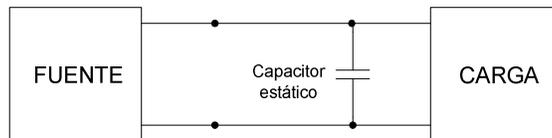
Para mitigar la alta demanda de potencia y compensar el factor de potencia se utilizan bancos de capacitores que compensan la energía reactiva, disminuyen el defasamiento y la demanda de S y elevan el factor de potencia que por norma debe de ser:  $0,9 \leq FP \leq 1$ .

El factor de potencia se calcula con la siguiente fórmula:

$$FP = \cos \theta = \frac{\text{Potencia activa (kW)}}{\text{Potencia aparente (kVA)}} = \frac{P (kW)}{S (kVA)}$$

Si  $0 \leq FP \leq 0,9$ , se debe corregir.

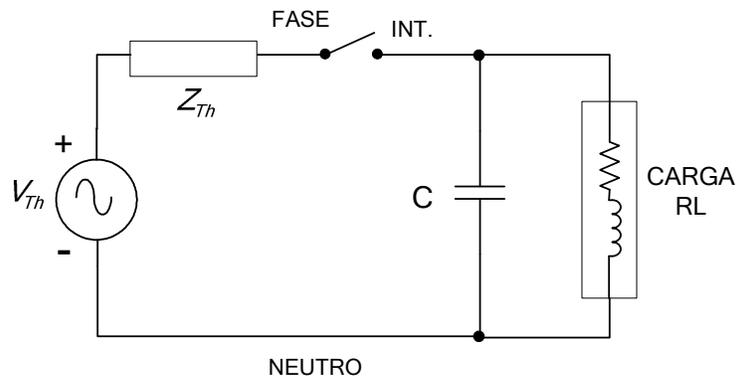
Una manera de corregir el FP es mediante el uso de capacitores estáticos, conectados como se muestra en la figura 1.18.



**Figura 1. 18** Conexión de un capacitor estático para corregir el FP.

Técnicamente a la potencia desarrollada por el capacitor se le denomina “potencia compensatoria”, esta potencia corresponde a la desarrollada por los valores de los capacitores que se requieren para corregir los valores bajos del FP, para disminuir el defasamiento y acercar dicho valor a la unidad.

En el circuito de la figura 1.19. se muestra la conexión de cargas capacitivas en paralelo con una carga RL, como podría ser la carga representativa de un motor monofásico de inducción.



**Figura 1. 19.** Circuito con Capacitor que actúa como compensador del FP.

En sistemas automatizados, de un banco de capacitores, se conectan automáticamente capacitores compensatorios de la potencia reactiva Q, para hacer que opere la carga con un FP superior a 0,9 y si es posible llevarlo al caso ideal 1. Para ello existen medidores de FP llamados cosemímetros que les permite a los ingenieros verificar la operación del sistema.



## 2 CAPÍTULO II

# MARCO CONTEXTUAL

Los problemas de armónicos en los sistemas eléctricos de distribución no son nuevos; sin embargo, en los últimos años, su estudio ha adquirido un interés especial, puesto que se ha incrementado tanto el número de componentes del sistema que son sensibles a su presencia, como la cantidad de cargas no lineales que los producen.

## 2.1. El Problema de los Armónicos

Los problemas ocasionados por cargas no lineales han aumentado el impacto negativo sobre redes de distribución, debido a ello, diversas compañías de electricidad e ingenieros de planta se enfrentan con la necesidad de disminuir los efectos de cargas no lineales sobre sus instalaciones

En la década pasada, algunas compañías de electricidad e ingenieros de planta descubrieron repentinamente un problema sorprendente: al adicionar o incluir en el sistema muchas computadoras y equipo electrónico, el factor de potencia para la compañía de electricidad bajó. En algunos casos, la reducción en el factor de potencia era suficiente como para producir cargos extras (penalizar el bajo factor de potencia). Aún peor, fallas en transformadores y conductores coincidieron con el bajo factor de potencia.

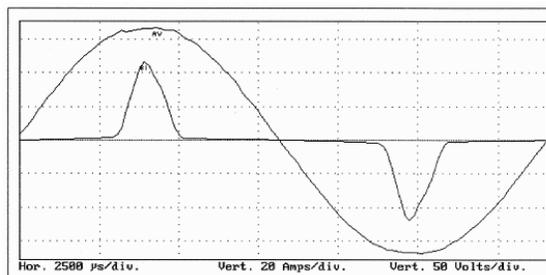
El uso de equipo electrónico moderno ha cambiado nuestras vidas (la mayoría argumentaría que para mejorar) pero ha cambiado también la característica de carga de las instalaciones modernas. Las cargas electrónicas han ganado el nombre de “Cargas no lineales”; para describir la forma de la potencia. Algunos de los efectos adversos de cargas no lineales concentradas sobre una red de distribución de energía eléctrica son:

- La distorsión de tensión dentro de instalaciones
- Las corrientes excedentes por el neutro
- Los altos niveles de tensión de neutro a tierra
- Los recalentamiento en transformadores
- Los grandes campos magnéticos que emanan desde transformadores
- La reducción en la capacidad de distribución
- Penalización por bajo factor de potencia

El término carga no lineal se usa para describir las fuentes de alimentación tipo “switch” que se encuentran en computadoras personales. De hecho, este tipo de fuente de alimentación es usual en muy variadas y diversas cargas. Los hornos de microondas, impresoras de láser, instrumentación médica, estéreos, televisores y la iluminación electrónica están entre los dispositivos que usan fuente de alimentación tipo “switch”. Los otros tipos de cargas no lineales incluyen dimmers para los controles de la iluminación, rectificadores de 6 pulsos, controladores de carga por fase y ángulo de seis pulsos y rectificadores de 12 pulsos. Los variadores de velocidad comúnmente usan rectificadores de 6 pulsos y controladores de fase y ángulo.

El problema con las cargas no lineales es la forma no sinusoidal de la corriente. La figura 2.1 muestra la forma de la corriente en una fuente monofásica tipo “switch”. La corriente está presente por cortos períodos de 2 a 3 ms por cada medio ciclo. En contraste, a una carga sinusoidal, donde la corriente se encuentra presente durante todo el medio ciclo (8,33ms) y es similar a la forma de onda de la tensión aplicada. La forma de onda de la corriente en las fuentes tipo “switch” causa diversos problemas:

- A) El primero, las pérdidas de tensión ocasionadas por la forma de la corriente se concentran en un punto dentro de la onda de C.A.
- B) El segundo, en sistemas de distribución trifásica, las corrientes para cargas equilibradas comparten el regreso entre fases, y la corriente de regreso podría ser cero o no necesariamente produciendo desbalances.



**Figura 2. 1.** Fuente de corriente monofásica tipo “Switch”<sup>[6]</sup>

Sin embargo, con las fuentes tipo “switch”, la forma de la corriente en cada fase es única en el tiempo con respecto a las otras fases. La corriente de retorno para cargas no lineales debe volver a través del neutro porque no hay posibilidad de que esta lo haga por las fases. Para un buen sistema trifásico balanceado con mínima impedancia en el sistema de distribución, la corriente por neutro llega a ser 1,73 veces más grande que las corrientes de fase. El cableado dimensionado para las corrientes de fase no es adecuado para transportar la corriente de retorno.

- C) Tercero, la corriente de pulso para una fuente tipo “switch” se repite a una frecuencia de 60 Hz, pero los componentes de frecuencia en la forma de onda se concentran en los armónicos de orden impar.

Los componentes de la frecuencia para una fuente de alimentación tipo “switch” incluyen el 3er armónico (180Hz), el 5to armónico (300Hz), el 7mo armónico (420Hz), el 9no armónico (450Hz) y este patrón continúa hasta niveles más altos. El número de armónico que se llega a registrar en una medición depende en mayor parte de las limitaciones técnicas del equipo de medición y de la impedancia de la fuente que contribuye a la presencia o ausencia de armónicos.

## 2.2 Efectos en el neutro.

El efecto de las corrientes armónicas es dañino. En cuanto a los conductores eléctricos, en el neutro aparecen corrientes superiores a las que aparecen en las otras fases; ésto debido a la suma de los terceros armónicos o “triplens” (armónicos de tercer orden y sus múltiplos, 3°, 9°, 15°, 21°, etc...). En cargas desequilibradas pueden llegar a ser el doble de la corriente de fase o un 130% de la corriente total medida en una fase. Por este efecto, llegan a aparecer caídas de tensión entre fase y neutro que son relativamente elevadas.

En un sistema de distribución, si los neutros de todas las cargas de la instalación acaban en un neutro común que llega al transformador, este tramo de cable debe soportar elevadas intensidades de corriente (la suma de los “triplens” de cada carga) y el transformador puede llegar a quemarse.

## 2.3 Estudios de casos referenciales.

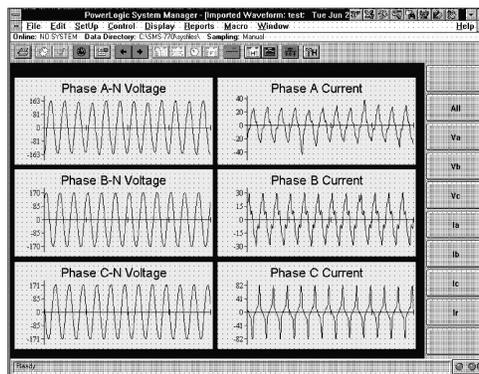
Los problemas de calidad de energía conllevan la necesidad de soluciones. Para ello, ingenieros e investigadores de todas partes del mundo han dedicado su tiempo e inventiva para inferir comportamientos de distintas cargas eléctricas, ya sea por medio de modelados matemáticos, experimentación directa en laboratorios, investigación de campo en plantas industriales y análisis de armónicos en diferentes situaciones de trabajo de equipos electrónicos.

Para una mejor comprensión de la problemática actual que gira en torno a la calidad de la energía, a continuación se plantean tres casos reales, en diferentes situaciones de trabajo, donde se analizan aspectos de calidad de la energía eléctrica.

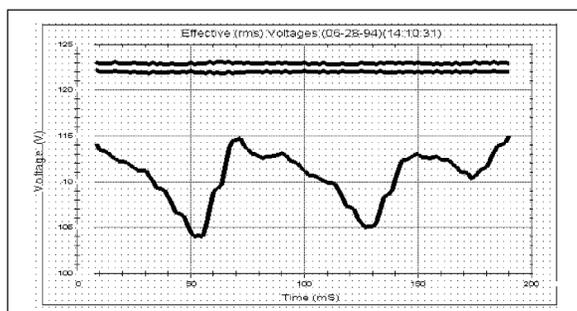
### 2.3.1 Conexiones Seltas.

En un edificio de oficinas de un complejo industrial se empezaron a experimentar inesperados problemas en las PC que se encendían y apagaban continuamente, además de que las lámparas fluorescentes centelleaban con frecuencia. Este problema se repitió durante una hora, hasta que el técnico de mantenimiento fue notificado. El técnico volvió a su oficina para inspeccionar la potencia de la planta, pues sospechaba que los problemas eran consecuencia de la calidad de la energía suministrada por la compañía.

Esta empresa había instalado recientemente un sistema POWERLOGIC capaz de monitorear formas de onda de tensión y corriente, este sistema incluía una función de monitoreo de circuitos en puntos estratégicos del complejo, incluyendo sensores en la acometida de servicios del edificio, que era donde se sufría de desconexiones intermitentes. El software del monitoreo había registrado múltiples fluctuaciones de tensión entre la fase A y el neutro, encontrando que la tensión en esta fase caía por debajo del 88% intermitentemente a lo largo de la hora anterior (ver figuras 2.2 y 2.3).



**Figura 2. 2.** Las fluctuaciones de tensión provocan el mal funcionamiento de los equipos y el parpadeo de la iluminación.<sup>[7]</sup>



**Figura 2. 3.** La forma de onda captada muestra las fluctuaciones de tensión entre la fase A y el neutro en valor efectivo debidas al interruptor defectuoso de la compañía eléctrica.<sup>[7]</sup>

El edificio de oficinas estaba alimentado por una línea de 12 kV que pertenecía y era mantenido por la compañía local. Esta acometida alimentaba al edificio de oficinas y otros comercios y pequeñas industrias situadas cerca de la planta. Sospechando que los fallos de tensión provenían de la compañía, el técnico se puso en contacto con ella. Posteriormente, un empleado del edificio de oficinas comunicó que había visto un arco eléctrico en lo alto de un poste de la compañía en el exterior del edificio. La figura 2.4 muestra que el arco eléctrico provenía de una de las fases de un interruptor trifásico de cuchilla, que se hallaba antes de la acometida que daba servicio al edificio.



**Figura 2. 4.** Arco en un interruptor trifásico de cuchilla.<sup>[7]</sup>

Hasta el momento, el problema había causado el mal funcionamiento de las PC, de la iluminación y del servidor de la red local. El técnico de mantenimiento llamó de nuevo a la compañía para informar de los arcos eléctricos.

### **Análisis de la situación.**

Las fluctuaciones de tensión están definidas como variaciones sistemáticas o aleatorias de la tensión. Estas fluctuaciones ciclo a ciclo pueden ser provocadas por múltiples causas. Los hornos por arco es una de las más frecuentes y pueden afectar a otros clientes que se alimentan de la misma línea de servicio. Las conexiones sueltas, el arranque de motores o cargas intermitentes, y el hecho de soldar son causas frecuentes de fluctuaciones en industrias y empresas de servicios.

Las conexiones sueltas generan puntos de alta impedancia que provocan caídas de tensión intermitentes. Las fluctuaciones afectan al equipo después de la conexión suelta. En una instalación, las conexiones sueltas pueden hallarse en cualquier punto de un conductor.

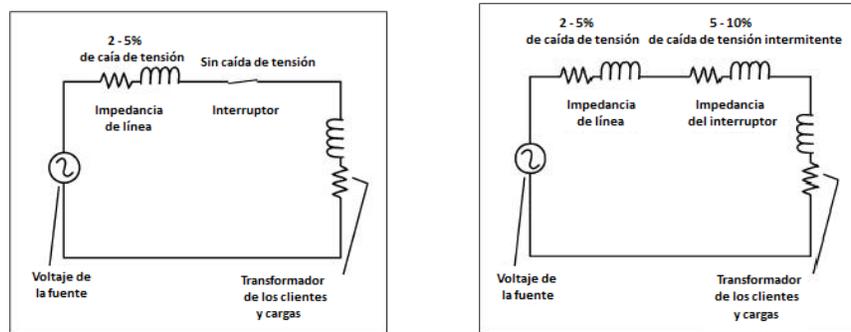
Los fallos de interrupción del sistema de potencia y del equipo son solo parte del problema. Magnitudes de fluctuación tan bajas como el 0,5% puede causar parpadeo perceptible en algunas fuentes de iluminación. Este fenómeno resulta extremadamente irritante para algunos trabajadores y disminuye su productividad, dependiendo de la susceptibilidad al parpadeo. Los estudios muestran que esta sensibilidad depende de la cantidad de luz, de la frecuencia de parpadeo y el tipo de actividad del empleado. El problema se complica por el hecho de que los sistemas de iluminación tienen diferentes respuestas, según las características del cambio de tensión.

### La solución particular.

La solución para este caso fue la de llamar a la compañía suministradora, quienes enviaron un equipo para investigar esta falla. En el momento en que el equipo llegó, el metal fundido producido por el interruptor había encendido unas hierbas secas que había en la base del poste. El interruptor se había deteriorado hasta el punto de que ya no podía ser cerrado.

Después de notificárselo a los clientes de la línea el equipo desconectó la acometida de 12 kV para instalar una conexión provisional en lugar del interruptor. Al día siguiente, el equipo reemplazó el interruptor defectuoso y quitó la conexión provisional, todo ello sin interrumpir el suministro a los clientes.

El problema de la industria fue identificado rápida y efectivamente mediante el análisis de la potencia y el sistema de control, antes de que causar problemas más serios. Una manufacturera de controladores de reloj fue menos afortunada pues se incendió y tuvo que cerrar a causa de una conexión defectuosa en el interior de las instalaciones. El motivo fue, como el técnico de mantenimiento descubrió más tarde, la deformación de una pieza del embarrado a la que se sujetaban los cables. La instalación había sido hecha correctamente, pero la empresa no había comprobado la integridad de las conexiones en ninguna ocasión. La conexión de una de las fases empezó a provocar un arco en el turno de noche, que evolucionó a un arco en las tres fases e inició el incendio que provocó el cierre de la planta durante una semana.



(a) El diagrama del circuito muestra como no aparece caída de tensión en el interruptor de cuchilla en perfectas condiciones. La mayor caída tiene lugar en las cargas de los clientes (b) Durante el arco tenemos una caída de tensión intermitente en el interruptor. Este arco disipa aproximadamente 70 kVA – suficientes para alimentar un motor de 100 hp – y provoca la fusión del interruptor.

**Figura 2. 5.** Diagrama del circuito cuesta<sup>[7]</sup>

Los falsos contactos en las acometidas de las barras de distribución provocan variaciones de tensión de valor importante en las ondas de tensión. Como se observó en el caso anterior, los monitores, colocados en lugares clave en acometidas nuevas o ya existentes, pueden capturar formas de onda y activar alarmas cuando las conexiones sueltas provocan fluctuaciones.

Algunas empresas se basan únicamente en inspecciones termográficas de las acometidas para identificar las conexiones sueltas. Estas inspecciones suelen denominarse detecciones infrarrojas, ya que los esquemas de detección registran las variaciones de luz infrarroja. Las conexiones sueltas se muestran como zonas de rojo intenso en las impresiones termográficas. Algunos dispositivos muestran la temperatura de los componentes de metal.

Aunque son muy recomendables las inspecciones por infrarrojos, su utilidad para prevenir problemas de conexiones sueltas es muy limitada. Algunas compañías completan sus inspecciones con comprobaciones anuales o bienales. El problema puede durar meses, interrumpiendo intermitentemente los equipos de producción sensibles y disminuyendo la efectividad de los empleados, hasta que la inspección periódica lo descubra. Además, ésta se basa en un efecto secundario de las conexiones sueltas: el calentamiento excesivo. El calentamiento es provocado por la caída de tensión en las conexiones de alta impedancia del circuito.

### **2.3.2 Errores de instrumentos convencionales por efectos de las armónicas.**

La presencia de armónicas afecta severamente la lectura de los instrumentos, lo que implica tomar en cuenta diversas precauciones al realizar una lectura. El análisis que se realiza a continuación se *refiere* a los instrumentos de uso frecuente.

#### **Instrumentos de aguja de tipo electrodinamómetro.**

Estos instrumentos son los de uso más común en tableros industriales. Su principio de funcionamiento es tal que indican el verdadero valor efectivo de la onda. Dado que emplean inductancias y sólo consideran usualmente hasta la armónica 5 en forma fidedigna, su mayor problema se relaciona con la calibración ya que, al existir piezas mecánicas giratorias, el roce provoca un error de lectura.

#### **Instrumentos digitales con rectificador a la entrada.**

La gran mayoría de los instrumentos digitales a la entrada disponen de un rectificador de modo tal que lo que realmente miden es el valor medio de la onda rectificada. Si la onda es sinusoidal el instrumento funcionará con una buena precisión. Si la onda tiene armónicas, el instrumento mide un valor inferior al valor eficaz. En la medición de corrientes como las registradas en computadoras, el instrumento mide un 30% menos que el valor efectivo (RMS) de la corriente.

#### **Instrumentos de verdadero valor efectivo (true RMS).**

En general, en estos instrumentos, de tipo digital, se emplea un sensor que registra la elevación de temperatura por una resistencia por la cual circula la corriente a medir. Por tanto, el instrumento mide el verdadero valor efectivo de la corriente (o el tensión) incluyendo todas las armónicas. Debido a que se mide un fenómeno térmico el instrumento no es apto para medir consumos de rápida variación; es usual que registre una medición cada 1 ó 2 segundos. Otros equipos, de mayor

calidad, miden empleando un conversor análogo-digital (llamado de doble rampa); el proceso de lectura en estos casos toma 400 ms.

### **Instrumento para medir armónicas.**

Para determinar el contenido armónico de la corriente o la tensión, no existe otro procedimiento que emplear un medidor de armónicas, las que en general despliegan en pantalla las formas de onda, el valor de la fundamental, de cada armónica, el valor efectivo, el valor máximo y la distorsión total.

### **2.3.3 Estudio de calidad de la Energía Eléctrica.**

Debido a ciertos eventos que se han presentado en diferentes sitios del sistema eléctrico de la Vidriera “Los Reyes”, el personal de mantenimiento de la planta tomó la decisión de efectuar un estudio de calidad de la energía para determinar las causas que han provocado las fallas operativas y daños en los equipos.

Para cumplir con el objetivo anterior, se efectuaron mediciones eléctricas en 5 sitios previamente definidos por el personal de la Vidriera “Los Reyes”:

- A) Transformador 1, Horno 30
- B) ITM 300, Horno 30
- C) Transformador 2, Horno 50
- D) ITM Enfriamiento, Máquina 51
- E) ITM SE, Horno 40

De las mediciones realizadas, se detectó:

- A) El nivel de tensión es el adecuado en todos los sitios, exceptuando el tablero del transformador 1, que alimenta al sistema de enfriamiento de la máquina 51.
- B) Existen caídas de tensión Sag’s de mediana importancia que pueden provocar la salida de operación de equipos sensibles tales como variadores de velocidad.
- C) Los Sag’s se lograron registrar en los 4 medidores que estaban conectados en forma simultánea, con lo cual se concluye que dicho evento fue producido en el sistema de media tensión de la planta.
- D) Los niveles de distorsión armónica tanto de tensión como de corriente se encuentran en valores permisibles y acorde con el tipo de equipos bajo estudio.

En base a los resultados del estudio se sugiere instalar:

- a) Supresores de transitorios de tensión en los tableros que alimentan a los variadores de velocidad.
- b) Reactores o filtros de armónicas en los alimentadores a los variadores de velocidad.
- c) Acondicionadores de línea en los alimentadores a los variadores de velocidad.

Las recomendaciones específicas de los sitios de medición forman parte integral del estudio. Como se muestra a continuación:

Resultados del estudio.

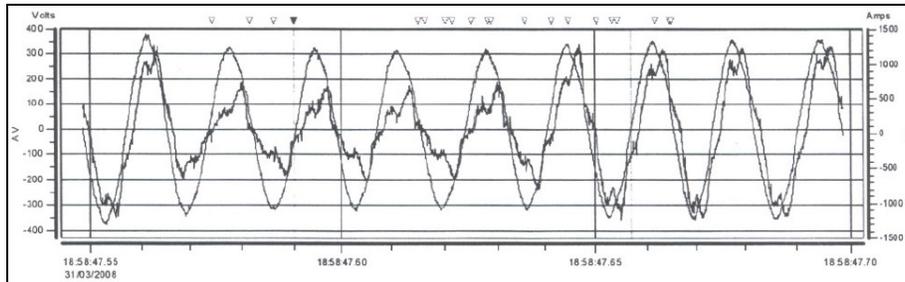
- *Transformador 1, Horno 30, 1000 kVA, 440 V, Z% = 5,30 (31 de marzo al 04 de abril de 2008)*

De la medición realizada en el transformador 1 de 1000 kVA del Horno 30, podemos comentar:

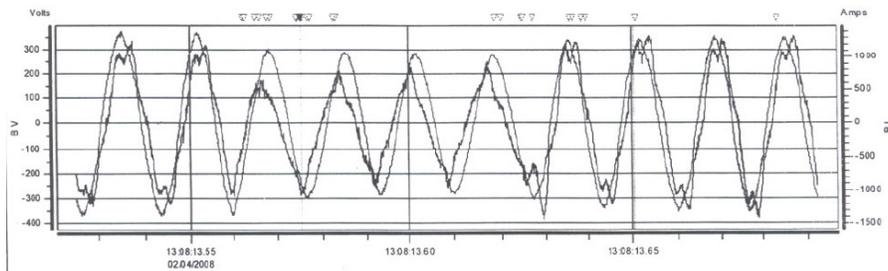
Debido a que el equipo de medición se conectó en estrella, por lo que en las gráficas de valores RMS se muestran los valores de tensión de fase a neutro.

- A) Los niveles de tensión promedio en las tres fases, se encuentran en valores aceptables, con un promedio de 254,13 V de fase a neutro, mismos que corresponde a un 0,05% por arriba de la tensión nominal. El desbalance de tensión entre las fases del sistema es de 0,24%.
- B) La corriente promedio en el transformador fue de 796,13 A, con un desbalance entre las fases A y C del 0,78%.
- C) La potencia real promedio trifásica en el transformador fue de 553,00 kW.
- D) El factor de potencia promedio trifásico fue de 0,911 atrasado.
- E) La potencia reactiva promedio trifásica en el transformador fue de 235,10 kVAR.
- F) La potencia aparente promedio trifásica en el transformador fue de 607,00 kVA, lo que implica que el transformador está operando a un 60,7% de su capacidad nominal.
- G) La distorsión armónica total de tensión de las tres fases promedio fue de 2,72%, valor que se encuentra dentro de las recomendaciones de la IEEE 519, que sugieren como valor máximo para circuitos en baja tensión no rebasar de un 5%. Las armónicas de tensión de mayor importancia son la quinta y séptima, con valores de 2,22% y 1,30% respectivamente de la corriente a frecuencia fundamental.
- H) La distorsión armónica total de corriente de las tres fases promedio fue de 12,94%, si aplicamos las normas de la IEEE 519 en el PCC (Punto de acoplamiento común), tenemos que el valor registrado cumple satisfactoriamente con las recomendaciones ya que para este circuito en específico el valor límite sugerido es del 15%. Las armónicas de corriente de mayor importancia son la tercera, quinta y séptima, con valores de 11,57%, 9,96% y 2,75% respectivamente de la corriente a frecuencia fundamental.
- I) Durante la medición se registraron algunos disturbios eléctricos, que corresponden a Sag's o caídas de tensión, mismos que se detallan a continuación.
  - a. Sag instantáneo, del tipo bifásico (fases A-B), registrado el día 31 de marzo a las 18:58:47 h, con una duración de 0,0670 s. (7½ ciclos), la fase más afectada fue la "A" tuvo una magnitud de 214,9 V, que corresponde a un 84,60% de tensión nominal que es de 254 V entre fases.
  - b. Sag instantáneo, del tipo monofásico (fase A), registrado el día 31 de marzo a las 19:08:03 h, con una duración de 0,0335 seg. (2 ciclos), la fase afectada tuvo una magnitud de 225,000 V, que corresponde a un 88,58% de tensión nominal que es de 254 V entre fases.
  - c. Sag instantáneo, del tipo monofásico (fase B), registrado el día 1 de abril a las 12:48:24 h, con una duración de 0,0504 s. (3 ciclos), la fase afectada tuvo una magnitud de 220,0 V, que corresponde a un 86,61% de tensión nominal que es de 254 V entre fases.
  - d. Sag instantáneo, del tipo trifásico, registrado el día 2 de abril a las 13:08:13 h, con una duración de 0,0754 s. (4½ ciclos), la fase más afectada fue la "B", tuvo una magnitud de 188,2 V, que corresponde a un 74,09% de tensión nominal que es de 254 V entre fases.

Los disturbios eléctricos registrados tuvieron su origen en la fuente de alimentación, es decir en el sistema de media tensión, el evento de mayor importancia debido a su duración fue el registrado el 31 de marzo a las 18:58 h, no obstante en base a su magnitud fue el registrado a las 13:08 del día 2 de abril.



**Figura 2. 6.** Medición registrada el día 31/03/2008, a las 18:58 h, en donde se observa una importante depresión de tensión en la fase A del Transformador 1, el evento de mayor importancia debido a su duración.<sup>[8]</sup>



**Figura 2. 7.** Medición registrada el día 02/04/2008, a las 13:08 h en donde se observa una importante depresión de tensión en la fase A del Transformador 1, el evento de mayor importancia debido a su magnitud.<sup>[8]</sup>

Recomendaciones:

Los disturbios eléctricos registrados afectan principalmente a equipos sensibles que cuenten con electrónica, como podrían ser los variadores de velocidad, se sugiere implementar soluciones específicas por equipo sensible.

- *Interrupción Termomagnético de 300 A (Alimentador a Variadores) Horno 30 (31 de marzo al 03 de abril de 2008)*

De la medición realizada en el ITM de 300 A que corresponde al alimentador de los variadores del Horno 30, podemos comentar:

Debido a que el equipo de medición se conectó en delta, las gráficas de valores RMS muestran los valores de tensión entre fases.

- A) Los niveles de tensión promedio en las tres fases, se encuentran en valores aceptables, con un promedio de 439,87 V entre fases, mismo que corresponde a un 0,03% por abajo de la tensión nominal. El desbalance de tensión entre las fases del sistema es de 0,25%.
- B) La corriente promedio en el ITM Horno 30 fue de 41,18 A, con un desbalance entre las fases B y C del 2,81%.
- C) La potencia real promedio trifásica en el ITM Horno 30 fue de 24,56 kW.
- D) El factor de potencia promedio trifásico fue de 0,782 atrasado.
- E) La potencia reactiva promedio trifásica en el ITM Horno 30 fue 9,60 kVAR.
- F) La potencia aparente promedio trifásica fue de 31,39 kVA.
- G) La distorsión armónica total de la tensión de las tres fases promedio fue de 2,94%, valor que se encuentra dentro de las recomendaciones de la IEEE 519, que sugieren como valor máximo para circuitos en baja tensión no rebasar de un 5%. Las armónicas de tensión de mayor importancia son la quinta, séptima y onceava, con valores de 2,01%, 1,39% y 0,62% respectivamente de la corriente a frecuencia fundamental.
- H) La distorsión armónica total de corriente de las tres fases promedio fue de 62,86%, si aplicamos las normas de la IEEE 519 en el PCC (Punto de acoplamiento común), tenemos que el valor registrado no cumple las recomendaciones ya que el valor máximo sugerido por las normas es del 20%. No obstante, conviene mencionar que para este caso la aplicación de la IEEE 519 no es correcta ya que el punto de medición no corresponde a la acometida con LyFC.

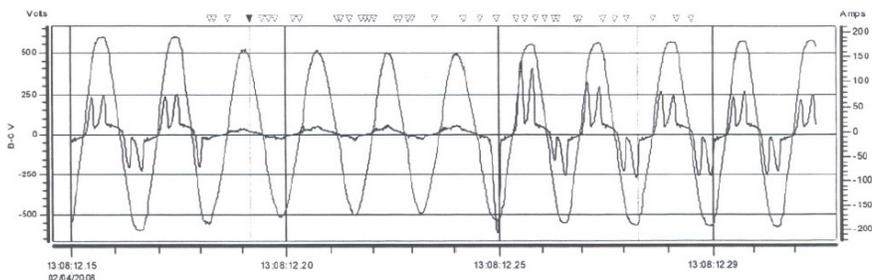
Adicionalmente, sabemos que los variadores de velocidad son cargas no lineales y por lo mismo el nivel de distorsión armónica en corriente será alto y que muy probablemente rebase el máximo nivel recomendado por la IEEE, esto no necesariamente es un indicativo de la existencia de problemas, ya que por naturaleza tienden a deformar las señales de corriente y que además por diseño pueden soportar niveles altos de distorsión sin presentar problemas o daños en sus componentes

Las armónicas de corriente de mayor importancia son la quinta, séptima y onceava, con valores de 50,68%, 33,98% y 11,85% respectivamente de la corriente a frecuencia fundamental.

- I) Durante la medición se registraron algunos disturbios eléctricos, que corresponden a Sag's o caídas de tensión, mismos que se detallan a continuación:
  - a. Sag instantáneo de corta duración, del tipo monofásico, registrado el día 31 de marzo a las 18:58:49 hrs, con una duración de 0,0747 s. ( $4\frac{1}{2}$  ciclos), la fase más afectada fue la B-C, con una magnitud de 362,5 V, que corresponde a un 82,38% del tensión nominal que es de 440 V entre fases.
  - b. Sag instantáneo de corta duración, del tipo monofásico, registrado el día 31 de marzo a las 19:08:04 h, con una duración de 0,0749 s. ( $4\frac{1}{2}$  ciclos), la fase más afectada fue la B-C, con una magnitud de 382,40 V, que corresponde a un 86,90% del tensión nominal que es de 440 V entre fases.
  - c. Sag instantáneo de corta duración, del tipo monofásico, registrado el día 1 de abril a las 12:48:24 h, con una duración de 0,0583 s. ( $3\frac{1}{2}$  ciclos), la fase más afectada fue la A-B, con una magnitud de 386,10 V, que corresponde a un 87,75% del tensión nominal que es de 440 V entre fases.
  - d. Sag instantáneo de corta duración, del tipo trifásico, registrado el día 2 de abril a las 13:08:12 h, con una duración de 0,0916 s. ( $5\frac{1}{2}$  ciclos), la fase más afectada fue la

B-C, con una magnitud de 341,60 V, que corresponde a un 77,63% del tensión nominal que es de 440 V entre fases.

Los disturbios eléctricos registrados tuvieron su origen en la fuente de alimentación, es decir, en el sistema de media tensión, el evento de mayor importancia debido a su magnitud y duración fue el registrado el 2 de abril a las 13:08 hrs.



**Figura 2. 8.** Medición registrada el día 02/04/2008, en donde se observa una importante depresión de tensión y prácticamente una desaparición de la corriente de línea, entre fases B y C del Interruptor Termomagnético de 300 A, el evento de mayor importancia por su duración y magnitud.<sup>[8]</sup>

Recomendaciones:

Las caídas de tensión instantáneas registradas, pueden provocar que los variadores de velocidad, detengan su operación es por ello que se sugiere.

- A) Instalar en el alimentador al grupo de variadores de velocidad un acondicionador de línea, que cuente como mínimo con las siguientes características:
  - Trifásico de 45 kVA o mayor.
  - Tensión de entrada de 440 V con una tolerancia de  $\pm 15\%$
  - Tensión a la salida de 440 V  $\pm 3\%$
  - Tiempo de respuesta menor a 0,5 ciclos.
  - Distorsión armónica de tensión a la salida no mayor al 3%
  - Con desconexión-conexión automática en caso de la ocurrencia de una interrupción eléctrica.
- B) Instalar un supresor contra transitorios de tensión, a la salida del acondicionador de línea, que cuente como mínimo con las siguientes características:
  - Trifásico conexión delta 4 hilos para un sistema de 440 V
  - Con una capacidad de 160 kA por fase
  - Modos de protección L-L y L-T
  - Bidireccional
  - Que cuente con filtro de ruido de alta frecuencia
  - Tiempo de respuesta menor a 1 nanosegundo
  - Que cumplan con los estándares ANSI/IEEE C62.41
- C) Instalar a la entrada de cada variador de velocidad un reactor de línea con las siguientes características:
  - Trifásico conexión delta 3 hilos para un sistema de 440 V
  - Para operar con una carga de 50 HP
  - Con una reactancia del 3%

- Inductancia lineal hasta un 150% de corriente nominal

Al llevar a cabo estas recomendaciones se logrará evitar que los variadores de velocidad salgan de operación al momento de presentarse alguna caída de tensión, además de protegerlos contra los transitorios de tensión y armónicos.

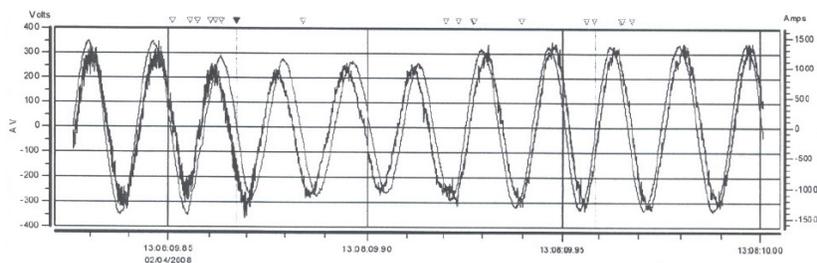
- *Transformador 2, Horno 50, 1500 kVA, 480 V, Z%=5,8 (31 de marzo al 4 de abril de 2008)*

De la medición realizada en el transformador 2 de 1000 kVA del Horno 50, podemos comentar:

Debido a que el equipo de conexión se conectó en estrella, en las gráficas de valores RMS se muestran los valores de tensión de fase a neutro.

- A) Los niveles de tensión promedio en las tres fases, se encuentran en valores aceptables, con un promedio de 246,2 V de fase a neutro, mismo que corresponde a un 3,07% por abajo del tensión nominal. El desbalance de tensión entre las fases del sistema es de 0,41%.
- B) La corriente promedio en el transformador fue de 797,03 A, con un desbalance entre las fases A y C del 3,98%.
- C) La potencia real promedio trifásica en el transformador fue de 556,70 kW.
- D) El factor de potencia promedio trifásico fue de 0,946 atrasado.
- E) La potencia reactiva promedio trifásica fue de 159,80 kVAR.
- F) La potencia aparente promedio trifásica en el transformador fue de 588,70 kVA, lo que implica que el transformador está operando a un 58,47% de su capacidad nominal.
- G) La distorsión armónica total del tensión de las tres fases promedio fue de 1,39%, valor que se encuentra dentro de las recomendaciones de la IEEE 519, que sugieren como valor máximo para circuitos en baja tensión no rebasar de un 5%.
- H) La distorsión armónica total de corriente de las tres fases promedio fue de 5,50%, si aplicamos las normas de la IEEE 519 en el PCC (Punto de acoplamiento común), tenemos que el valor registrado cumple satisfactoriamente con las recomendaciones ya que para este circuito en específico el valor límite sugerido es del 15%.
- I) Durante la medición se registraron algunos disturbios eléctricos, que corresponden a Sag's o caídas de tensión, mismos que se detallan a continuación:
  - a. Sag instantáneo de corta duración, del tipo bifásico (fases A y C), registrado el día 31 de marzo a las 18:58:45 h, con una duración de 0,0741 s. ( $4\frac{1}{2}$  ciclos), la fase más afectada fue la "C" con una magnitud de 209,6 V, que corresponde a un 82,51% del tensión nominal que es de 254 V entre fases.
  - b. Sag instantáneo de corta duración, del tipo monofásico, registrado el día 31 de marzo a las 19:08:00 h, con una duración de 0,0500 s. (3 ciclos), la fase afectada fue la "C" con una magnitud de 217,8 V, que corresponde a un 85,74% del tensión nominal que es de 254 V entre fases.
  - c. Sag instantáneo de corta duración, del tipo monofásico, registrado el día 1 de abril a las 12:48:23 h, con una duración de 0,0587 s. ( $3\frac{1}{2}$  ciclos), la fase más afectada fue la "A" tuvo una magnitud de 210,4 V, que corresponde a un 82,83% del tensión nominal que es de 254 V entre fases.
  - d. Sag instantáneo de corta duración, del tipo trifásico, registrado el día 2 de abril a las 13:08:09 h, con una duración de 0,092 s. (6 ciclos), la fase más afectada fue la "A" tuvo una magnitud de 179,9 V, que corresponde a un 70,82% del tensión nominal que es de 254 V entre fases.

Los disturbios eléctricos registrados tuvieron su origen en la fuente de alimentación, y se pueden corroborar con los eventos registrados en el transformador 1 del Horno 30, el evento de mayor importancia debido a su magnitud y duración fue el registrado el 2 de abril a las 13:08 h.



**Figura 2. 9.** Medición registrada el día 02/04/2008, a las 13:08 h, donde se observan disturbios eléctricos importantes en la fase A del Transformador 1, los cuales repercuten en el equipo bajo prueba, en este caso el Transformador 2, el evento de mayor importancia debido a su duración y magnitud.<sup>[8]</sup>

Recomendaciones:

Los disturbios eléctricos registrados afectan principalmente a equipos sensibles que cuentan con electrónica, como podrían ser los variadores de velocidad, se sugiere implementar soluciones específicas por equipo sensible.

- *Interrupción Termomagnético, Enfriamiento Máquina 51 (31 de marzo al 4 de abril de 2008)*

De la medición realizada en el ITM enfriamiento máquina 51, 440 V, podemos comentar:

Debido a que el equipo de medición se conectó en delta, las gráficas de los valores RMS se muestran los valores de tensión entre fases.

- A) Los niveles tensión promedio en las tres fases, se encuentra en valores no aceptables, con un promedio de 417,40 V entre fases, mismo que corresponde a un 5,14% por abajo del tensión nominal. El desbalance de tensión entre las fases del sistema es de 0,22%.
- B) La corriente promedio en el ITM enfriamiento fue de 219,67 A, con un desbalance entre las fases A y C del 7,22%.
- C) La potencia real promedio trifásica en el ITM enfriamiento fue de 132,70 kW.
- D) El factor de potencia promedio trifásico fue de 0,827 atrasado.
- E) La potencia reactiva promedio trifásica en el ITM enfriamiento fue de 18,40 kVAR.
- F) La potencia aparente promedio trifásica fue de 158,80 kVA.
- G) La distorsión armónica total de la tensión de las tres fases promedio fue de 2,31%, valor que se encuentra dentro de las recomendaciones de la IEEE 519, que sugieren como valor máximo para circuitos en baja tensión no rebasar de un 5%. Las armónicas de tensión de mayor importancia son la quinta, séptima y onceava, con valores de 1,39%, 1,39% y 0,56% respectivamente de la corriente a frecuencia fundamental.
- H) La distorsión armónica total de corriente de las tres fases promedio fue de 60,20%, si aplicamos las normas de la IEEE 519 en el PCC (Punto de acoplamiento común), tenemos que el valor registrado no cumple con las recomendaciones ya que el valor máximo

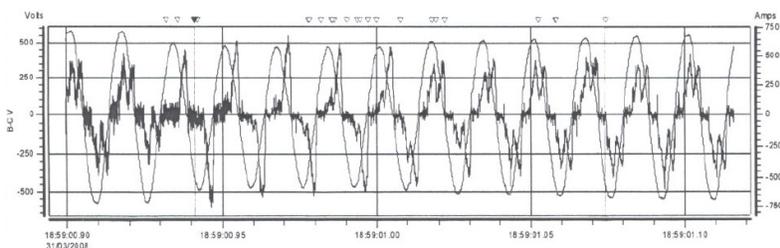
sugerido por las normas es del 20%. No obstante, conviene mencionar que para este caso la aplicación de la IEEE 519 no es correcta ya que el punto de medición no corresponde a la acometida con LyFC.

Adicionalmente, sabemos que los variadores de velocidad son cargas no lineales y por lo mismo el nivel de distorsión armónica en corriente será alto y que muy probablemente rebase el máximo nivel recomendado por la IEEE, esto no necesariamente es un indicativo de la existencia de problemas, ya que por naturaleza tienden a deformar las señales de corriente y que además por diseño pueden soportar niveles altos de distorsión sin presentar problemas o daños en sus componentes.

Las armónicas de corriente de mayor importancia son la quinta, séptima y onceava, con valores de 36,36%, 21,05% y 10,15% respectivamente de la corriente a frecuencia fundamental.

- I) Durante la medición se registraron algunos disturbios eléctricos, que corresponden a Sag's o caídas de tensión, mismos que se detallan a continuación:
- Sag instantáneo de corta duración, del tipo bifásico (fases A-B y B-C), registrado el día 31 de marzo a las 18:59:00 h, con una duración de 0,1334 s. (8 ciclos), la fase más afectada fue la "B-C" con una magnitud de 325,0 V, que corresponde a un 73,86% del tensión nominal que es de 440 V entre fases.
  - Sag instantáneo de corta duración, del tipo monofásico, registrado el día 31 de marzo a las 19:08:17 h, con una duración de 0,0586 s. ( $3\frac{1}{2}$  ciclos), la fase afectada fue la B-C con una magnitud de 364,40 V, que corresponde a un 82,81% del tensión nominal que es de 440 V entre fases.
  - Sag instantáneo de corta duración, del tipo monofásico, registrado el día 1 de abril a las 12:48:38 h, con una duración de 0,0417 s. ( $2\frac{1}{2}$  ciclos), la fase afectada fue la C-A, con una magnitud de 366,80 V, que corresponde a un 83,36% del tensión nominal que es de 440 V entre fases.
  - Sag instantáneo de corta duración, del tipo bifásico (fases B-C y C-A), registrado el día 2 de abril a las 13:08:28 h, con una duración de 0,0752 s. ( $4\frac{1}{2}$  ciclos), la fase más afectada fue la "B-C" con una magnitud de 326,20 V, que corresponde a un 74,13% del tensión nominal que es de 440 V entre fases.

Los disturbios eléctricos registrados tuvieron su origen en la fuente de alimentación, y se pueden corroborar con los eventos registrados en el transformador 1 del Horno 30, el evento de mayor importancia debido a su magnitud y duración fue el registrado el 31 de marzo a las 18:59 h.



**Figura 2. 10.** Medición registrada el día 31/03/2008, a las 18:59 h, donde se observa el brusco cambio en la corriente y una depresión importante de tensión entre fases B y C del Interruptor Termomagnético, el evento de mayor importancia por su duración y magnitud. <sup>[8]</sup>

### Recomendaciones:

Las caídas de tensión instantáneas registradas, pueden provocar que los variadores de velocidad detengan su operación, es por ello que se sugiere:

- A) Evaluar la posibilidad de distribuir los variadores de velocidad en los dos transformadores del Horno 50.
- B) Reducir la carga del transformador.
- C) Verificar la caída de tensión que existe desde el bus de 23 kV hasta el primario del transformador 1 y en caso de ser necesario tomar acciones para mejorar la regulación de tensión.
- D) Debido a la capacidad del grupo de variadores de velocidad, no es económicamente viable instalar acondicionadores de línea, aunque conviene evaluar la implementación de esta alternativa, tomando en cuenta la cantidad de equipos fallidos y los paros de producción provocados por los Sag's o caídas de tensión.
- E) Instalar un supresor contra transitorios de tensión, en bus de baja tensión del transformador 1, que cuente como mínimo con las siguientes características:
  - Trifásico conexión delta 4 hilos para un sistema de 440 V
  - Con una capacidad de 160 kA por fase
  - Modos de protección L-L y L-T
  - Bidireccional
  - Que cuente con filtro de ruido de alta frecuencia
  - Tiempo de respuesta menor a 1 nanosegundo
  - Que cumplan con los estándares ANSI/IEEE C62.41
- F) Instalar por grupo de dos o tres variadores un filtro de armónicas de banda ancha, con las siguientes características:
  - Trifásico conexión delta 4 hilos para un sistema de 440 V
  - Conexión en serie con el variador de velocidad
  - Que logre el cumplimiento de la norma IEEE 519 a la entrada del filtro
- G) Una opción de menor desempeño que sustituye a la descrita en el inciso 6 es la instalación a la entrada de cada variador de velocidad un reactor de línea con las siguientes características:
  - Trifásico conexión delta 3 hilos para un sistema de 440 V
  - Con una reactancia del 3%
  - Inductancia lineal hasta un 150% de la corriente nominal

Las potencias de los reactores de línea deberán ser seleccionadas en base a la potencia real de cada uno de los 8 variadores de velocidad.

Al llevar a cabo estas recomendaciones se logrará evitar que los variadores de velocidad salgan de operación al momento de presentarse alguna caída de tensión, además de protegerlos contra los transitorios de tensión y armónicas.

- *Interruptor Termomagnético SE Horno 40 (04 de abril de 2008)*

De la medición realizada en el Interruptor Termomagnético (ITM) SE del Horno 40, podemos comentar:

Debido a que el equipo de medición se conectó en delta, las gráficas en valores RMS muestran los valores de tensión entre fases.

- A) Los niveles de tensión promedio en las tres fases, se encuentran en valores aceptables, con un promedio de 475,60 V entre fases, mismo que corresponde a un 0,92% por abajo del tensión nominal. El desbalance de tensión entre las fases del sistema es de 0,25%.
- B) La corriente promedio en el ITM SE Horno 40 fue de 484,80 A, con un desbalance entre las fases A y B del 2,88%.
- C) La potencia real promedio trifásica en el ITM SE Horno 40 fue de 301,10 kW.
- D) El factor de potencia promedio trifásico fue de 0,753 atrasado.
- E) La potencia reactiva promedio trifásica fue de 260,80 kVAR.
- F) La potencia aparente promedio trifásica en el ITM SE Horno 40 fue de 399,40 kVA.
- G) La distorsión armónica total del tensión de las tres fases promedio fue de 1,06%, valor que se encuentra dentro de las recomendaciones de la IEEE 519, que sugieren como valor máximo para circuitos en baja tensión no rebasar de un 5%.
- H) La distorsión armónica total de corriente de las tres fases promedio fue de 2,32%, si aplicamos las normas de la IEEE 519 en el PCC (Punto de acoplamiento común), tenemos que el valor registrado cumple satisfactoriamente con las recomendaciones ya que para este circuito en específico el valor límite sugerido es del 15%.
- I) Durante las mediciones no se registraron disturbios eléctricos



## **CAPÍTULO III**

### **ESTUDIO EXPERIMENTAL**

La metodología para la realización del estudio de calidad de la energía eléctrica en cargas activas y pasivas correspondiente al presente proyecto, pretende determinar de manera experimental la respuesta eléctrica que producen dichas cargas.

El proceso experimental da inicio con la identificación y el armado de redes o sistemas bajo prueba; los pasos siguientes son: la definición del sistema; la parte experimental del registro de las mediciones en tiempo real y su respectiva transferencia a la PC; la clasificación y estructuración de los datos y por último, el análisis y a la generación de inferencias, para concluir el proceso en el capítulo IV.

Los parámetros a registrar son: THD, potencias P, Q y S, factor de potencia, ángulo de fases, factor de cresta, magnitudes RMS de tensión y corriente. Por ultimo, se realizan registros en el tiempo de corrientes, tensiones, potencias y factores de potencia, entre otros.

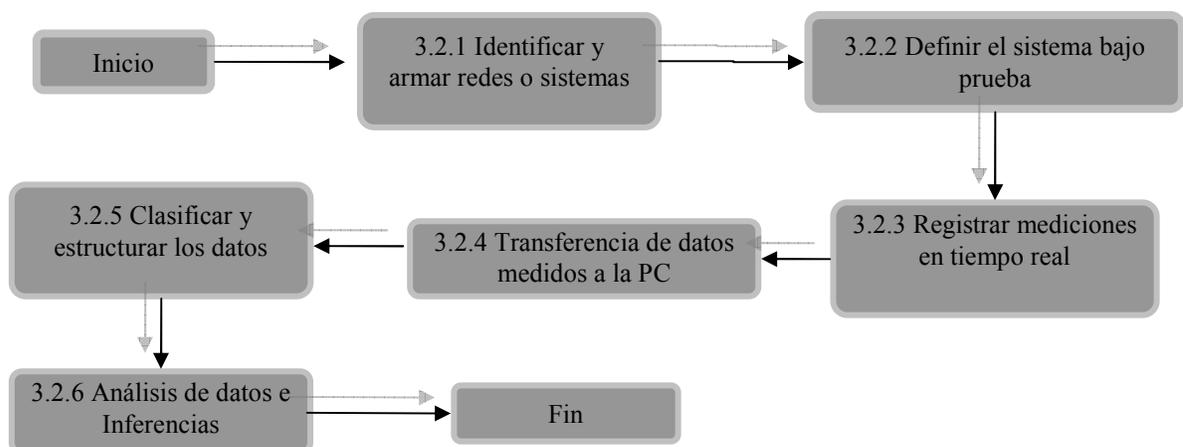
### 3.1. Metodología para el estudio experimental.

Para cada experimento, se consideraron las diferentes características del espectro de las señales eléctricas sujetas a evaluación; asimismo se realizaron diferentes registros para observar el comportamiento de las señales eléctricas en el tiempo, principalmente, en la respuesta espectral de cargas activas se midieron y valoraron los siguientes parámetros:

- Valores de tensión y corriente RMS
- THD
- Factor de cresta
- Potencia P, Q y S
- Factor de potencia
- Defasamiento

### 3.2 Desarrollo Experimental

A continuación se describe el desarrollo experimental del presente proyecto de tesis, explicando posteriormente cada una de las etapas o pasos del proceso establecido en la figura 3.1.



**Figura 3.1.** Método propuesto

### 3.2.1. Identificar y armar redes o sistemas

El objetivo de este primer paso es definir las cargas pasivas y establecer niveles energéticos a utilizar. Se seleccionan seis combinaciones de cargas pasivas, y se diseña la forma de conexión o armado. Así mismo, se definen las cargas activas e identifican las características de operación en forma individual y grupal. Se determina la realización de pruebas, al ubicar la alimentación eléctrica de la red a utilizar. Se seleccionan para este caso dos combinaciones de cargas activas y se diseña la forma de conexión o armado.

Posteriormente se realizan las pruebas, una vez que se haya alimentado la red se toman mediciones y registros, los cuales se realizaron en el tablero de distribución del Laboratorio 3 de Electrotecnia, Edificio de Laboratorios Ligeros, Entrada 3, E.S.I.M.E. Zacatenco, tal como se muestra en las fotografías, figura 3.2.



**Figura 3.2.** *Fotografías descriptivas de las mediciones*

Las cargas activas a las que se les realizaron las pruebas se describen a continuación y sus registros se muestran de la figura 3.22. a la 3.71.

### 3.2.2. Definir el sistema bajo prueba

Se realizan diferentes pruebas de respuesta espectral a cargas pasivas y activas. En las cargas pasivas se desplegaron y midieron las señales de tensión, corriente y THD. Las combinaciones de cargas pasivas bajo prueba son:

- Resistiva 1100W, 120V.
- Inductiva 1000VA, 120V.
- Capacitiva 1000VA, 120V.
- Resistiva – Inductiva, 1100W-1000VA, 120V.
- Resistiva – Capacitiva, 1100W-1000VA, 120V
- Resistiva – Inductiva – Capacitiva 1100W, 1000VA, 1000VA, 120V

Una vez realizadas las pruebas a estas combinaciones de cargas se obtuvieron las formas de ondas y espectros armónicos en tensión y corriente eléctrica que se muestran en las figuras de la 3.10 a la 3.21.

En las cargas activas se realizaron mediciones de señales de tensión y corriente. Las redes bajo prueba fueron:

- Trece computadoras activas a través de siete UPS.
- Trece computadoras activas a través de siete UPS y dos ventiladores de aire acondicionado.

Una vez realizadas las pruebas a los sistemas ya mencionados se obtuvieron los registros del comportamiento de tensión, corriente, potencia real, potencia aparente, potencia reactiva y FP; también formas de onda y espectro de armónicos de tensión y corriente y se tomaron mediciones de tensión, corriente, potencias, FP. Estos registros y mediciones instantáneas se muestran en las figuras de la 3.22. a la 3.71.

### 3.2.3. Registrar mediciones en tiempo real

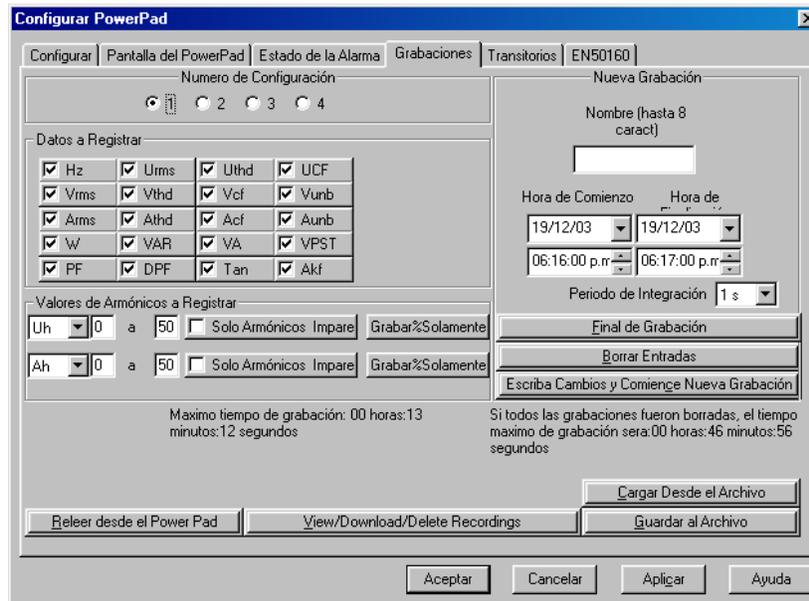
Para realizar los registros en tiempo real se utilizó el Analizador de Calidad de Energía Eléctrica Trifásica Power Pad™, Modelo 3945, figura 3.3.



**Figura 3.3.** *Power Pad™ Modelo 3945 Características del Producto.*

Se conecta el Analizador de Calidad de Energía Eléctrica Trifásica Power Pad™, Modelo 3945, a la PC, se abre el software Power Pad, y se realizan los siguientes pasos:

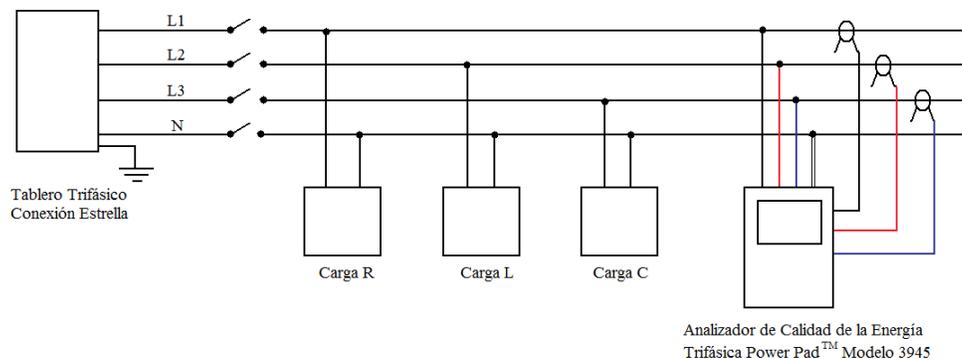
- Seleccionar del menú “Instrumento” la función “Configurar”
- Seleccionar la etiqueta “Grabaciones” para obtener la siguiente pantalla figura 3.4.



**Figura 3.4.** Ventana de configuración del Power Pad

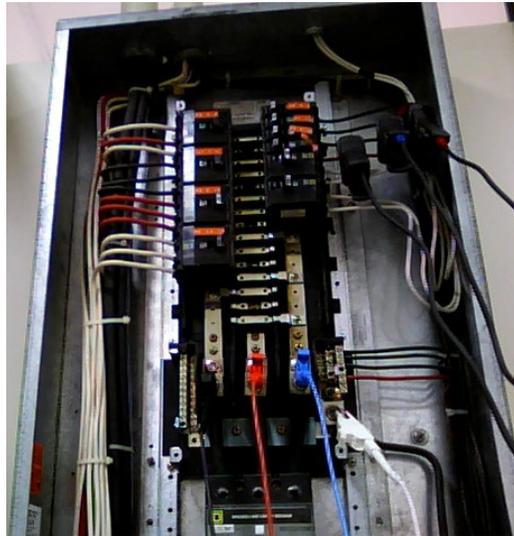
La pantalla figura 3.4. Permite seleccionar los parámetros que registrara el Analizador de Calidad de Energía Eléctrica Trifásica Power Pad™, Modelo 3945; también registra hora de inicio y hora de término de cada registro y un nombre asignado que servirá para que con este nombre se guarde el registro.

En la figura 3.5. se muestra un diagrama a bloques que indica la forma de realizar las mediciones a las cargas pasivas.



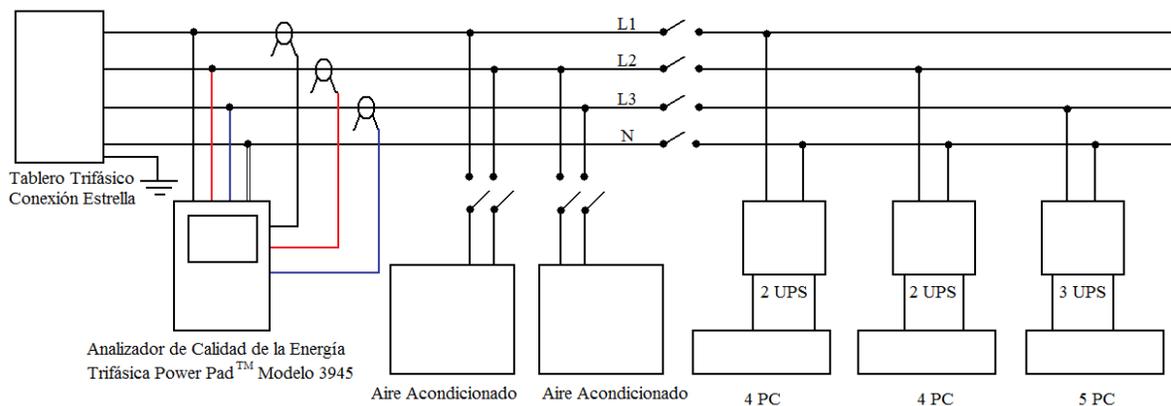
**Figura 3.5.** Red a bloques del sistema de cargas pasivas bajo prueba.

En la figura 3.5a, se muestra un acercamiento fotográfico del tablero de distribución y las conexiones del medidor de calidad por fase.



**Figura 3.5a.**

En la figura 3.6 se muestra un diagrama a bloques que representa la forma de realizar las mediciones a las cargas activas.



**Figura 3.6.** Red a bloques del sistema de cargas activas bajo prueba.

En la figura 3.6a, se muestra un acercamiento fotográfico del tablero de distribución y las conexiones del medidor de calidad en las tres fases de la distribución de energía.

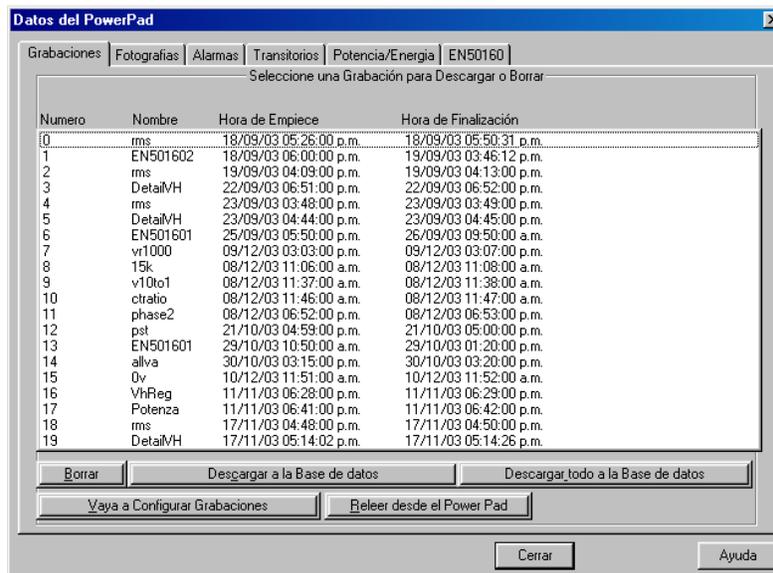


**Figura 3.6a.**

### 3.2.4. Transferencia de datos medidos la PC

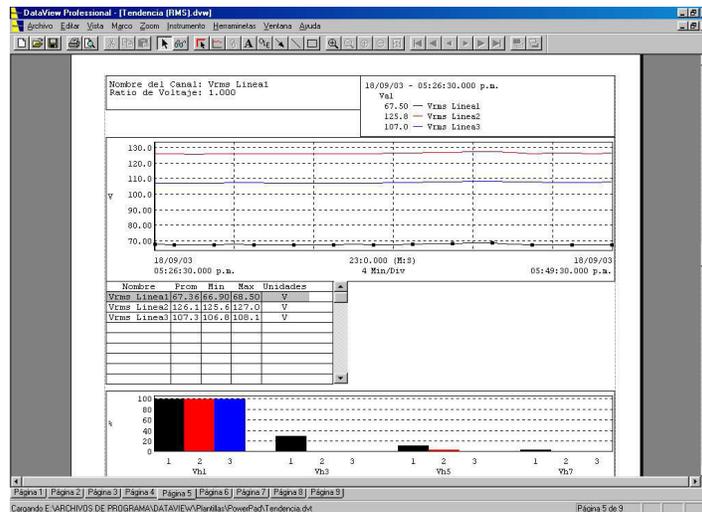
Cuando los registros han sido completados se procede a su descarga de la siguiente manera:

- Seleccionar del menú “Instrumento” la opción “Data”; aparecerá la siguiente pantalla (figura 3.7).



**Figura 3.7. Ventana de Grabaciones**

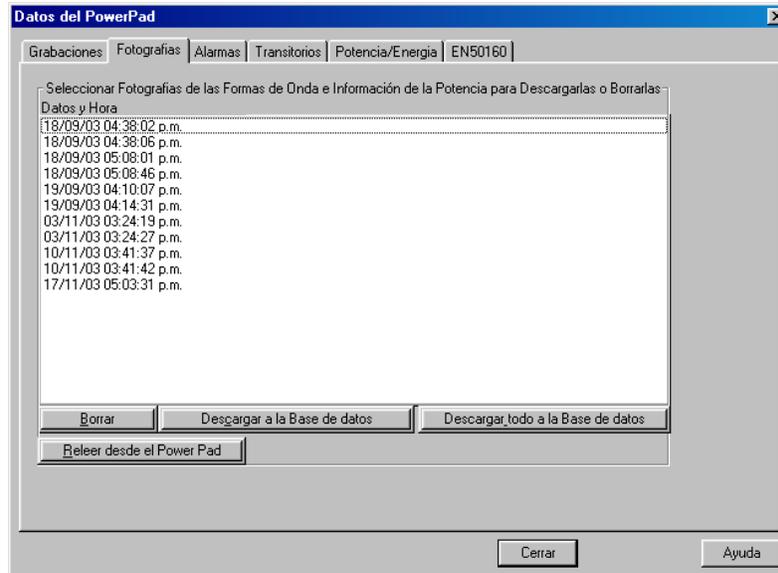
- Se selecciona un registro de la lista y se presiona en “Descargar a la Base de datos”.
- Se verá el estado de terminación de la descarga.
- Cuando se completa la descarga se escoge un nombre para la base de datos, se presiona “Guardar” y posteriormente se presiona “OK”.
- Se cierran las pantalla de Datos
- Los registros aparecen como se muestran en la figura 3.8.



**Figura 3.8.** Ejemplo de un registro guardado en la Base de Datos

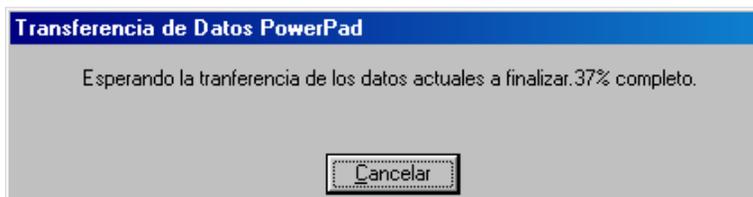
Se realizaron tomas de fotografía, en el Power Pad. Para realizar esta acción, se presiona el botón de la cámara por 3 segundos o más. Para realizar descargas se siguen los siguientes pasos:

- En el software Power Pad, selecciona del menú “Instrumento” la opción “Data”
- Se selecciona la pestaña de “Fotografías” se verá la siguiente pantalla, ver figura 3.9.



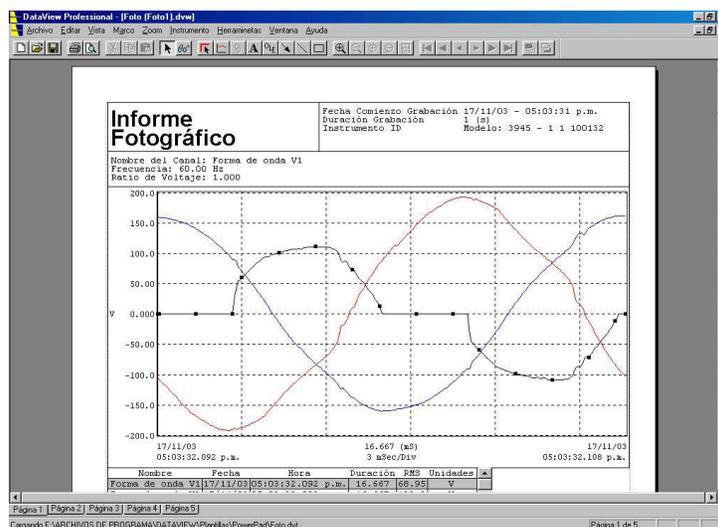
**Figura 3.9.** Ventana de la pestaña “Fotografías”

- Se seleccionan una por una las fotografías que se desee descargar y se selecciona “Descargar a la Base de datos”.
- Se realiza una transferencia de datos del medidor al la PC. como se ve en la figura 3.10.



**Figura 3.10.** Ventana de transferencia de datos.

El formato que se obtiene de cada una de las fotografías es el mostrado en la figura 3.11.



**Figura 3.11.** Ejemplo del formato obtenido

### 3.2.5. Clasificación y estructuración de datos

Después de la obtención de todos los registros y fotografías, se realiza una clasificación de estos datos. La clasificación de los datos es la siguiente:

#### A) Registros

- Comportamiento de tensión y corriente por fase.
- Comportamiento de la distorsión armónica por fase.
- Comportamiento de factor de cresta por fase.
- Comportamiento de la potencia real.
- Comportamiento de la potencia reactiva.
- Comportamiento de la potencia aparente.
- Comportamiento del factor de potencia.

#### B) Fotografías

- Forma de onda de tensión y corriente por fase.
- Espectro armónico en tensión y corriente por fase.

- Mediciones de potencias, tensiones, corrientes, FP, DTH.

Nota: de las cargas pasivas solo se realizaron fotografías y de las cargas no lineales se tomo registros y fotos.

## Resultados de mediciones

Las mediciones realizadas en cada uno de los sitios bajo prueba incluyen:

### a) Cargas pasivas

Se registraron los resultados o respuestas eléctricas (espectros) de las siguientes cargas pasivas:

- i. Cargas resistivas 1100W, 120V
- ii. Cargas inductivas 1000 VA, 120V
- iii. Cargas capacitivas, 1000VA, 120V,
- iv. Cargas resistivas-inductivas, 1100 W-1000 VA, 120 V,
- v. Cargas resistivas-capacitivas, 1100W-1000VA, 120 V,
- vi. Cargas resistivas-capacitivas-inductivas, 1100 W-1000 VA-1000 VA, 120 V.

Las imágenes de las mediciones correspondientes a los incisos anteriores se observan en las figuras 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23.

### b) Cargas activas

Para las mediciones y registros que se llevaron a cabo con las cargas activas, se utilizaron los siguientes equipos que representan las cargas activas:

- i. Trece computadoras personales (PC) activadas a través de siete UPS.
- ii. Trece computadoras personales (PC) activadas a través de siete UPS y dos ventiladores de aire acondicionado.

En cada uno de los registros se incluye:

- Comportamiento de tensión y corriente por fase.
- Comportamiento de la distorsión armónica por fase.
- Comportamiento de factor de cresta por fase.
- Comportamiento de la potencia real.
- Comportamiento de la potencia reactiva.
- Comportamiento de la potencia aparente.
- Comportamiento del factor de potencia.
- Forma de onda de tensión y corriente por fase.
- Espectro armónico en tensión y corriente por fase.
- Mediciones de potencias, tensiones, corrientes, FP, THD.

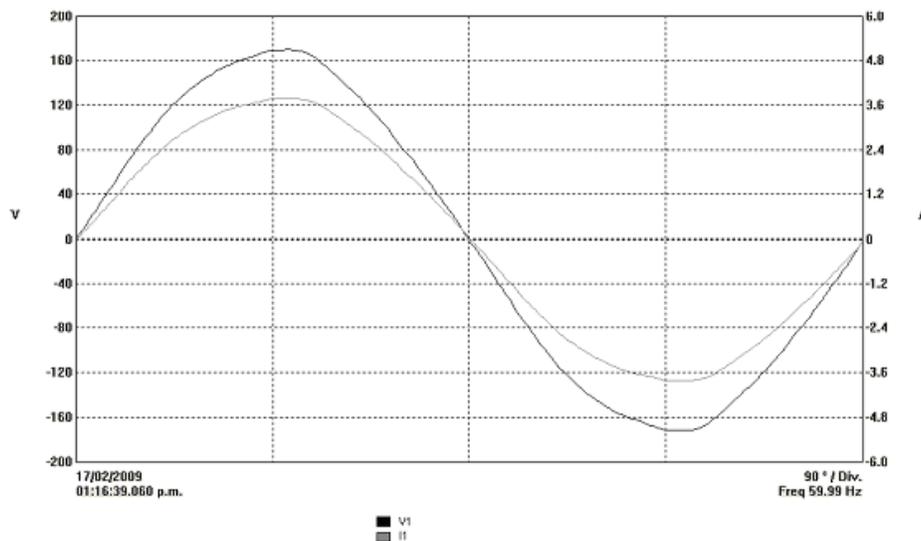
Observar las figuras 3.24,3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30, 3.31, 3.32, 3.33, 3.34, 3.35,3.36, 3.37, 3.38, 3.39, 3.40, 3.41, 3.42, 3.43, 3.44, 3.45, 3.46, 3.47, 3.48, 3.49, 3.50, 3.51, 3.52, 3.53, 3.54, 3.55, 3.56, 3.57, 3.58, 3.59, 3.60, 3.61, 3.62, 3.63, 3.64, 3.65, 3.66, 3.67, 3.68, 3.69, 3.70, 3.71.

### A) Cargas pasivas a 120 V

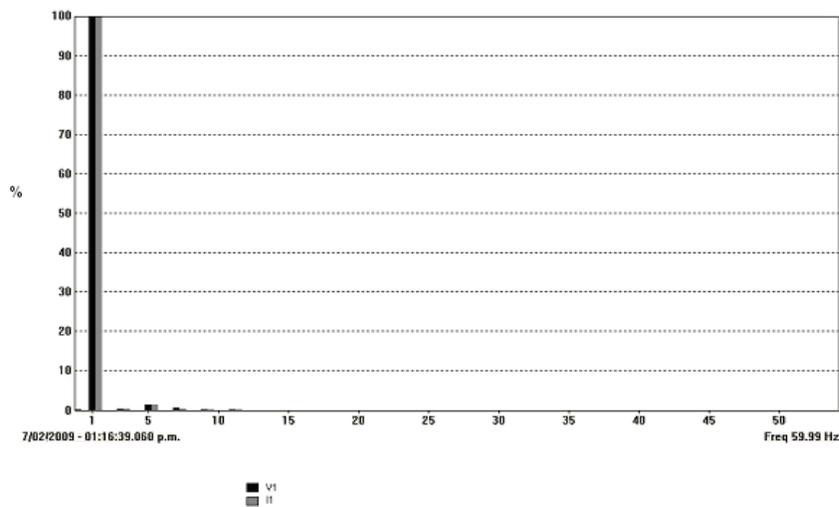
En este apartado se reportan los gráficos correspondientes a las formas de onda instantánea y a los espectros de THD para las cargas pasivas.

#### i. Respuesta espectral de una carga resistiva, 1100 W, 120 V

Para esta respuesta se utilizó un arreglo de cargas resistivas. Puede observarse que no existe defasamiento alguno entre las ondas de tensión y corriente.



**Figura 3.12.** Forma de onda de tensión y corriente de la línea.



**Figura 3.13.** Espectro armónico en tensión y corriente en la línea.

ii. Respuesta espectral de una carga inductiva, 1000 VA, 120 V

En esta respuesta se utilizó un arreglo de cargas inductivas y se procedió a la medición. Obsérvese que existe una importante distorsión armónica en la onda de corriente.

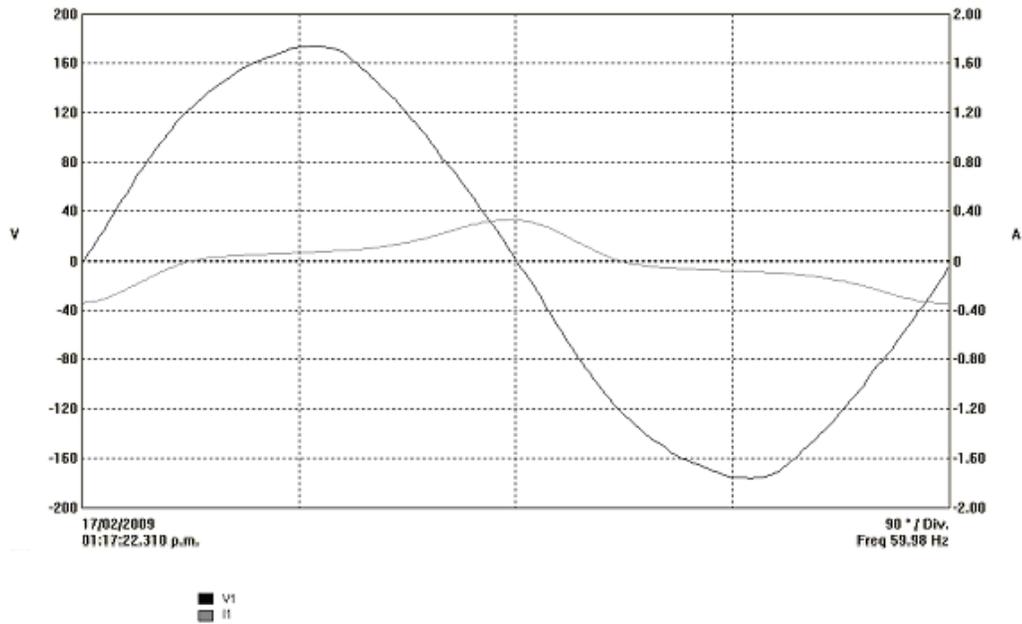


Figura 3.14. Forma de onda de tensión y corriente de la línea.

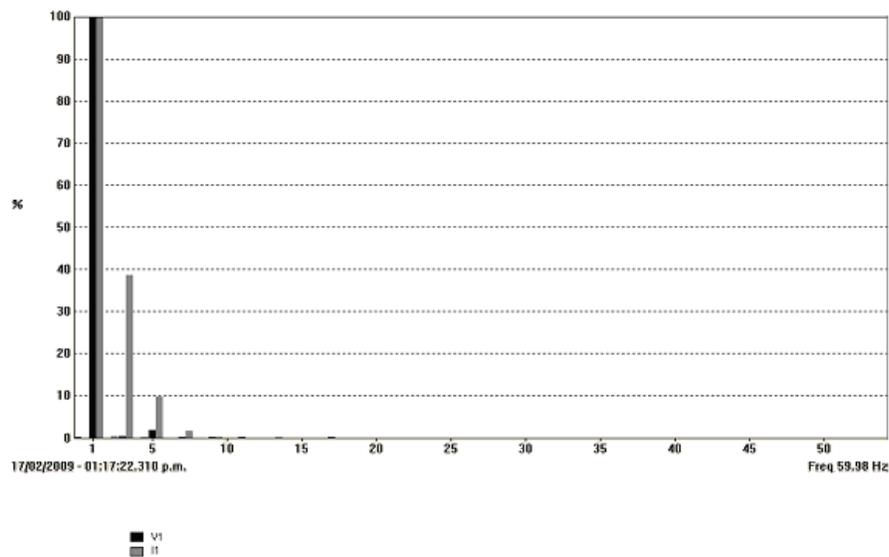


Figura 3.15. Espectro armónico en tensión y corriente en la línea.

iii. Respuesta espectral de una carga capacitiva, 1000 VA, 120 V

La siguiente respuesta eléctrica se obtuvo al utilizar un arreglo de cargas capacitivas. Es de notar que aquí también existe una importante distorsión en la onda de corriente.

- Forma de onda de tensión y corriente de la línea, figura 3.16.

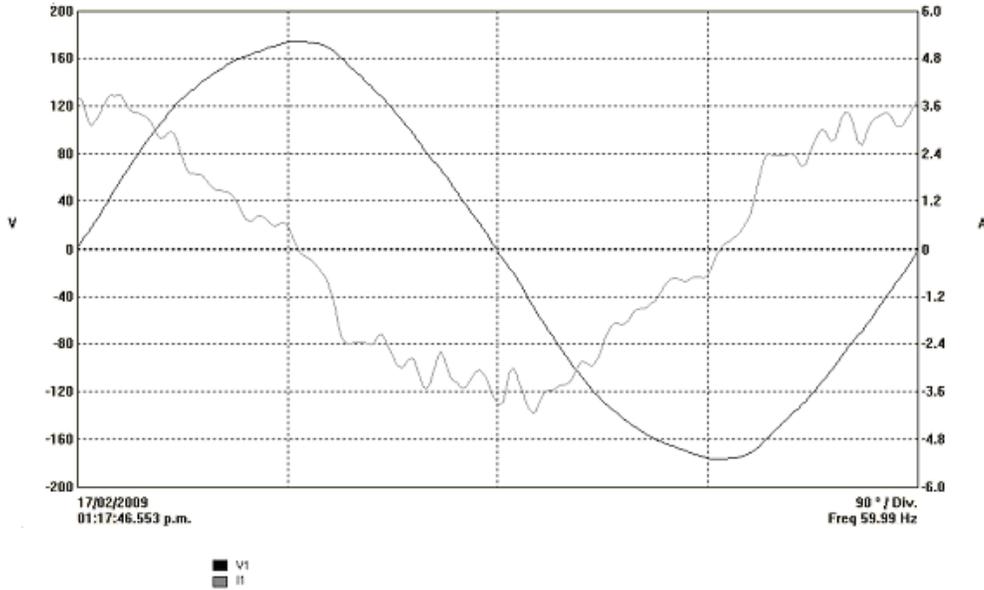


Figura 3.16. Forma de onda de tensión y corriente de la línea.

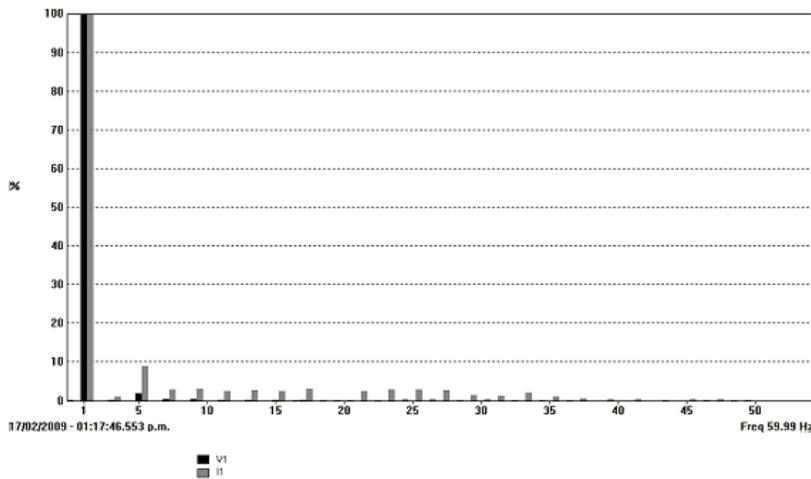


Figura 3.17. Espectro armónico en tensión y corriente en la línea.

iv. Respuesta espectral de una carga resistiva – inductiva, 1100W – 1000VA, 120V

Para la obtención de la siguiente respuesta eléctrica se utilizaron dos arreglos de cargas pasivas, una resistiva y una inductiva. Se observa el pequeño defasamiento que existe entre ambas ondas de tensión y corriente. La distorsión armónica en este caso es prácticamente nula.

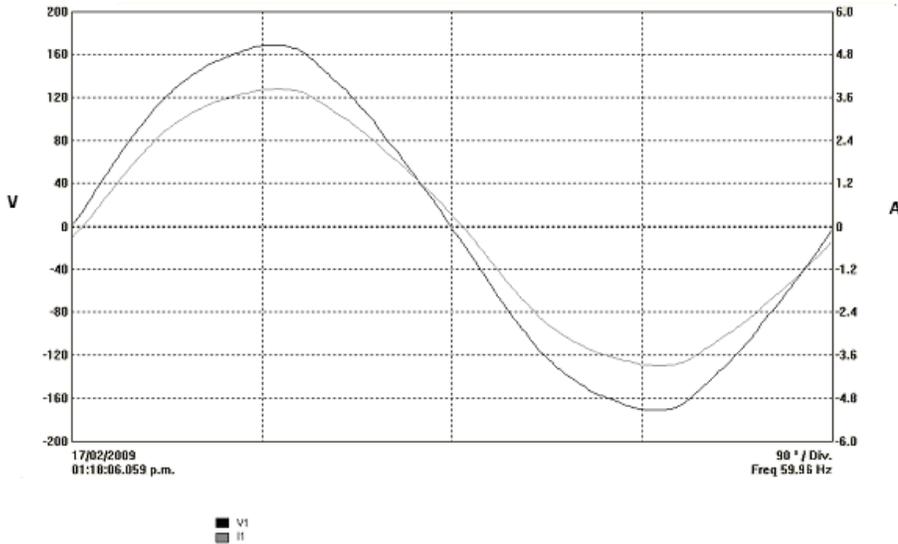


Figura 3.18. Forma de onda de tensión y corriente de la línea.

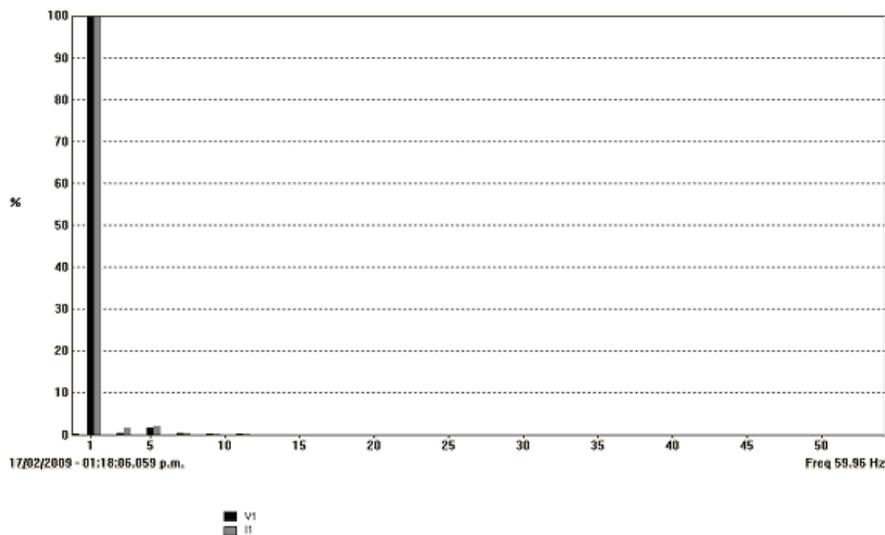
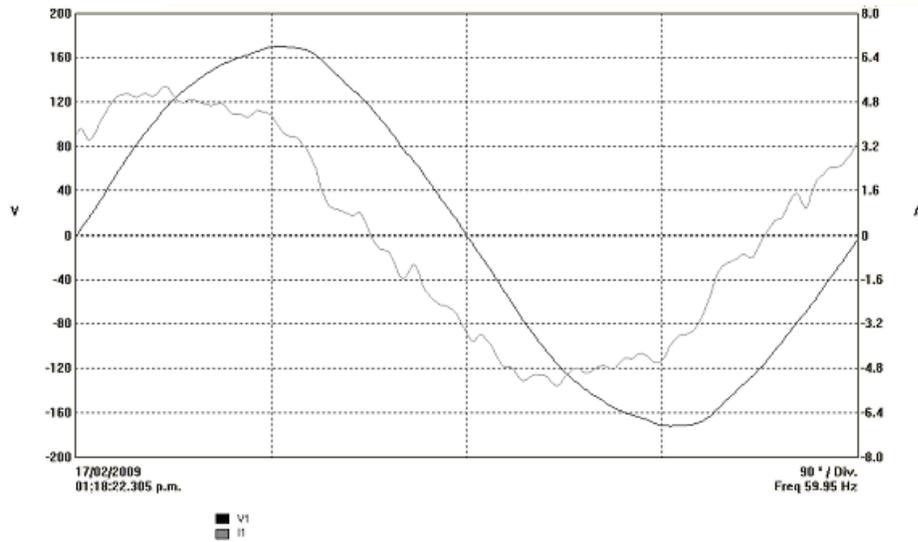


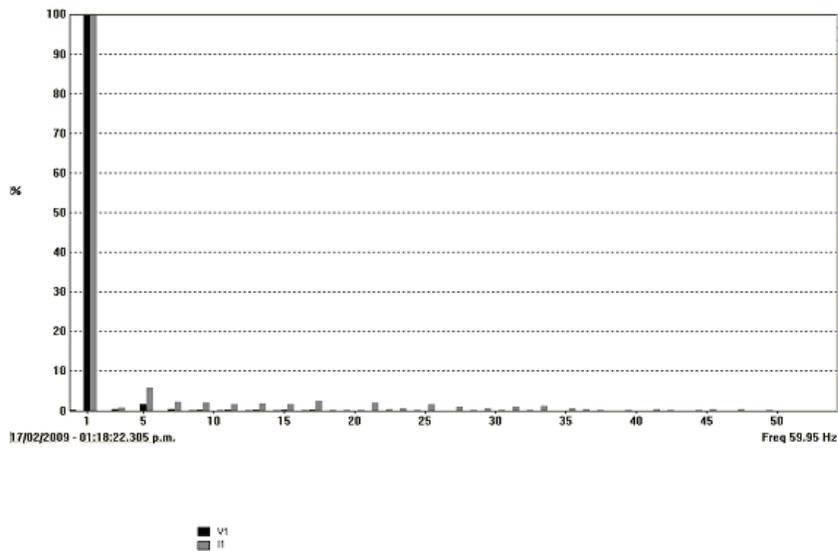
Figura 3.19. Espectro armónico en tensión y corriente en la línea.

v. Respuesta espectral de una carga resistiva – capacitiva 1100W – 1000VA, 120V

En la siguiente respuesta eléctrica se utilizó un arreglo de cargas resistivas y capacitivas. Del espectro armónico se observa la poca distorsión existente y de la onda de corriente se aprecian los efectos de esta distorsión.



**Figura 3.20.** Forma de onda de tensión y corriente de la línea.



**Figura 3.21.** Espectro armónico en tensión y corriente en la línea.

vi. Respuesta espectral de una carga resistiva – capacitiva – inductiva, 1100W – 1000VA – 1000 VA, 120V

La siguiente respuesta se obtuvo al adicionar al arreglo de cargas resistivas un arreglo de cargas inductivas y un arreglo de cargas capacitivas. Se observa en ella la importante distorsión armónica en la onda de corriente de la línea.

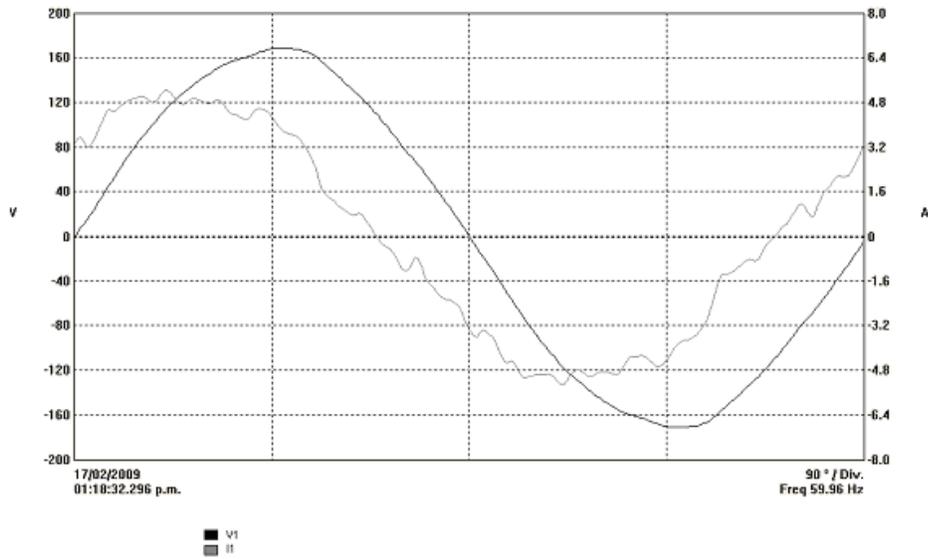


Figura 3.22. Forma de onda de tensión y corriente de la línea.

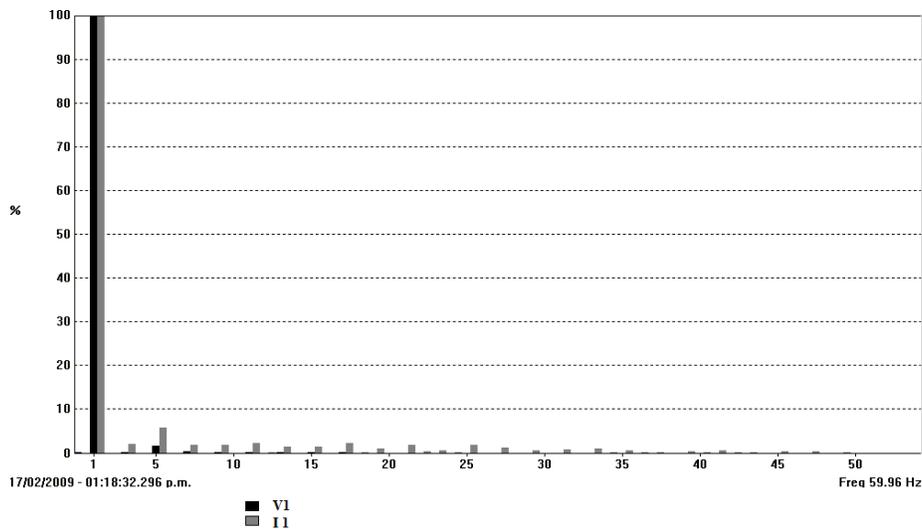


Figura 3.23. Espectro armónico en tensión y corriente en la línea.

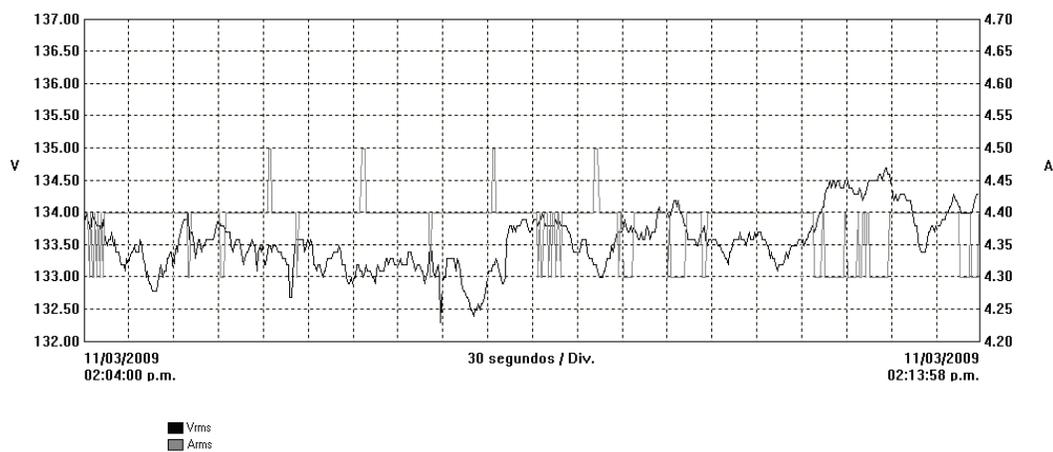
## B) Cargas activas

En este apartado se reportan los gráficos correspondientes a las formas de onda instantánea y a los espectros de THD para las cargas activas.

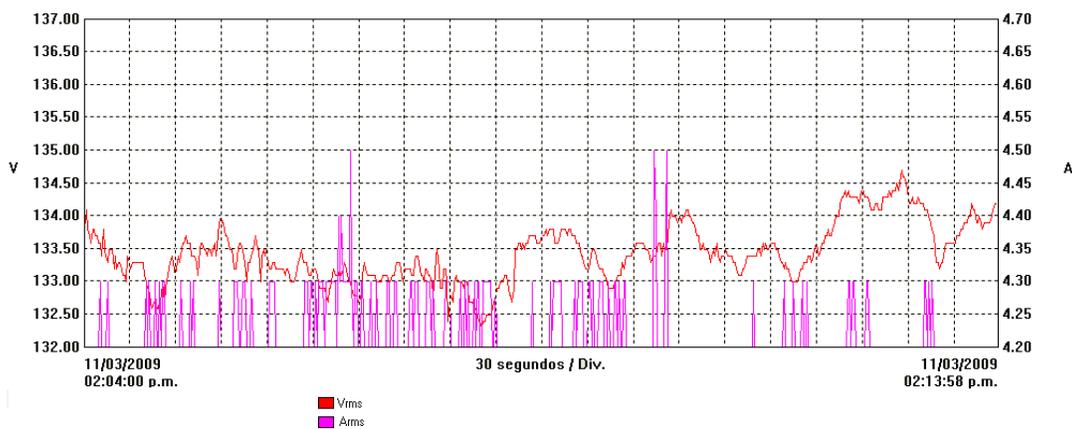
### i. Mediciones de un grupo de trece PC activadas a través de siete UPS

Los siguientes registros se obtuvieron al conectar el Analizador de Calidad de Energía Eléctrica al Tablero de Distribución del Laboratorio 3 de Electrotecnia, durante diez minutos; se utilizaron como cargas activas 13 PC conectadas a través de 7 UPS, como se muestra en el diagrama a bloques de la figura 3.6. Se muestran los comportamientos de tensiones y corrientes por fase y el comportamiento de la corriente del neutro.

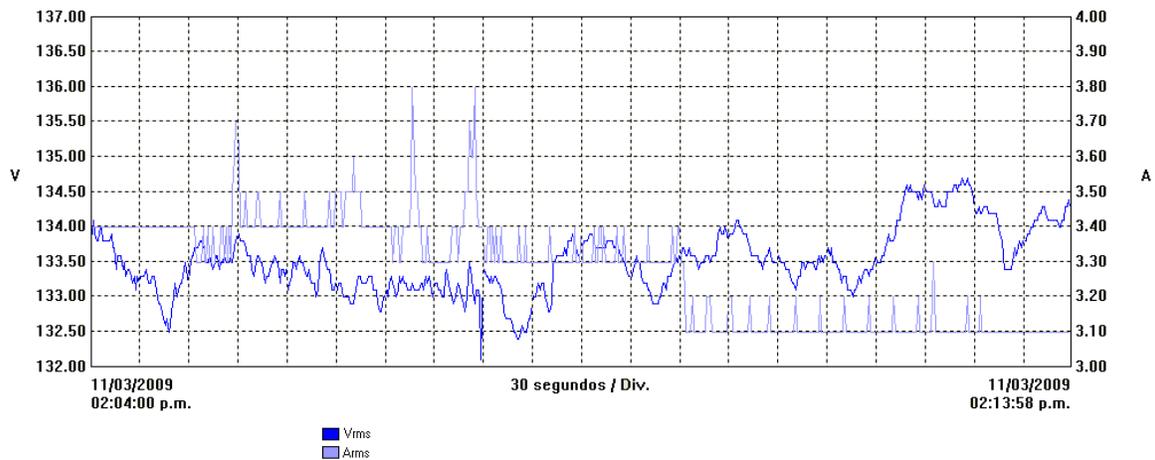
- Comportamiento de tensión y corriente por fase



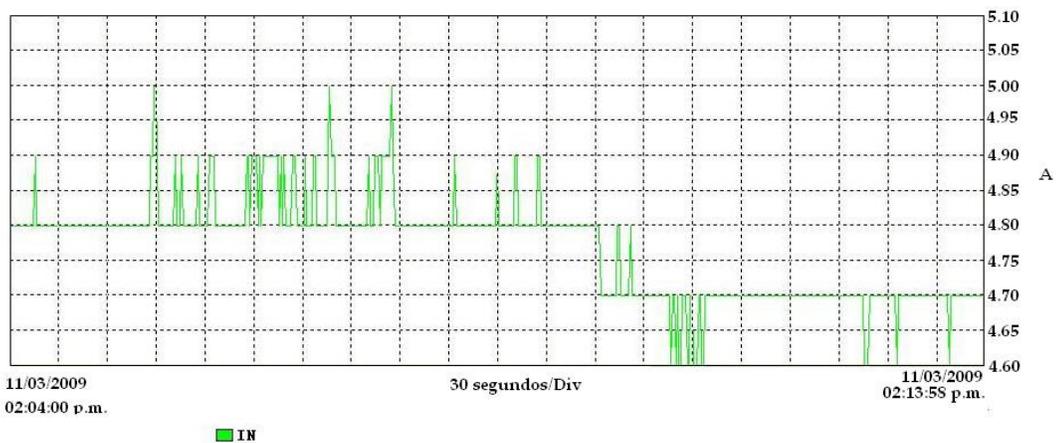
**Figura 3.24.** Comportamiento de la tensión y la corriente de la línea 1.



**Figura 3.25.** Comportamiento de la tensión y la corriente de la línea 2.



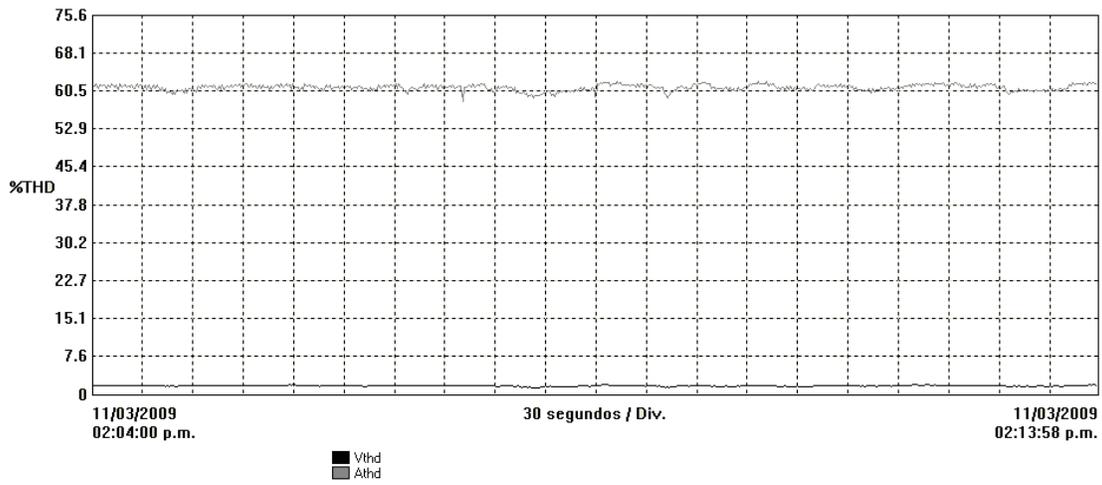
**Figura 3.26.** Comportamiento de la tensión y la corriente de la línea 3.



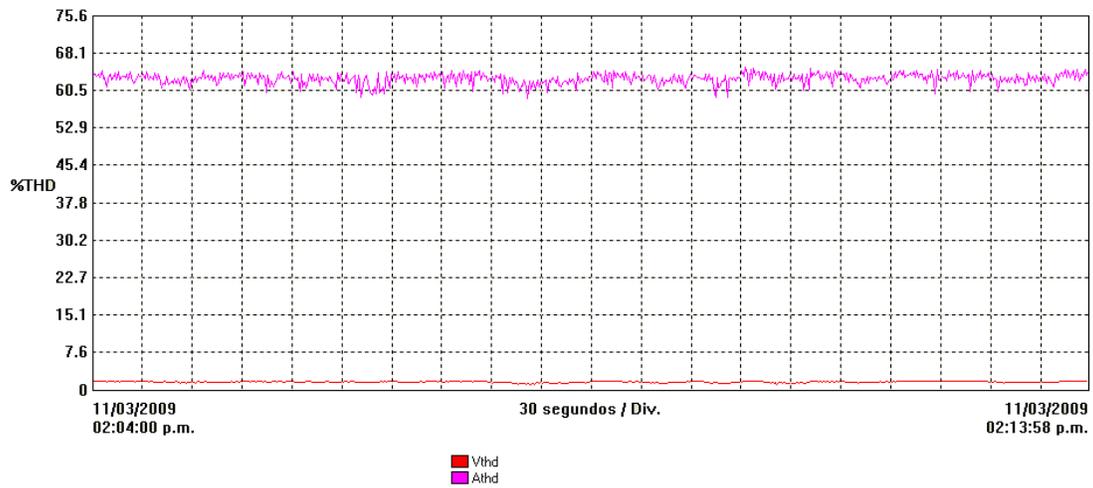
**Figura 3.27.** Comportamiento de la tensión y la corriente del neutro.

- Comportamiento de la distorsión armónica por fase

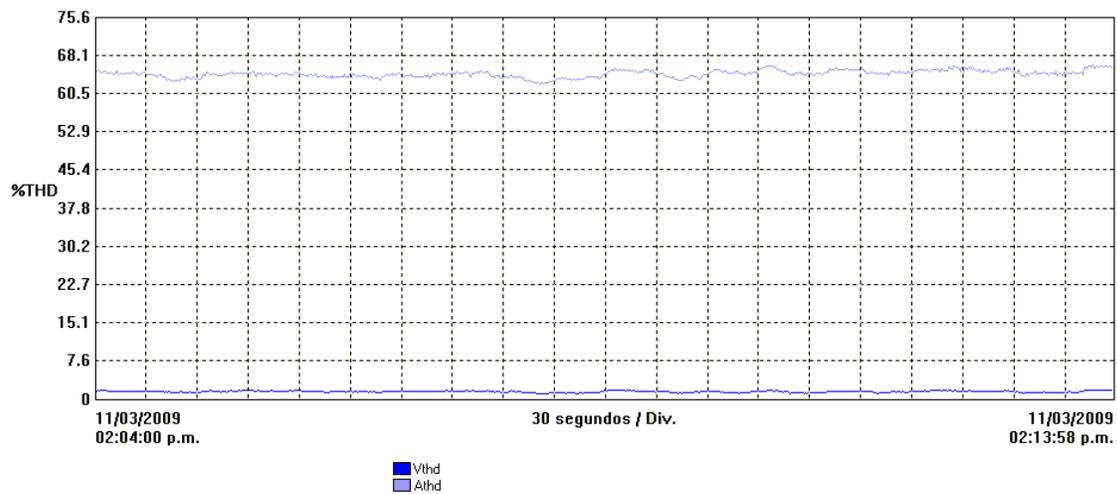
En los siguientes registros se observa el comportamiento del %THD para cada una de las fases. Se observa con claridad el alto porcentaje de THD en las ondas de corriente y la irregularidad de su comportamiento, sobre todo en la línea 2 y el bajo porcentaje en los niveles de tensión y su comportamiento prácticamente constante.



**Figura 3.28.** *Comportamiento de la distorsión armónica de la línea 1.*



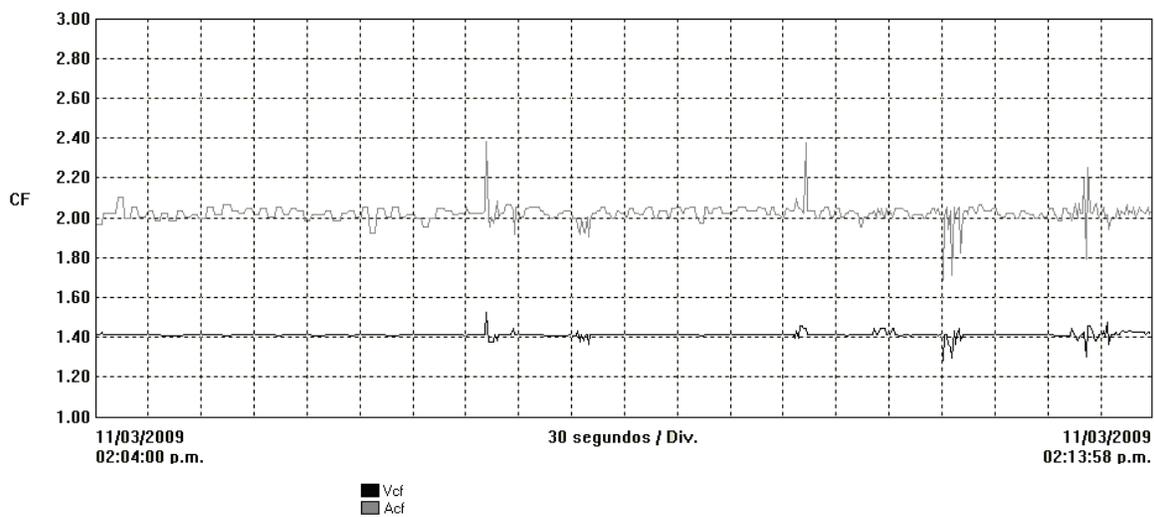
**Figura 3.29.** *Comportamiento de la distorsión armónica de la línea 2.*



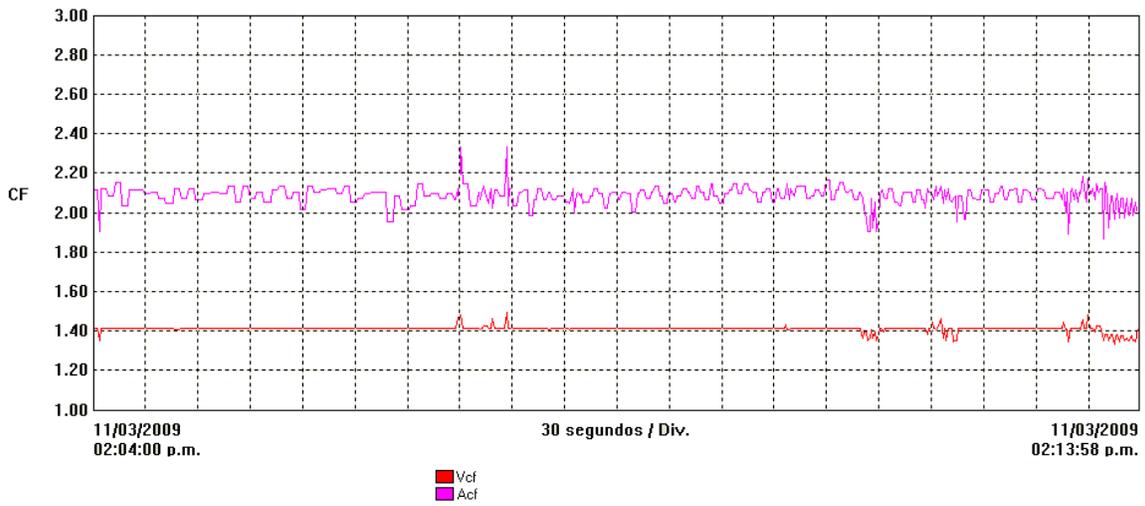
**Figura 3.30.** *Comportamiento de la distorsión armónica de la línea 3.*

- Comportamiento de factor de cresta por fase

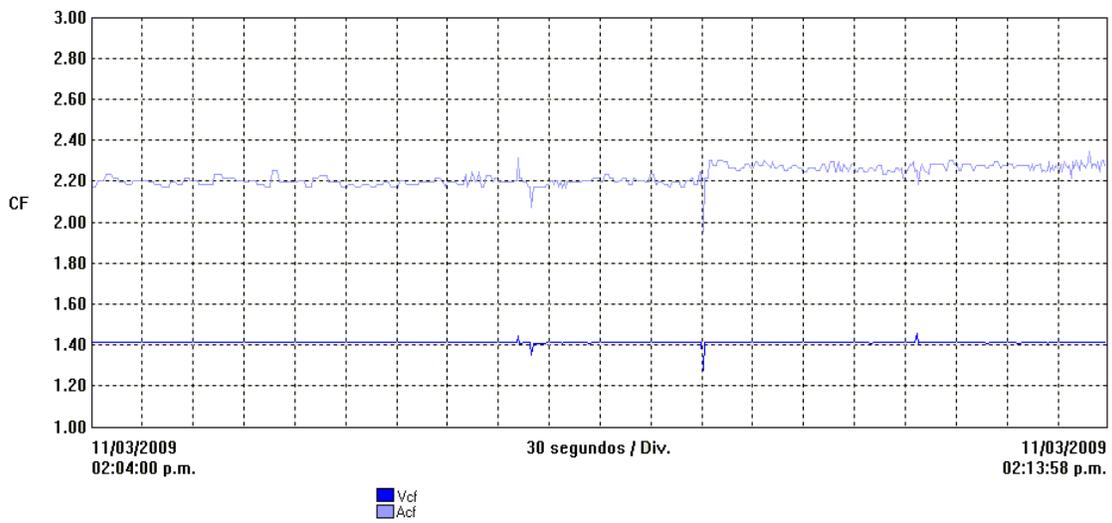
Los siguientes tres registros corresponden al comportamiento del factor de cresta de las tres líneas. Se observa que este factor presenta variaciones en las formas de onda de corrientes de línea, mientras que en las ondas de voltaje se mantiene relativamente estable, con alteraciones poco significativas.



**Figura 3.31** *Comportamiento del factor de cresta de la línea 1.*



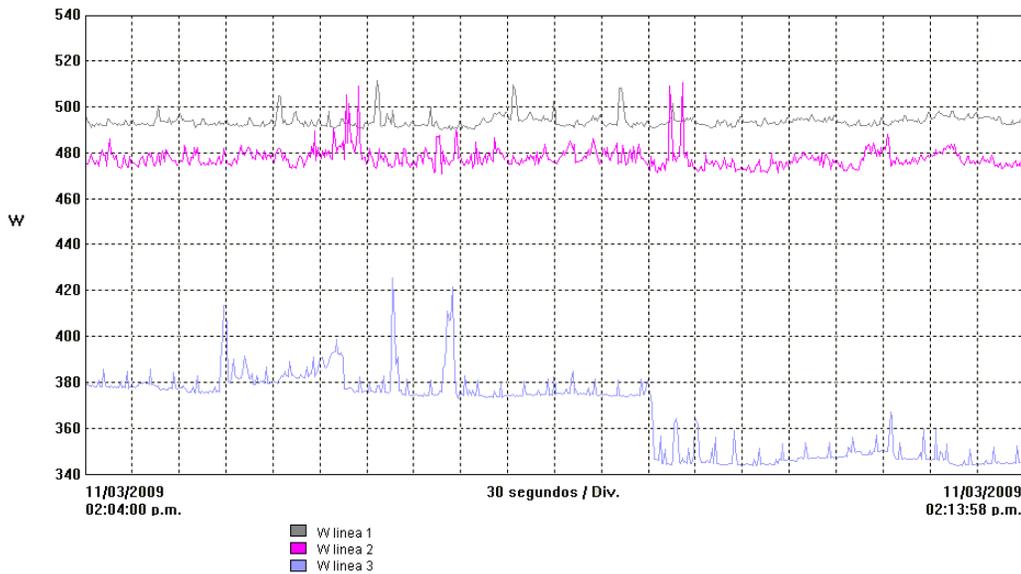
**Figura 3.32** Comportamiento del factor de cresta de la línea 2.



**Figura 3.33** Comportamiento del factor de cresta de la línea 3.

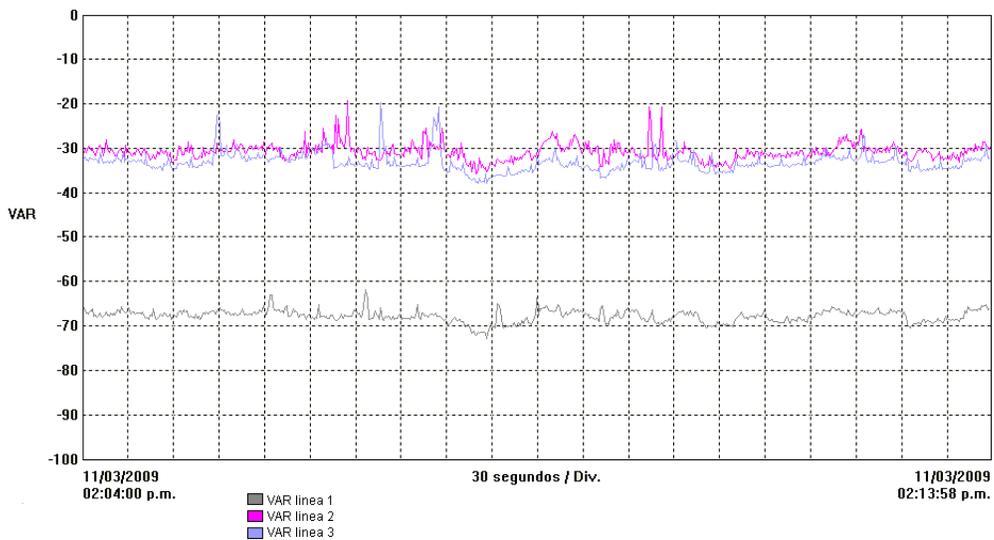
Los siguientes registros corresponden a las diferentes potencias (real, reactiva y aparente) y al comportamiento del factor de potencia del sistema.

- Comportamiento de la potencia real



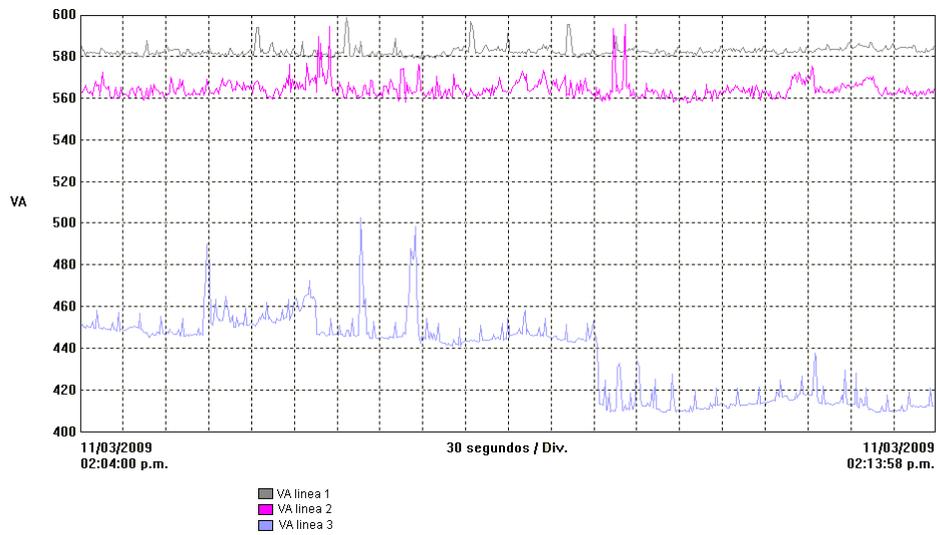
**Figura 3.34** Comportamiento de la potencia real.

- Comportamiento de la potencia reactiva



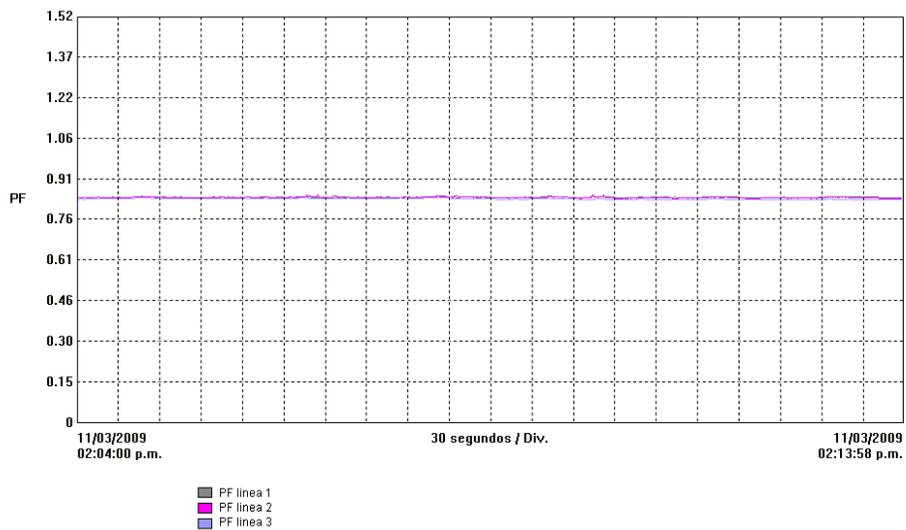
**Figura 3.35.** Comportamiento de la potencia reactiva.

## Comportamiento de la potencia aparente



**Figura 3.36.** *Comportamiento de la potencia aparente.*

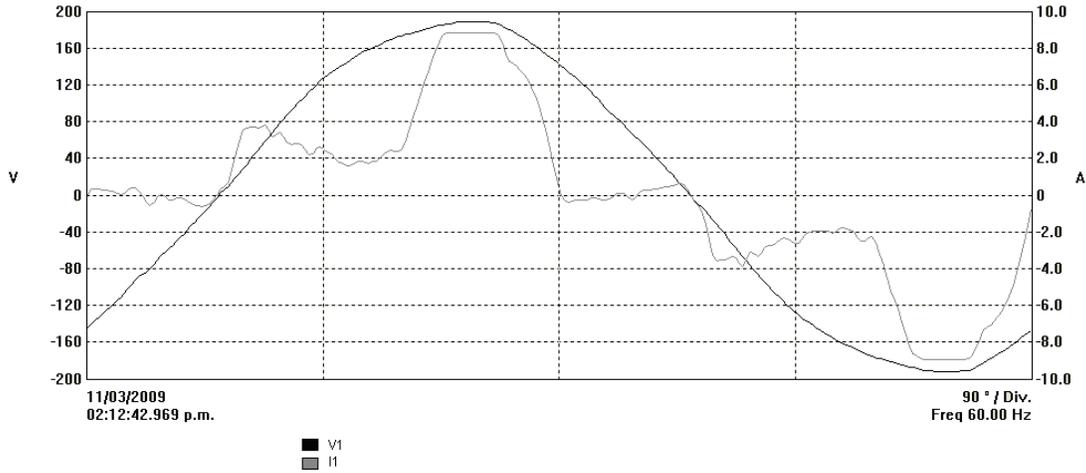
- Comportamiento del factor de potencia



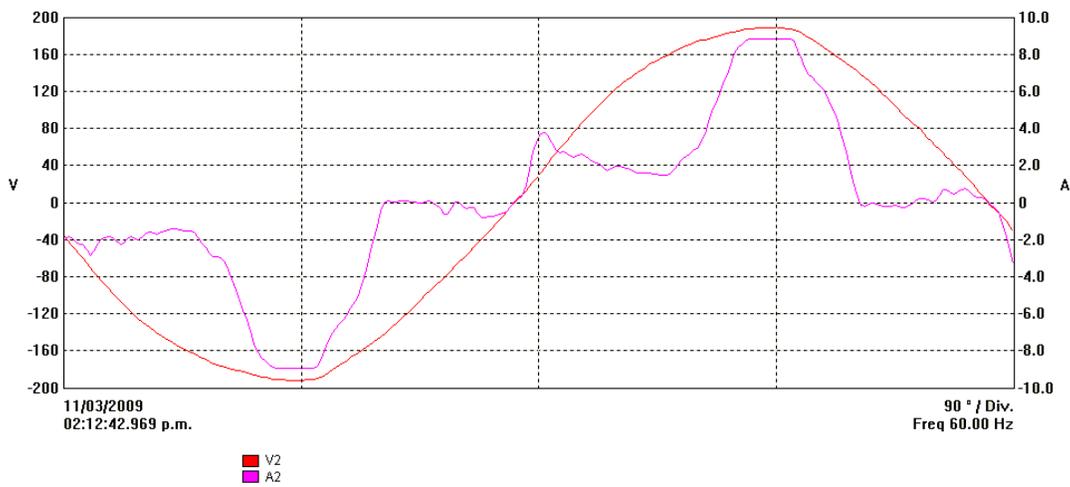
**Figura 3.37.** *Comportamiento del factor de potencia.*

Para la obtención de las siguientes formas de onda se utilizaron las mediciones instantáneas que ofrece en Analizador de Calidad de Energía. Se observan las importantes distorsiones en las ondas de corriente en las tres fases.

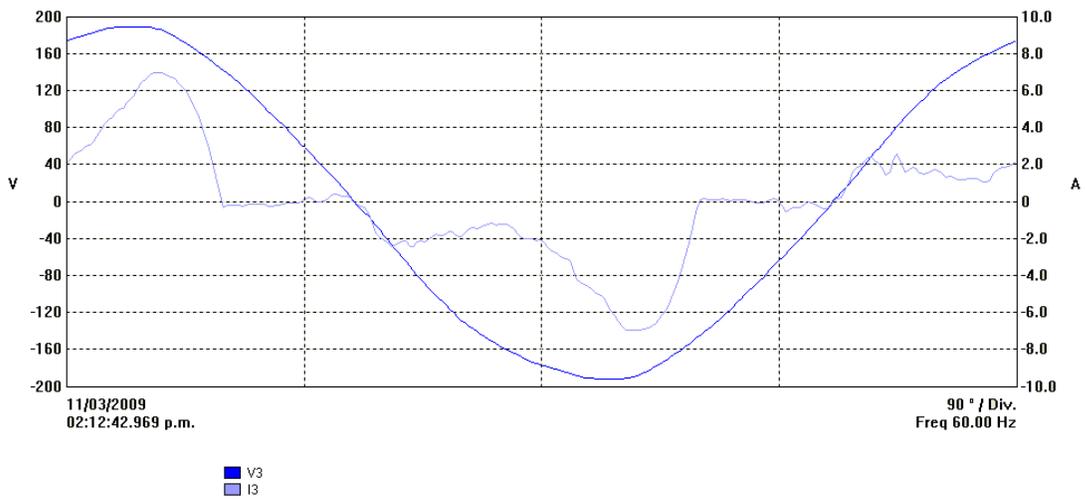
- Forma de onda de tensión y corriente por fase



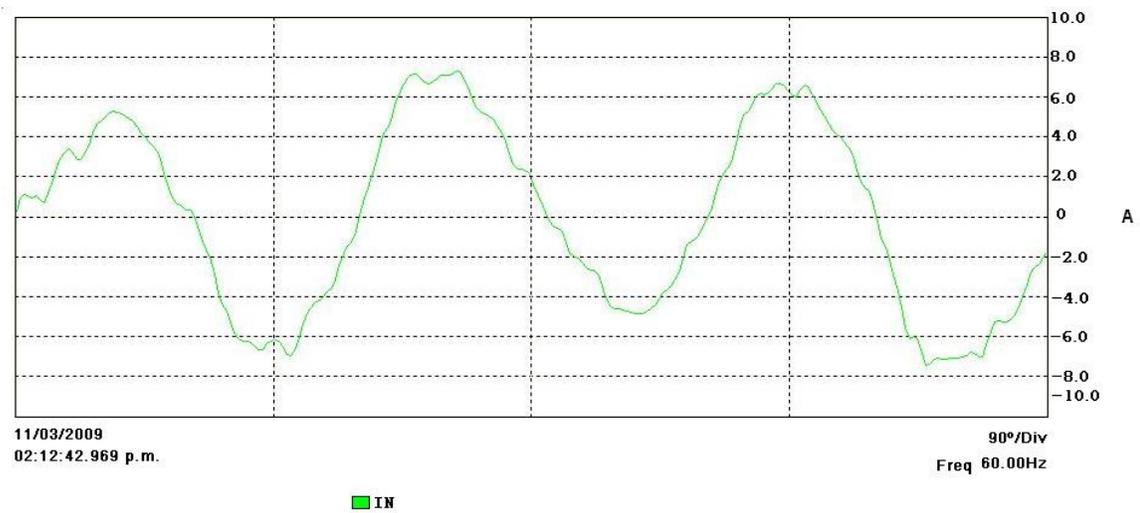
**Figura 3.38** Forma de tensión y corriente de la línea 1.



**Figura 3.39.** Forma de tensión y corriente de la línea 2.



**Figura 3.40.** Forma de tensión y corriente de la línea 3.



**Figura 3.41.** Forma de onda de la corriente del neutro.

A continuación se muestran los espectros armónicos de tensiones y corrientes por fase. Se aprecian con facilidad los altos porcentajes de THD en las ondas de corriente en cada una de las fases y sobre todo en la corriente del neutro.

- Espectro armónico en tensión y corriente por fase

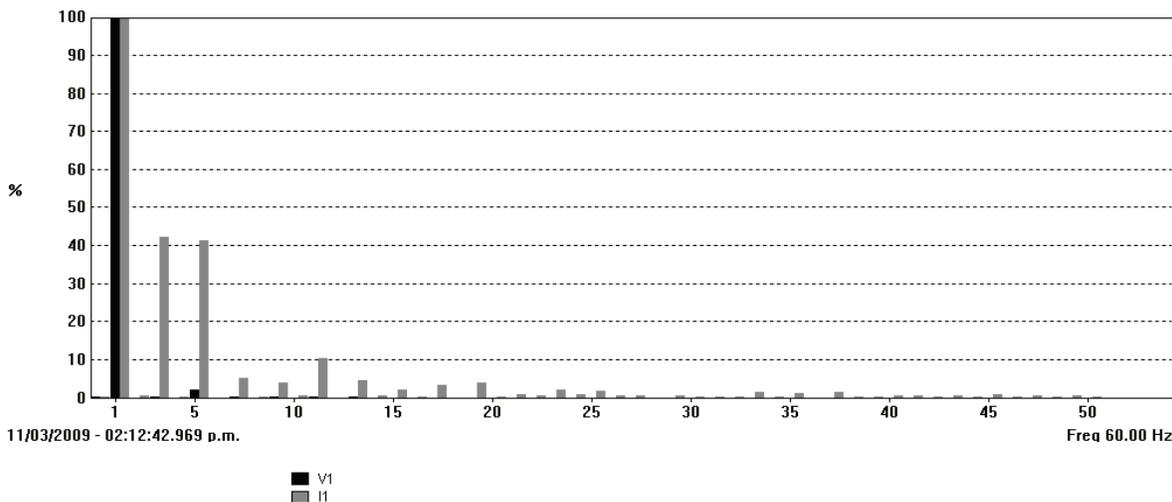


Figura 3.42. Espectro armónico en tensión y corriente en la línea 1.

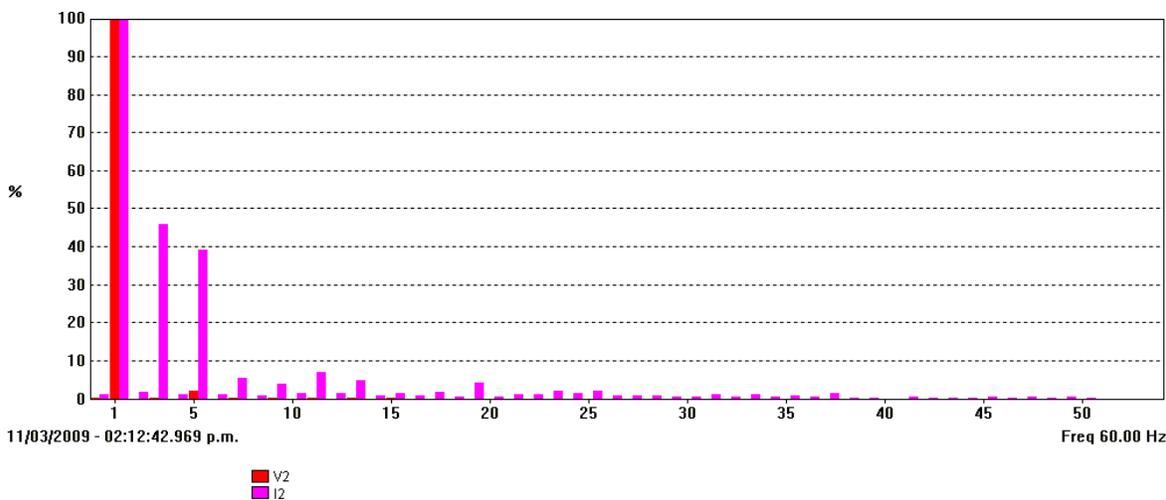


Figura 3.43. Espectro armónico en tensión y corriente en la línea 2.

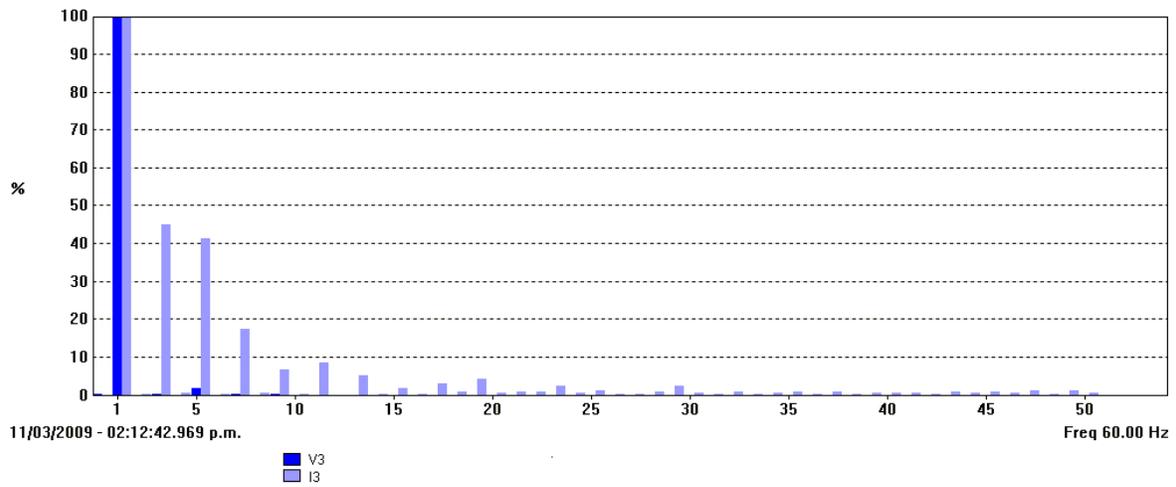


Figura 3.44. Espectro armónico en tensión y corriente en la línea 3.

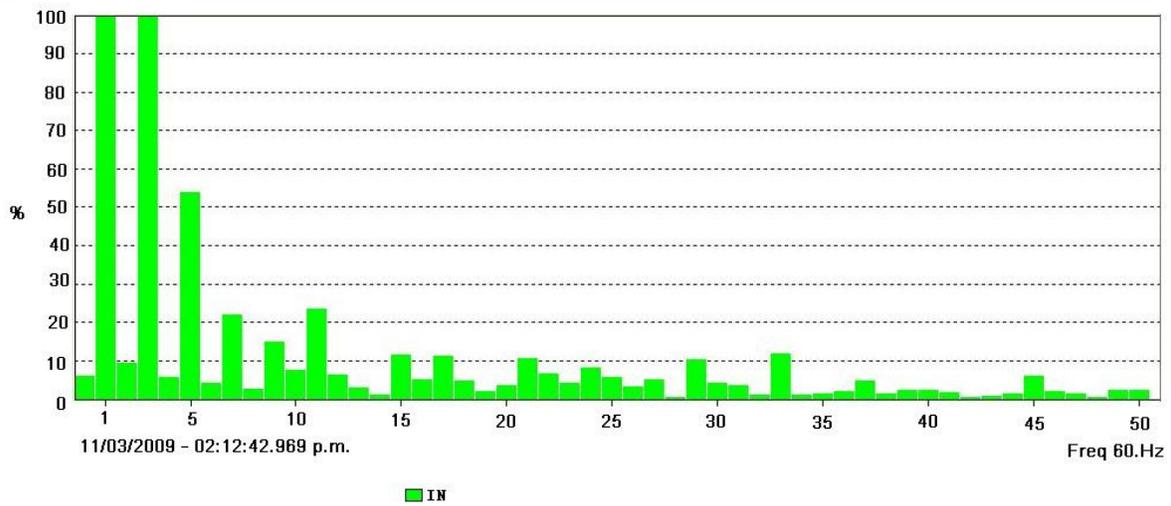


Figura 3.45. Espectro armónico en la corriente del neutro.

Las siguientes imágenes fueron extraídas directamente del Analizador de Calidad de la Energía, donde se muestran las tablas de valores máximos y mínimos de las magnitudes de corrientes y tensiones. En la imagen 3.47 se observa una tabla con las mediciones de las diferentes potencias y el factor de potencia. Estos valores presentados son instantáneos.

- Valores medidos de tensión, corriente, potencias y factor de potencia

Fase	Min RMS	Max RMS
V1	0.000	135.500
V2	0.000	135.000
V3	0.000	135.200
I1	0.000	5.000
I2	0.000	4.800
I3	0.000	4.400
U1	0.000	243.600
U2	0.000	234.400
U3	0.000	234.500

Fase	Pico+ Este Ciclo	Pico- Este Ciclo
V1	189.900	-190.900
V2	190.200	-191.000
V3	190.300	-191.000
I1	8.800	-8.800
I2	8.800	-8.800
I3	7.000	-6.900
U1	330.500	-330.100
U2	329.000	-329.000
U3	331.100	-331.200

11/03/2009

02:12:42.969 p.m.

Freq 60.00 Hz

11/03/2009

02:12:42.986 p.m.

Figura 3.46. Medición de corrientes y tensiones.

Fase	W	VAR	VA	PF	DPF	Tan
V1	494.548	-66.921	584.141	0.847	0.991	-0.136
V2	475.975	-30.989	563.306	0.845	0.997	-0.065
V3	346.918	-33.081	413.475	0.839	0.995	-0.096
Sum	1317.441	-130.992	1560.921	0.843	0.994	-0.099

11/03/2009  
02:12:42.969 p.m.

Freq 60.00 Hz

Figura 3.47. Mediciones de potencias y factor de potencia.

ii. Mediciones de un grupo de trece PC activadas a través de siete UPS y dos aires acondicionados

Los siguientes registros se obtuvieron al conectar el Analizador de Calidad de Energía Eléctrica al Tablero de Distribución del Laboratorio 3 de Electrotecnia, durante diez minutos; se utilizaron como cargas activas 13 PC conectadas a través de 7 UPS y 2 sistemas de aire acondicionado bifásico, como se muestra en el diagrama a bloques de la figura 3.7. Se muestran los comportamientos de tensiones y corrientes por fase y el comportamiento de la corriente del neutro.

▪ Comportamiento de tensión y corriente por fase

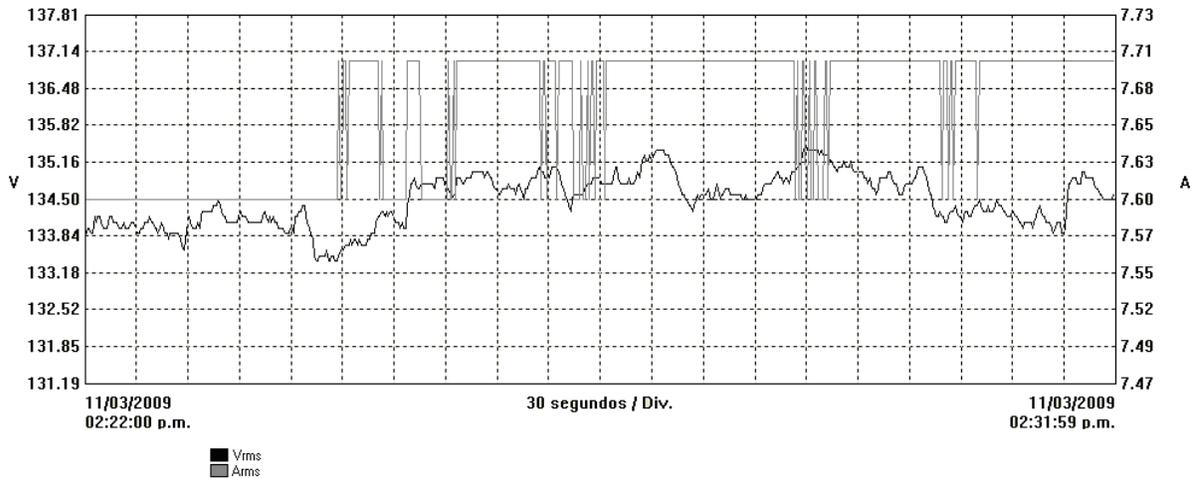


Figura 3.48. Comportamiento de tensión y corriente de la línea 1.

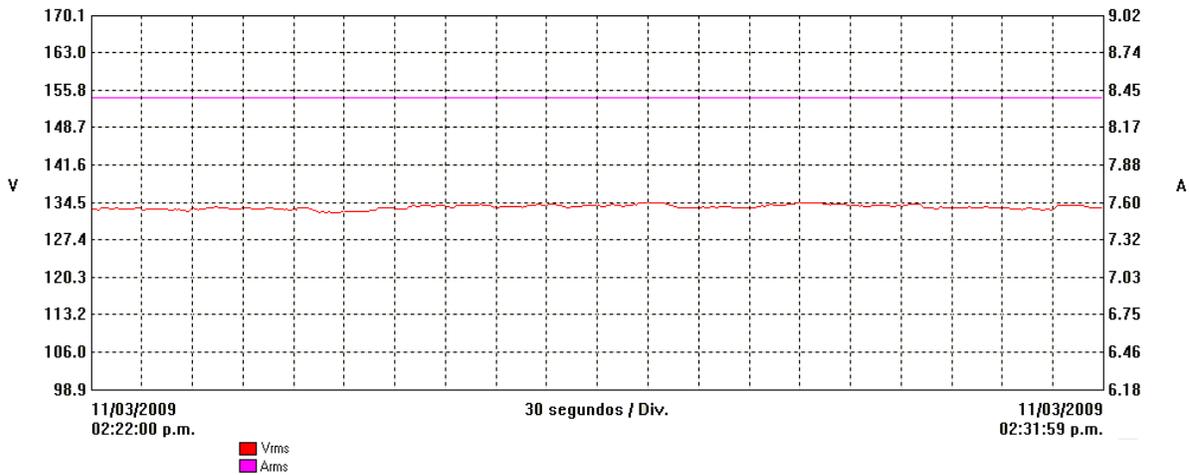


Figura 3.49. Comportamiento de tensión y corriente de la línea 2.

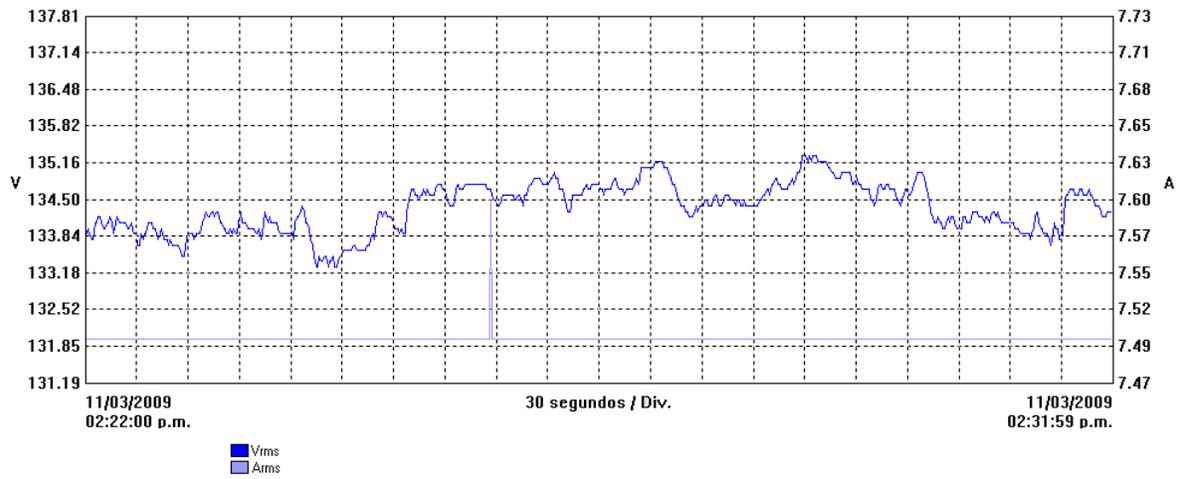


Figura 3.50. Comportamiento de tensión y corriente de la línea 3.

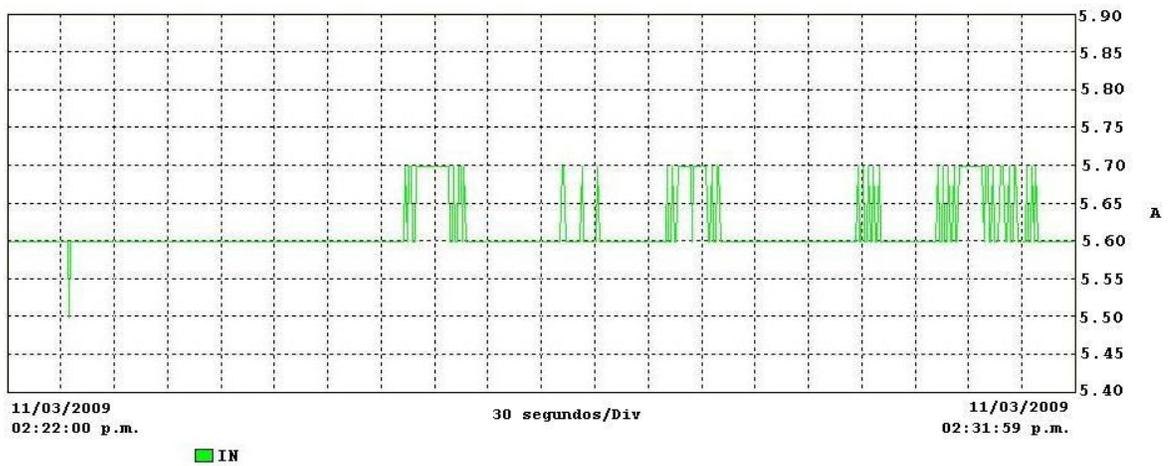
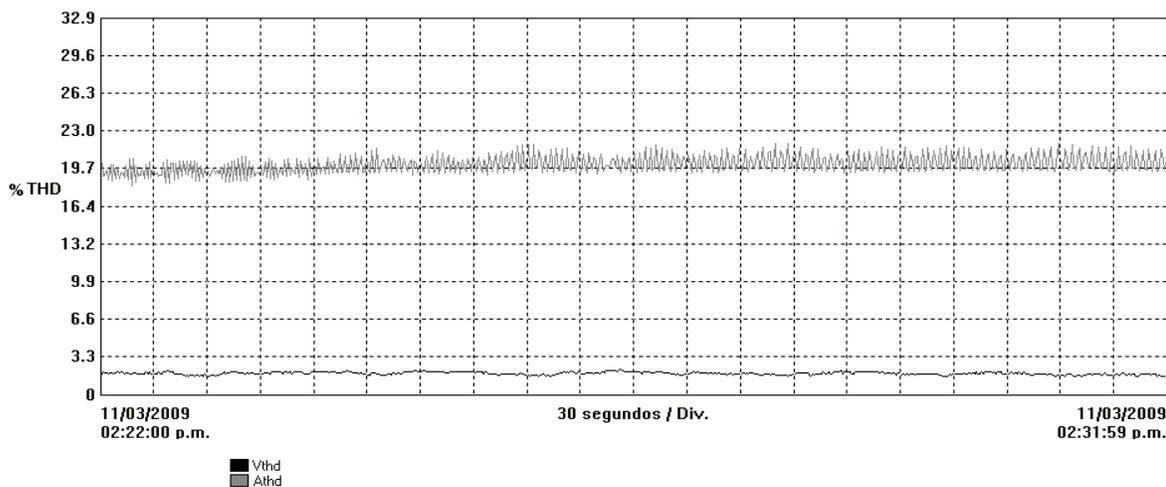


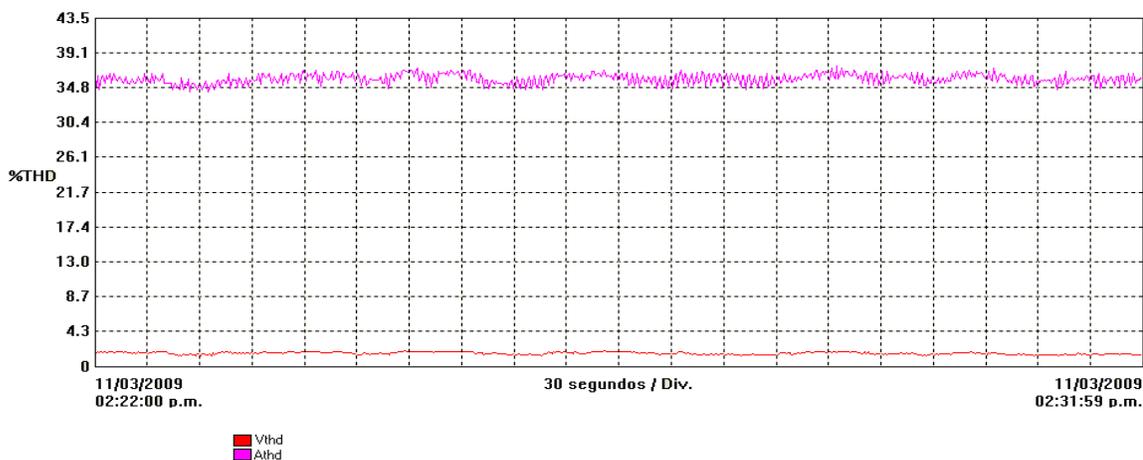
Figura 3.51. Comportamiento de la corriente del neutro.

Los próximos tres registros se obtuvieron del comportamiento de la distorsión armónica por fase. Se aprecian claramente las irregularidades en el comportamiento de esta distorsión en las ondas de corriente y de tensión, aunque la mayor se presenta en las ondas de corriente.

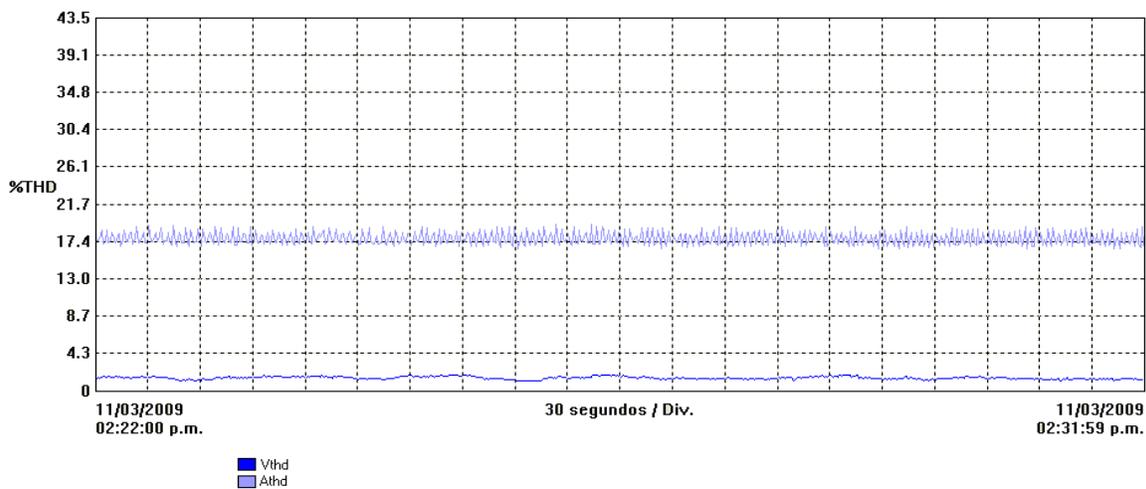
▪ Comportamiento de la distorsión armónica por fase



**Figura 3.52.** *Comportamiento de la distorsión armónica en la línea 1.*



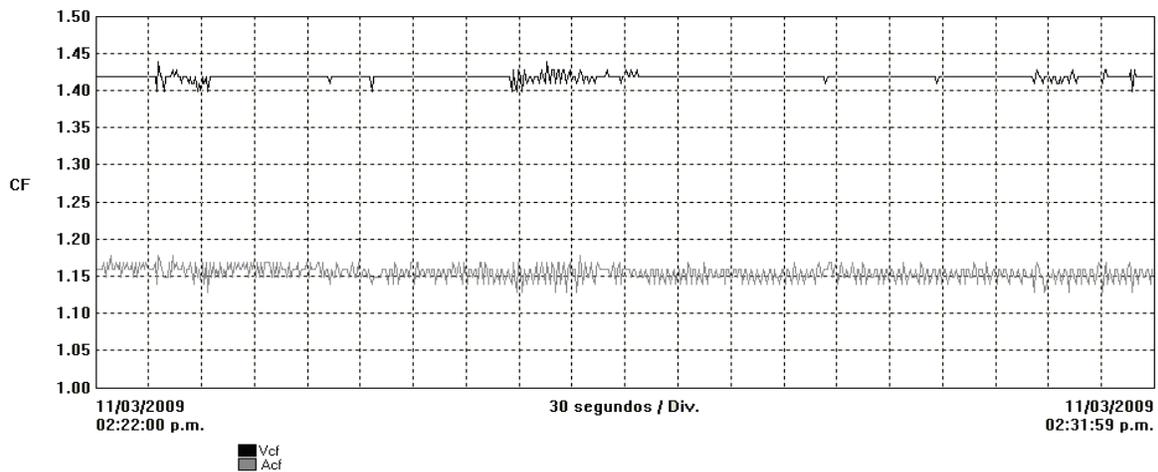
**Figura 3.53** *Comportamiento de la distorsión armónica en la línea 2.*



**Figura 3.54.** *Comportamiento de la distorsión armónica en la línea 3.*

Los próximos tres registros corresponden al comportamiento del factor de cresta de las tres líneas del sistema. De igual manera se aprecian las mediciones poco constantes en este factor en las mediciones de las ondas de corriente.

- Comportamiento del factor de cresta por fases.



**Figura 3.55.** *Comportamiento del factor de cresta en la línea 1.*

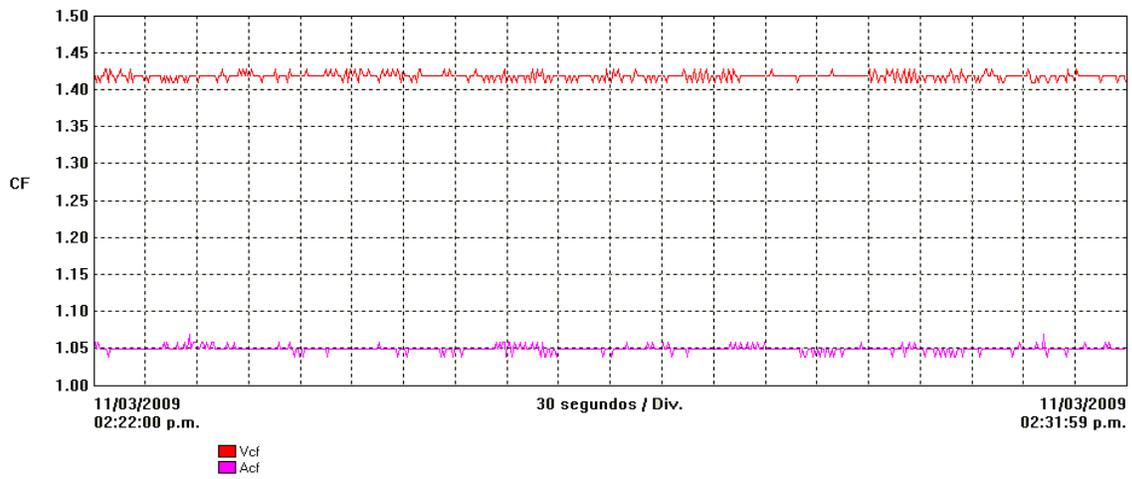


Figura 3.56. Comportamiento del factor de cresta en la línea 2.

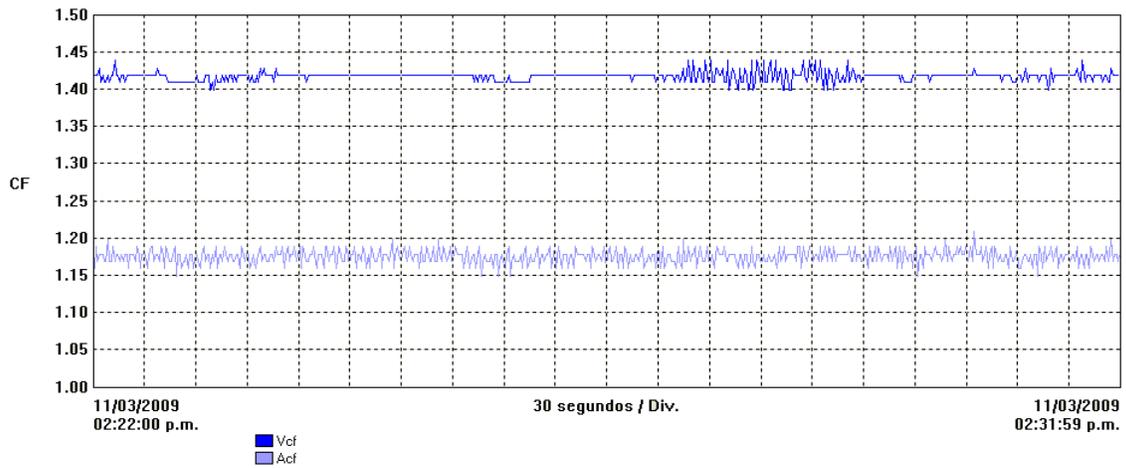
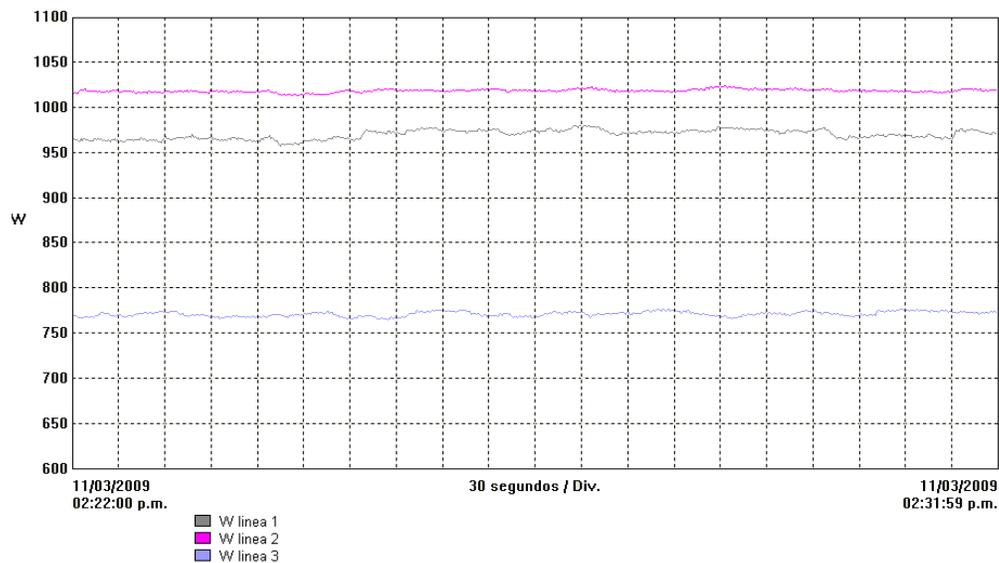


Figura 3.57. Comportamiento del factor de cresta en la línea 3.

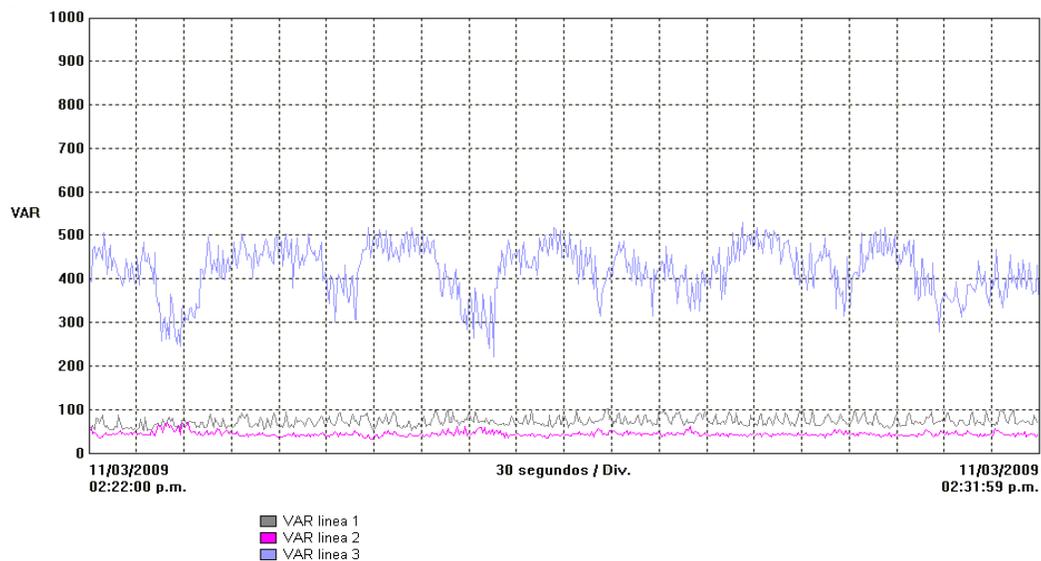
Los registros presentados a continuación corresponden al comportamiento de las potencias (real, reactiva y aparente) de las tres líneas y al factor de potencia del sistema.

▪ Comportamiento de la potencia real



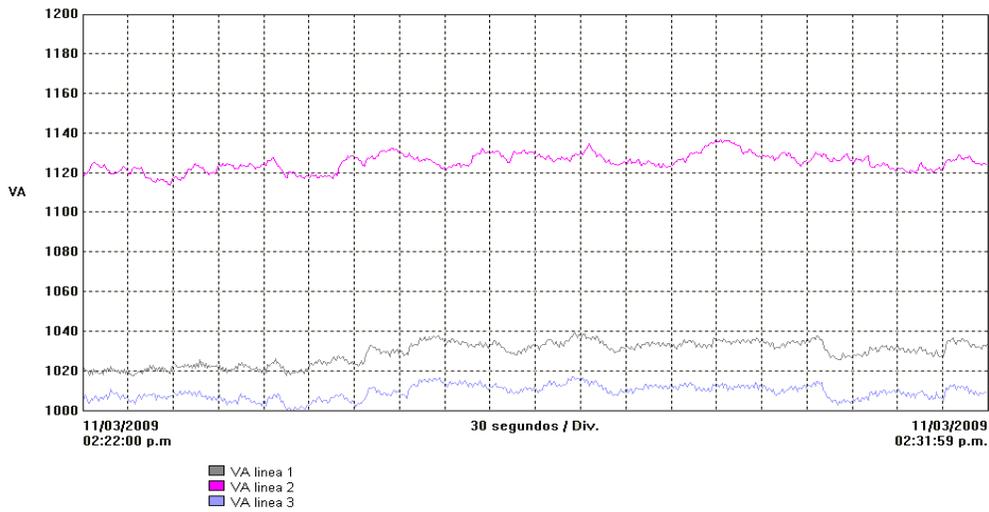
**Figura 3.58.** *Comportamiento de la potencia real.*

▪ Comportamiento de la potencia reactiva



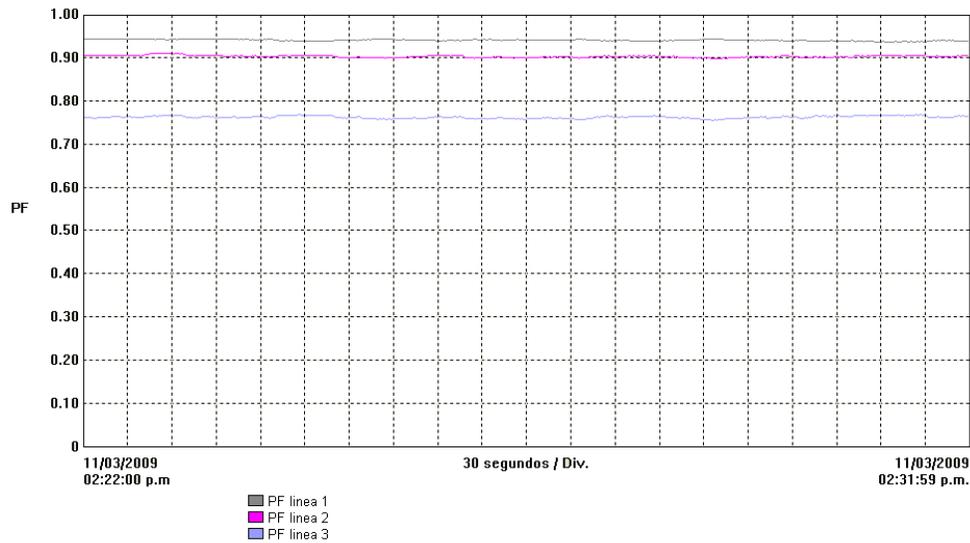
**Figura 3.59.** *Comportamiento de la potencia reactiva.*

▪ Comportamiento de la potencia aparente



**Figura 3.60.** *Comportamiento de la potencia aparente.*

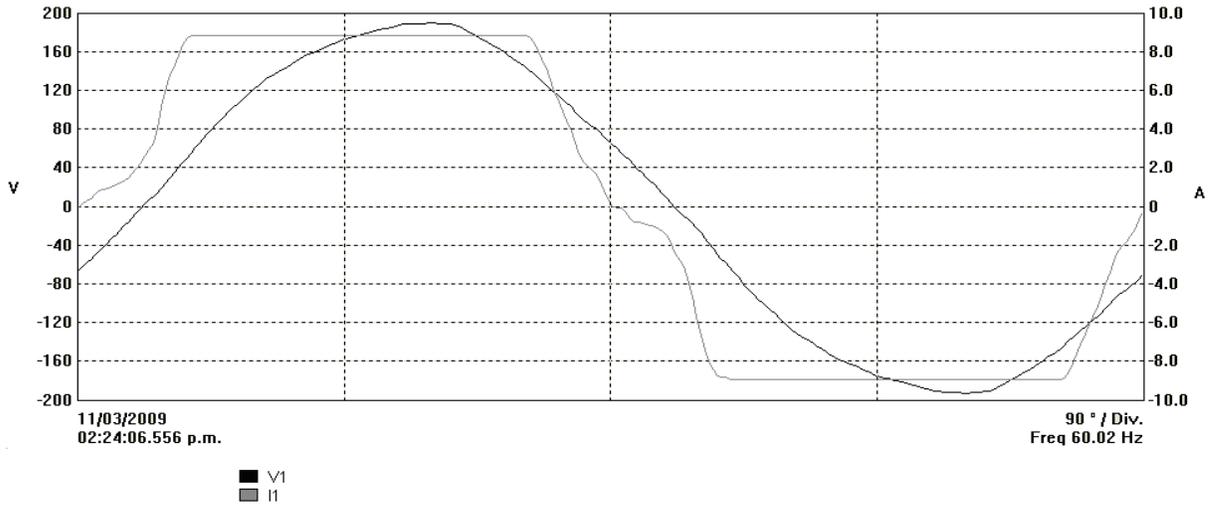
▪ Comportamiento del factor de potencia



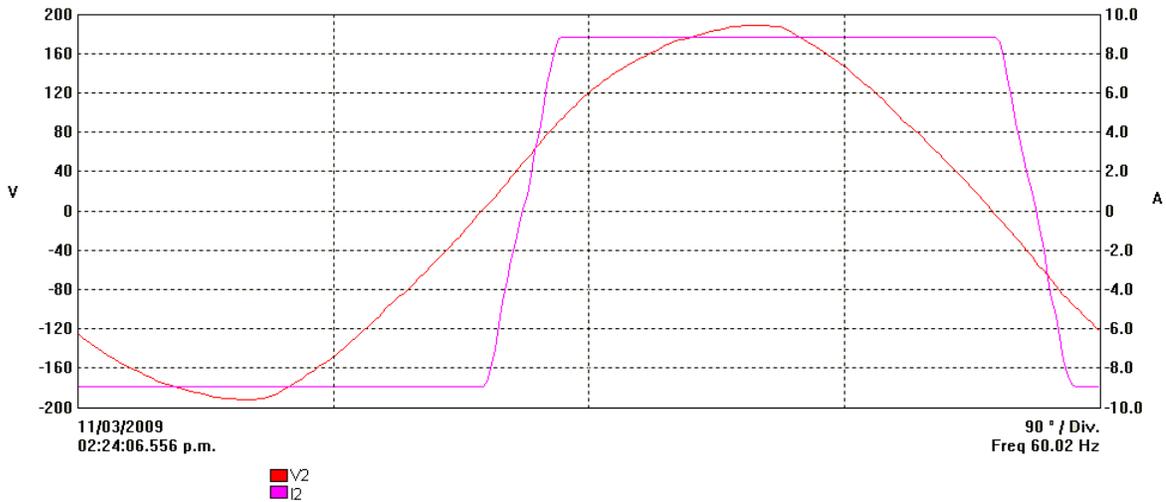
**Figura 3.61.** *Comportamiento del factor de potencia.*

En las mediciones instantáneas presentadas a continuación, se aprecia la importante distorsión armónica que existe en las formas de onda de la corriente, sobre todo en la corriente del neutro. Estas fueron obtenidas directamente del Analizador de Calidad de la Energía.

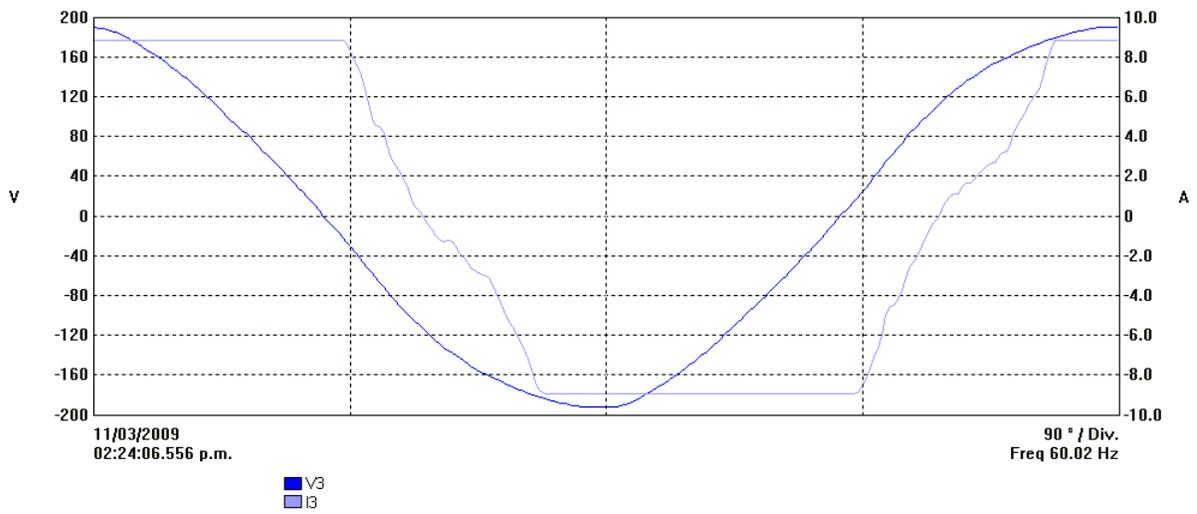
▪ Forma de onda de tensión y corriente por fase



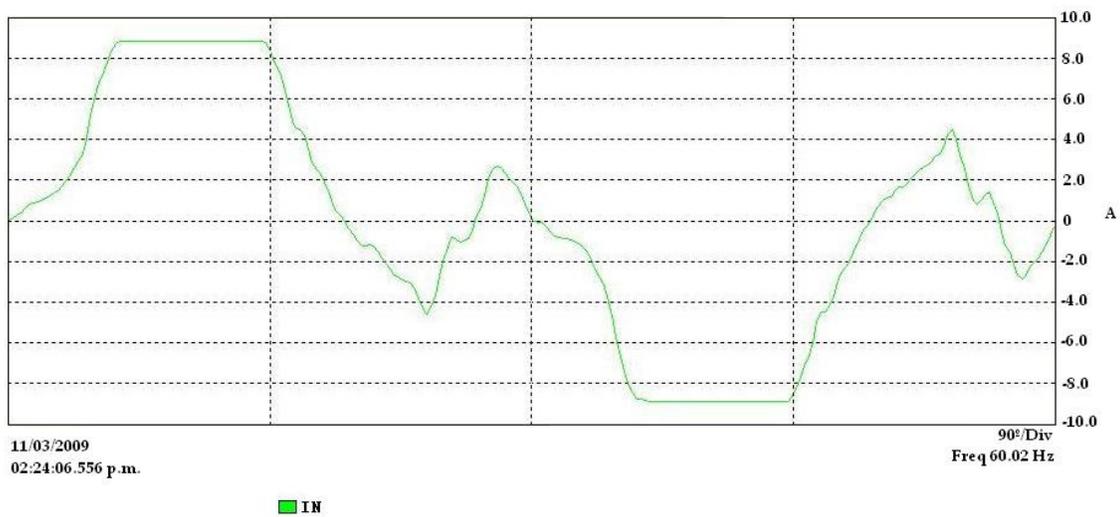
**Figura 3.62.** Forma de onda de tensión y corriente en la línea 1.



**Figura 3.63.** Forma de onda de tensión y corriente en la línea 2.



**Figura 3.64.** Forma de onda de tensión y corriente en la línea 3.



**Figura 3.65.** Forma de onda de corriente en el neutro.

Las gráficas siguientes muestran el espectro armónico de la tensión y corriente de cada fase, se observan los altos porcentajes de THD en las mediciones de corrientes, sobre todo en el neutro, donde se concentran.

- Espectro armónico en tensión y corriente por fase

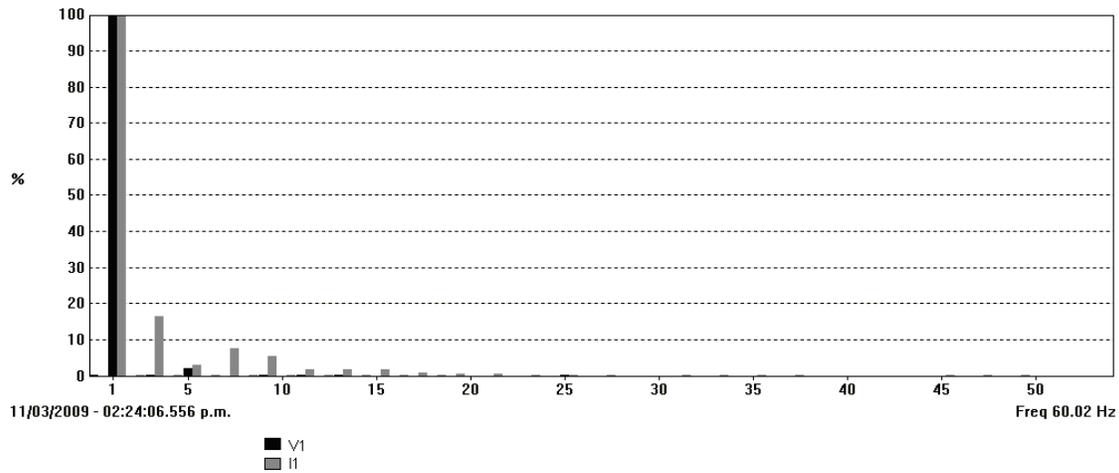


Figura 3.66. Espectro armónico en tensión y corriente de la línea 1.

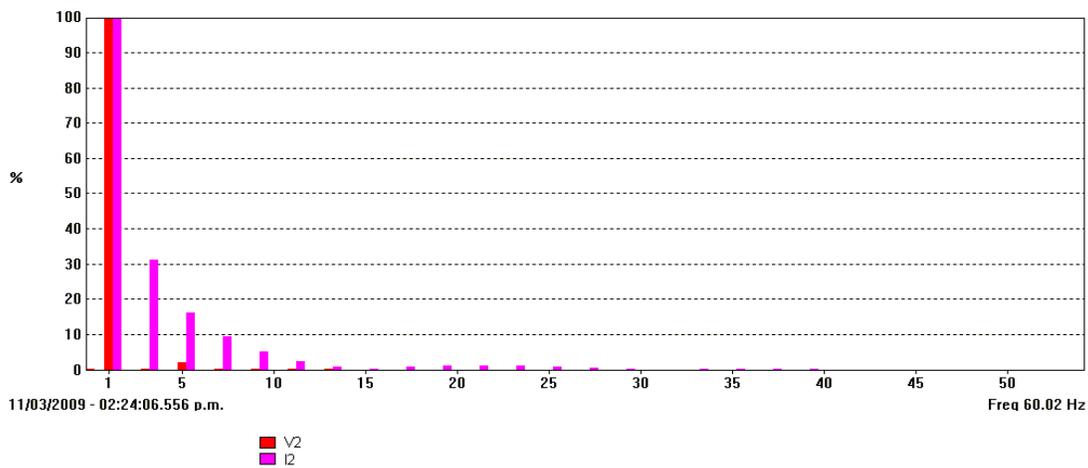


Figura 3.67. Espectro armónico en tensión y corriente de la línea 2.

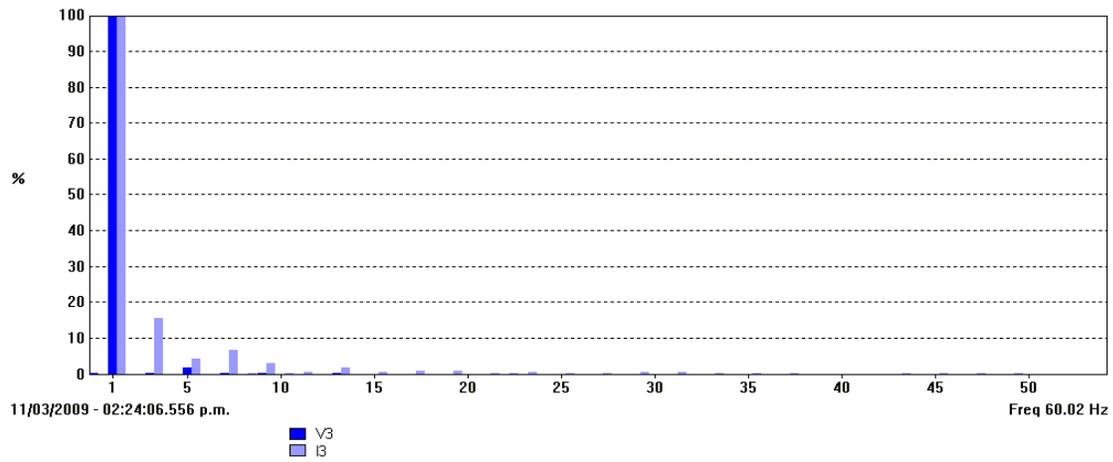


Figura 3.68. Espectro armónico en tensión y corriente de la línea 3.

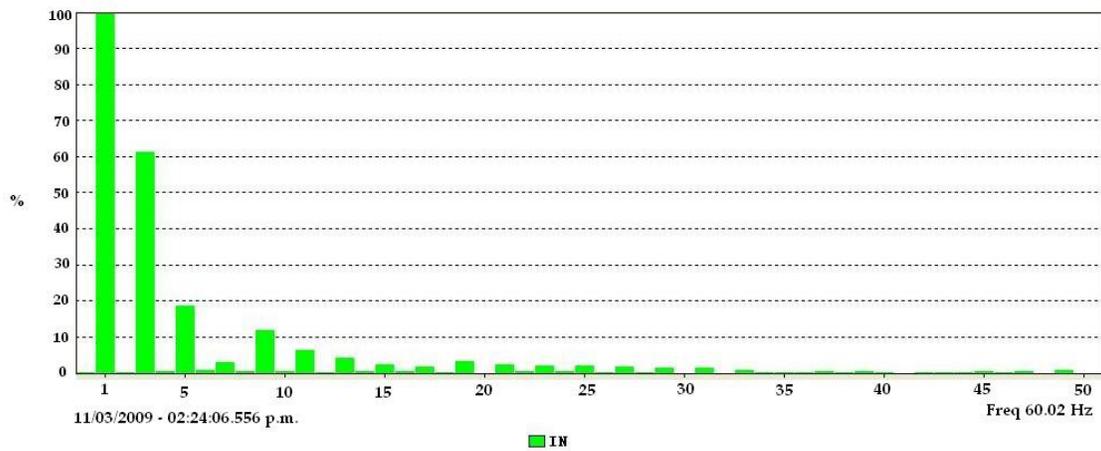


Figura 3.69. Espectro armónico en la corriente del neutro.

Las siguientes imágenes fueron extraídas directamente del Analizador de Calidad de la Energía, donde se muestran las tablas de valores máximos y mínimos de las magnitudes de corrientes y tensiones. En la imagen 3.71 se observa una tabla con las mediciones de las diferentes potencias y el factor de potencia. De igual forma que en el caso anterior, estos valores presentados son instantáneos.

- Valores medidos de tensión, corriente, potencias y factor de potencia

Fase	Min RMS	Max RMS
V1	0.000	135.500
V2	0.000	135.600
V3	0.000	135.400
I1	0.000	8.600
I2	0.000	8.700
I3	0.000	8.600
U1	0.000	243.600
U2	0.000	234.400
U3	0.000	235.200

Fase	Pico+ Este Ciclo	Pico- Este Ciclo
V1	190.500	-191.600
V2	190.000	-190.900
V3	190.400	-191.400
I1	8.800	-8.800
I2	8.800	-8.800
I3	8.800	-8.800
U1	330.100	-329.800
U2	328.300	-328.300
U3	330.900	-331.200

11/03/2009	11/03/2009
02:24:06.556 p.m.	02:24:06.573 p.m.
Freq 60.02 Hz	

**Figura 3.70.** *Medición de corriente y tensiones*

Fase	W	VAR	VA	PF	DPF	Tan
V1	967.996	61.644	1024.062	0.945	0.971	0.213
V2	1020.544	44.521	1128.026	0.905	0.468	1.638
V3	769.635	462.379	1008.470	0.763	0.636	0.948
Sum	2758.175	568.545	3160.557	0.871	0.691	0.933

11/03/2009	11/03/2009
02:24:06.556 p.m.	02:24:06.573 p.m.
Freq 60.02 Hz	

**Figura 3.71.** *Medición de potencias y factor de potencia.*

### **3.2.6. Análisis de los datos e inferencias.**

Este paso del proceso se refiere a la elaboración del análisis de datos e inferencias, los cuales se obtienen al comparar los conceptos básicos y normas estándares indicados en el capítulo 1.

Las normas estándares sirvieron como punto de partida para el análisis de los datos obtenidos, ya que proporcionan referencias para la comparación de magnitudes no solo de forma cuantitativa, sino también para su análisis cualitativo. Las referencias mencionadas se enfocan en la distorsión armónica.

Se realizó un análisis de la potencia aparente (la suministrada por la compañía), de la potencia real (la consumida por el sistema) y de la potencia reactiva (la que retorna a la fuente de alimentación); lo cual nos permite observar el comportamiento eléctrico de la carga y por ende el factor de potencia, el cual se verá reflejado en el ámbito económico dentro del recibo de luz (bonificación o penalización).

Este análisis se reporta en el capítulo IV; donde, además de realizar el análisis por cargas pasivas y activas, se procede a la creación de inferencias de forma general y simplificada y a la propuesta de soluciones para la implementación de filtros y corrección de problemas de calidad.



**CAPITULO IV**  
**ANÁLISIS DE RESULTADOS**  
**E**  
**INFERENCIAS**

En este capítulo se valora el impacto producido al sistema de distribución de energía eléctrica, ocasionado por las diferentes cargas no lineales que se usan actualmente. El avance tecnológico ha transformado los diferentes equipos de uso común en la distribución de energía eléctrica residencial, comercial, pública e industrial.

En el contexto de este estudio, se indican las afectaciones producidas por las cargas pasivas y activas para planear una solución que permita la atenuación; con ello permitir una mejora en la calidad de la energía.

#### 4.1. Resultados relevantes, cargas pasivas.

Una vez que se analizaron los resultados experimentales de la respuesta eléctrica con cargas no lineales, se concluyó lo siguiente:

- En los sistemas con cargas pasivas, la magnitud de la potencia activa no varía cuando en un mismo sistema o red eléctrica se cambian los elementos reactivos. Sin embargo, al variar los elementos reactivos cambian las magnitudes tanto la potencia reactiva como la potencia aparente y, en consecuencia, cambia el defasamiento entre la tensión y la corriente, variando también el Factor de Potencia.
- Cuando se tienen únicamente cargas resistivas, la potencia activa permanece constante y cambia si cambian las magnitudes de las cargas y, en este caso no existe potencia reactiva y el defasamiento entre la corriente y la tensión es cero; es decir la tensión y la corriente están en fase,  $FP=1$ .
- Se comprueba que cuando se tienen únicamente cargas inductivas o capacitivas, el factor de potencia es muy bajo ya que el defasamiento entre la tensión y la corriente es mayor a los  $76^\circ$ . Esto demuestra que, en estos casos, existe un regreso muy importante de la energía hacia la fuente, aumentando la corriente de línea. Asimismo, se presentaron considerables derivaciones de corriente hacia el neutro. Por otro lado se observó que en el caso de cargas capacitivas, se presentó una distorsión armónica de la señal de corriente “alta”, mayor a 10%, superior al tipificado por la especificación CFEL-000045, que establece como límite el 5% de distorsión para la corriente.
- En la combinación de cargas RL, RC y RLC, en los experimentos se observan los efectos opuestos que presentan las cargas inductivas y capacitivas. el efecto opuesto permite corregir el defasamiento entre la corriente y la tensión y trae como consecuencia menor regreso de potencia de la carga hacia la fuente, mitigando pérdidas por efecto Joule en las líneas de alimentación. Sin embargo la respuesta espectral presenta otros indicadores relevantes como son: la distorsión armónica (THD), Factor de Cresta (FC), eficiencia ( $\eta$ ) y el por ciento de regulación.
- La THD en los sistemas con cargas RC aumenta de manera considerable, mayor a 10%. Este último valor de THD se mantiene para cargas RLC. Esto nos lleva a considerar que cuando se pretende corregir el FP con capacitores estáticos, se puede corregir dicho FP pero origina un inconveniente, que si no se controla, resulta más perjudicial que un bajo FP, este inconveniente es la alta THD que produce el capacitor por la capacidad que tiene de almacenar energía y tratar de descargarla.
- Dada la consideración anterior se recomienda sobreponer filtros que eliminen las componentes armónicas indeseables que provocan los capacitores estáticos.
- Por lo que respecta a la eficiencia se observó que, esta está relacionada con el FP; es decir, cuando el sistema opera con un FP bajo se tiene baja eficiencia y cuando el sistema opera

con un alto FP se tiene una eficiencia alta. En términos de calidad la eficiencia se refiere a la operación “adecuada” del sistema eléctrico.

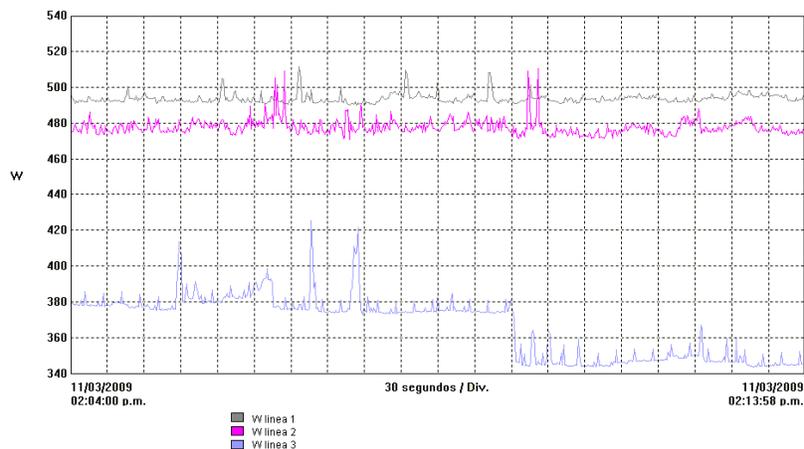
## 4.2. Resultados relevantes, cargas no lineales

Se analiza los resultados de registros y graficas tomadas de los sistemas bajo prueba de cargas no lineales.

### 4.2.1. Respuesta eléctrica con un sistema trifásico que alimenta 13 pc por medio de 7 ups

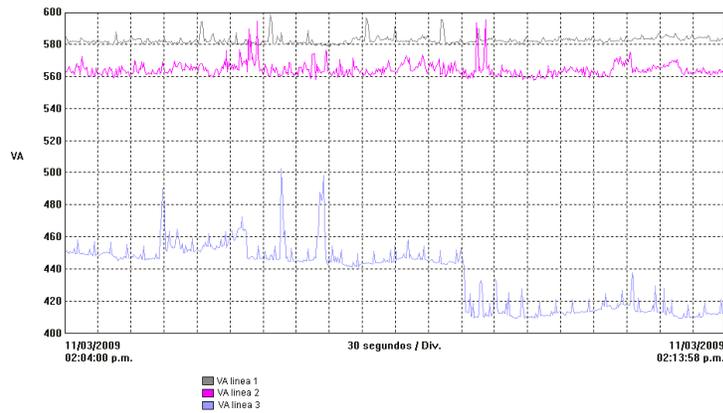
Las 13 pc activadas requieren para su operación aproximadamente un promedio de 1317,441 watts; se conectaron de manera distribuida a un sistema trifásico, demandaron por fase, en promedio 439,147 watts. Al realizar el registro para evaluar el comportamiento de las potencias se pudo observar lo siguiente:

En un periodo aproximado de 10 minutos la potencia real manifestó, en cada una de sus fases variaciones instantáneas de aproximadamente 100 watts demostrando con ello la operación inestable del sistema, figura 4.1.

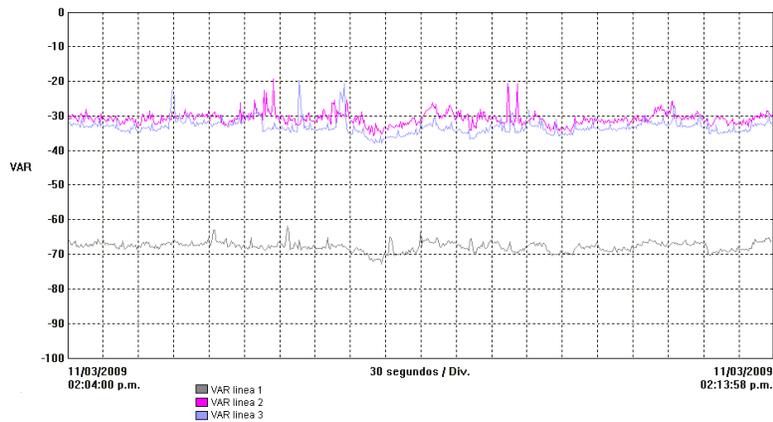


**Figura 4. 1.** *Comportamiento de la potencia real*

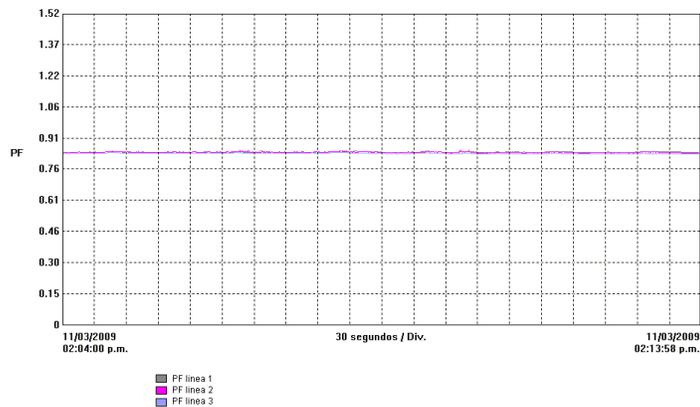
En el mismo período, se registraron las potencias reactiva y aparente, observándose también variaciones instantáneas que oscilan de entre 0 y 100 VA para el caso de la potencia aparente y de aproximadamente 15 VAR para el caso de la potencia reactiva, figuras 4.2. y 4.3. Este comportamiento se refleja en el registro del factor de potencia, el cual en promedio es de 0,842, figura 4.4.



**Figura 4. 2.** *Comportamiento de la potencia aparente*



**Figura 4. 3.** *Comportamiento de la potencia reactiva*



**Figura 4. 4.** *Comportamiento del factor de potencia*

De lo anterior se infiere que los sistemas eléctricos que alimentan sistemas de cómputo sufren alteraciones en el comportamiento de la potencia, reflejándose en un factor de potencia bajo (CFE L0000-45). Este sistema de cargas activas originan distorsiones importantes en la tensión y la corriente provocando dicho comportamiento.

Al realizar los registros de tensión y corriente por fase primero se observan distorsiones de tensión que oscilan entre 0 y 44% en la tercera y quinta armónica en cada una de las fases y diferencias significativas en las armónicas 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup> y 11<sup>a</sup>. los registros de tensión y corriente indican que la fase 1 y 3 tienen variaciones de tensión de alrededor de 2 V y la fase 2 prácticamente sin variación. Esta diferencia de comportamiento entre fases de la tensión se debe a que se tiene un sistema desbalanceado de cargas y las variaciones de tensión se deben a las distorsiones que provocan las pc (cargas activas). En la respuesta se observa que la distorsión en corriente es mayor a la distorsión en la tensión ya que la corriente es de alrededor del 35% y en la tensión del 20%.

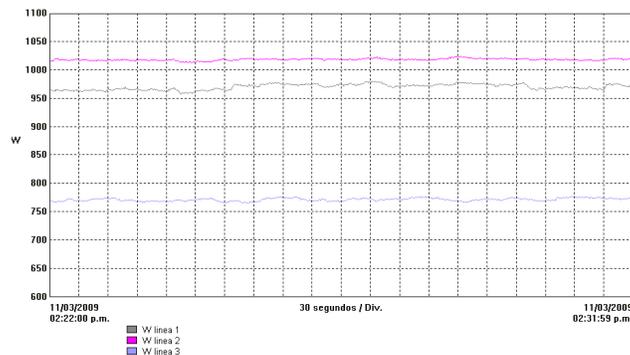
Con este experimento se demuestra que la distorsión armónica de tensión y corriente originó un aumento en la corriente del neutro.

Con esta prueba se infiere que, cuando se tienen cargas activas provocan altos niveles de distorsión dando lugar a la inestabilidad del sistema, a una reducción en el factor de potencia y a elevadas magnitudes de la corriente del neutro, corriente que se regresa al transformador de distribución y que origina en el mismo sobrecalentamiento, lo que acorta su vida útil de los equipos que están bajo estos efectos armónicos.

#### 4.2.2. Respuesta eléctrica con un sistema trifásico que alimenta 13 pc por medio de 7 ups y 2 sistemas de aire acondicionado bifásicos

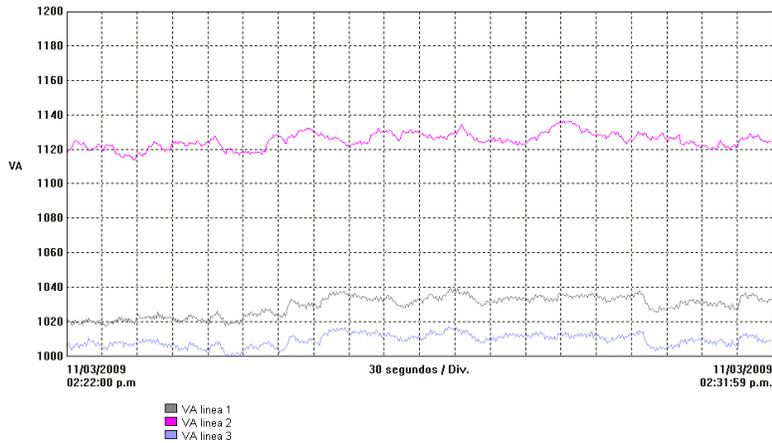
Este segundo sistema bajo prueba sus graficas y registros de las 13 pc y los dos aires acondicionados activados permite observar que requieren para su operación un promedio de 2758,175 watts. Se conectaron de manera distribuida a un sistema trifásico las cuales demandaron, por fase, en promedio 919,3917 watts. Al realizar el registro para ver el comportamiento de las potencias se pudo observar lo siguiente:

En un periodo aproximado de 10 minutos la potencia real manifestó, en cada una de sus fases variaciones instantáneas de aproximadamente 50 watts demostrando con ello la operación inestable del sistema, figura 4.5.

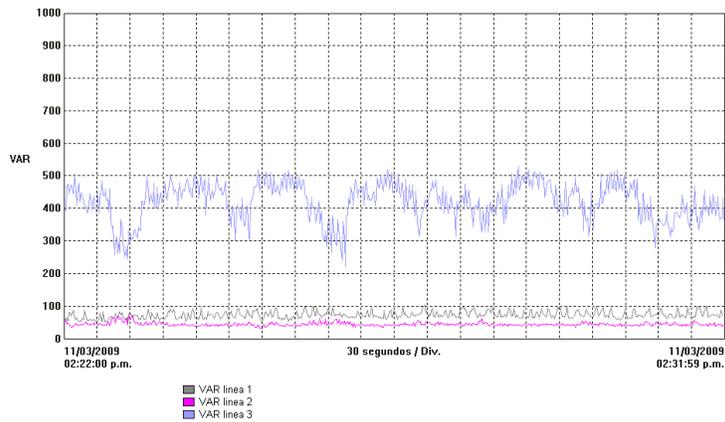


**Figura 4.5.** *Comportamiento de la potencia real*

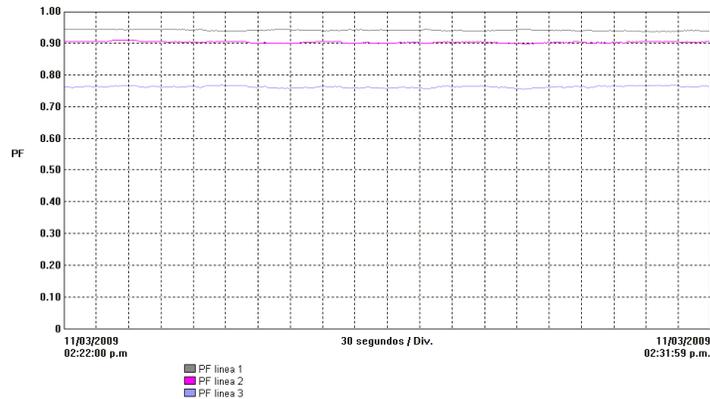
En el mismo período, se registraron las potencias reactiva y aparente, observándose también variaciones instantáneas que oscilan de entre 0 y 20 VA para el caso de la potencia aparente 100 VAR aproximados para el caso de la potencia reactiva, figuras 4.6 y 4.7. Este comportamiento se refleja en el registro del factor de potencia, mismo que en promedio es de 0,871, figura 4.8.



**Figura 4. 6.** *Comportamiento de la potencia aparente*



**Figura 4. 7.** *Comportamiento de la potencia reactiva*



**Figura 4. 8.** *Comportamiento del factor de potencia*

De lo anterior se infiere que los sistemas eléctricos que alimentan sistemas de cómputo sufren alteraciones en el comportamiento de la potencia, reflejándose en un factor de potencia bajo (fuera de norma). Este sistema de cargas activas origina distorsiones importantes en la tensión y la corriente provocando dicho comportamiento.

Al realizar los registros de tensión y corriente por fase primero se observan distorsiones de tensión que oscilan entre 0 y 30% en la tercera y quinta armónica en cada una de las fases y diferencias significativas en las armónicas 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup> y 11<sup>a</sup>. Asimismo, los registros de tensión y corriente nos indican que la fase 1 y 3 tienen variaciones de tensión de alrededor de 2 V y la fase 2 prácticamente sin variación. Esta diferencia de comportamiento entre fases de la tensión se debe a que se tiene un sistema desbalanceado de cargas y las variaciones de tensión se deben a las distorsiones que provocan las pc (cargas activas). En la respuesta se observa que la distorsión en corriente es mayor a la distorsión en la tensión ya que la corriente es de alrededor del 30% y en la tensión del 15%.

Con este experimento se demostró que la distorsión armónica de tensión y corriente originó un aumento en la corriente del neutro.

Con esta prueba podemos inferir que cuando se tienen cargas activas provocan altos niveles de distorsión dando lugar a la inestabilidad del sistema, a una reducción en el factor de potencia y a elevadas magnitudes de la corriente del neutro, corriente que se regresa al transformador de distribución y que origina en el mismo sobrecalentamiento, lo que acorta su vida útil en el equipo de cómputo, los aires acondicionados como en los UPS.

### **4.3. Inferencia de los valores experimentales a la instalación eléctrica**

El promedio de la THD de todos los equipos conectados a la instalación eléctrica es del 24,667% lo que representa una distorsión alta, de acuerdo a lo permitido (CFE L0000-45). En consecuencia, entran en operación las protecciones de los circuitos derivados; se sobrecalientan los conductores y un incremento en la corriente del neutro.

### **4.4. Mitigación de armónicas.**

Existen diferentes formas de mitigar los problemas de armónicos, algunas maneras se describen a continuación

#### **4.4.1. Reducir la aportación de corrientes armónicas.**

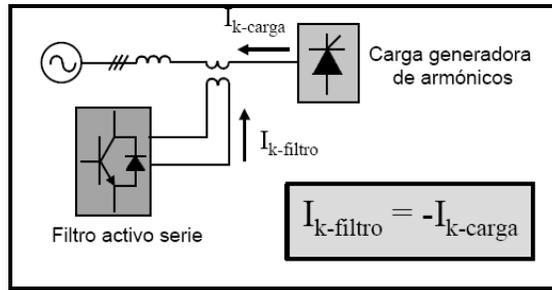
Una forma para lograr la reducción de las corrientes armónicas es reducir la aportación de las fuentes que la generan, como por ejemplo cambiar la conexión de los transformadores de modo que se atrapen las armónicas de secuencia cero, cambiar los transformadores, liberar las cargas o conectar un reactor limitador en la alimentación, entre otros.

#### **4.4.2 Filtros activos.**

Utilizan elementos semiconductores para el control. El principio de los filtros activos consiste en una fuente controlada de corriente cuyas armónicas tienen la misma magnitud y defasadas 180° de las armónicas a eliminar.

Sus características son muy flexibles (dentro de ciertos límites, se pueden adaptar a las frecuencias que deben ser filtradas). Pueden compensar corrientes o tensiones armónicas

- Tienen un mayor costo comparado a los filtros pasivos.
- Es necesario protegerlos contra sobretensiones en la red.
- Tienen necesidad de un mantenimiento especial.
- Es difícil la construcción de un filtro de grandes proporciones y con una respuesta rápida.



**Figura 4.9.** filtro activo<sup>[20]</sup>

#### 4.4.3. Filtros pasivos.

Cualquier combinación de elementos pasivos (R, L y C) diseñados para dejar pasar una serie de frecuencias se denominan un filtro; se sintoniza para una armónica en especial, o un rango determinado.

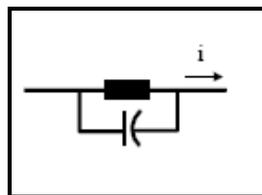
Sus características son restringidas (porque generalmente están sintonizados a una sola frecuencia).

- Tienen un menor costo comparado con los filtros activos.
- Pueden construirse utilizando condensadores de corrección del factor de potencia.
- Tienen buen rendimiento energético (pocas pérdidas), excepto en los filtros pasabanda u otros filtros complejos.
- No requieren mantenimiento especial.

#### Principales conexiones

Filtros serie (alta impedancia)

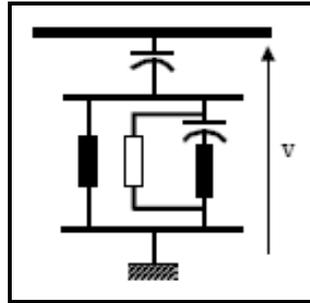
- La inductancia debe diseñarse para la corriente de carga.
- La inductancia y el condensador se deben aislar a la tensión de la red.



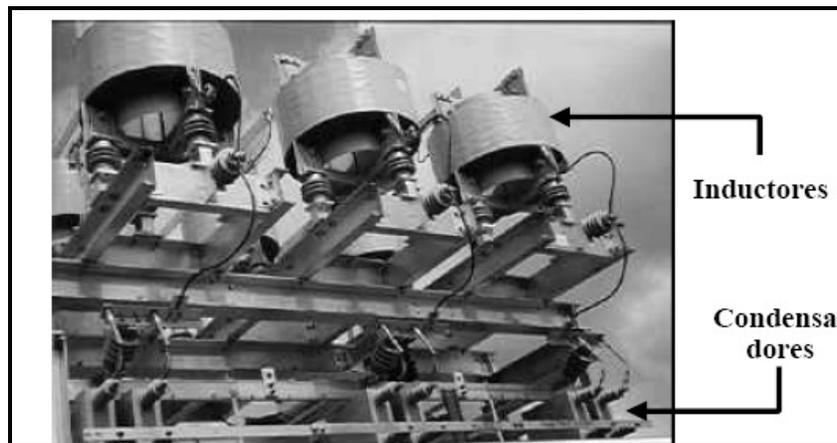
**Figura 4.10.** Filtro serie<sup>[20]</sup>

### Filtros paralelos (baja impedancia)

- Se pueden incorporar al filtro los condensadores para corregir el factor de potencia a frecuencia fundamental.
- Pueden obtenerse arreglos para características múltiples de filtrado.



**Figura 4. 11.** *Filtro paralelo* <sup>[20]</sup>



**Figura 4. 12.** *Filtro pasivo industrial (sistema de 13.8 kv)* <sup>[20]</sup>



**4 CAPITULO V**  
**ESTUDIO DE COSTO BENEFICIO**

¿Cuánto cuesta operar un sistema eléctrico en condiciones de calidad de la energía?

Se parte del criterio que la calidad de la energía no cuesta. La calidad de la energía tiene beneficios.

### 5.1. Costos de mantenimiento

Verificaciones bimestrales de la operación del sistema eléctrico en baja tensión, tensiones menores a 1kV. (Pequeña y mediana industria)

- Realización de pruebas de calidad (verificación)
- Utilización de equipo especializado
- Costos de ingeniería de mantenimiento
- Costos de transporte desde oficina hasta el centro a verificar
- Costos de refacciones emergentes
- Corrección de la distribución de cargas

### 5.2. Beneficios

1. mayor durabilidad del equipo

$$\begin{aligned} \text{Vida útil} &= (\text{vida estándar}) (1,3) \\ \text{Ahorro} &= (\text{valor del equipo}) (0,3) \end{aligned}$$

2. minimización de corrientes del hilo neutro

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

3. estabilidad en los niveles de tensión

Magnitud constantes de tensión (120,220 o 440V)

4. continuidad en el servicio

Sin interrupciones de energía eléctrica

5. alto factor de potencia

$$0,9 < F_p < 1$$

$$\text{factor de potencia} = \frac{\text{potencia activa}}{\text{potencia aparente}}$$

Bonificación en la facturación

$$\text{Cantidad a pagar} = \text{costo energía consumida} - \text{bonificación por FP}$$

### 5.3. Penalización y bonificación por factor de potencia

En México las compañías suministradoras de energía eléctrica han establecido que el valor del factor de potencia mínimo aceptable debe de ser de 0,90 (90%). En el caso de que los usuarios demanden la potencia eléctrica con un factor de potencia menor al 0,90 (90%) se hacen acreedores a sanción económica que deben pagar en su factura eléctrica, el cobro de este cargo se calcula mediante la multiplicación del factor de carga a los costos energéticos. El factor de potencia se debe encontrar en el siguiente rango:

$$0,9 \leq FP \leq 1$$

La penalización por operar a F.P. menores se determina de la siguiente manera:

$$\text{penalización (\%)} = \frac{3}{5} \times \left[ \frac{0,9}{Fp} - 1 \right] \times 100$$

(Para cuando  $FP < 90\%$ )

$$\text{Importe del cargo} = \text{Factor de carga} \times \text{Costos Energéticos}$$

Se aplicará una bonificación por alto factor de potencia cuando el factor de potencia promedio en el periodo de facturación sea mayor a 0,9, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{bonificación (\%)} = \frac{1}{4} \times \left[ 1 - \frac{0,9}{Fp} \right] \times 100$$

(Para cuando  $FP > 90\%$ )

$$\text{Importe de la bonificación} = \text{Factor de Bonificación} \times \text{Costos Energéticos}$$

En la actualidad existen grandes empresas que pagan la energía eléctrica en función de la potencia aparente controlada.

En México, se están otorgando permisos por generación alternativa ubicadas en las propias empresas del consumidor y únicamente pagan los impuestos que se le fijen, aun más si generan una mayor cantidad de energía a la que utilizan, la venden a CFE y se interconecta al sistema eléctrico. En la figura 5.1 se muestra una factura donde se puede apreciar una bonificación por alto factor de potencia mientras que en la figura 5.2 se muestra una factura donde se puede apreciar una penalización por bajo factor de potencia.

### EJEMPLO

LUZ Y FUERZA DEL CENTRO																			
NUMERO DE SU CUENTA			No. O.C.	FECHA DE FACTURACION			R.F.C. CLIENTE	CICLO FACTN.	TARIFA	CIA.	PERIODO DE CONSUMO								
T.V.	B.I.	ZONA	FOLIO	S.	AÑO	MES	DIA	HSI860519QT2	02	HM	4	AÑO	MES	DIA	AÑO	MES	DIA	CLAVE	
45	10	723	9705	1	068492	2004	02	25	HSI860519QT2	02	HM	4	2004	01	14	2004	02	12	AA
MEDIDOR NUM.	LECT. ANT.	LECT. ACT.	CONSTANTE MEDIDOR		CONCEPTO		FACTOR DE POTENCIA	CARGOS		CREDITOS			CLAVE						
03-12-11 A	04-01-14							58,914.00		55,914.00			AA						
COBROS																			
ENERGIA					EN BASE		6,300	KWH	2,865.01										
					INTERMED		11,400	KWH	6,207.33										
					EN PUNTA		2,100	KWH	3,574.15										
DEM. MAX					EN BASE		227	KW											
					INTERMED		287	KW											
					EN PUNTA		231	KW											
PASA A LA FACTURA # 2																			
NOMBRE O RAZON SOCIAL Y DIRECCION														C.P.		R. CENTRAL		IMPORTE POR PAGAR	
HERRAMIENTAS SIGLO SA DE CV * FCA DE HERRAMIE														R. CENTRAL		*****			
CARRETEROS # 24 CUAUTITLAN IZCALI MEX																			
EL PAGO DE ESTE IMPORTE NO LO LIBERA DE ADEUDOS ANTERIORES																			

LUZ Y FUERZA DEL CENTRO																			
NUMERO DE SU CUENTA			No. O.C.	FECHA DE FACTURACION			R.F.C. CLIENTE	CICLO FACTN.	TARIFA	CIA.	PERIODO DE CONSUMO								
T.V.	B.I.	ZONA	FOLIO	S.	AÑO	MES	DIA	HSI860519QT2	02	HM	4	AÑO	MES	DIA	AÑO	MES	DIA	CLAVE	
45	10	723	9705	1	068492	2004	02	25	HSI860519QT2	02	HM	4	2004	01	14	2004	02	12	AA
MEDIDOR NUM.	LECT. ANT.	LECT. ACT.	CONSTANTE MEDIDOR		CONCEPTO		FACTOR DE POTENCIA	CARGOS		CREDITOS			CLAVE						
FACTURA #2					248 KW			21,500.50		136.60									
DEMANDA FACTURABLE																			
BONIFICACION POR F. DE P. MAYOR DE 90%																			
CARGO POR DERECHOS DE ALUMBRADO PUBLICO																			
I.V.A.																			
CARGO PENDIENTE PROX. FACT.																			
+0.200																			
NOMBRE O RAZON SOCIAL Y DIRECCION														C.P.		R. CENTRAL		IMPORTE POR PAGAR	
HERRAMIENTAS SIGLO SA DE CV * FCA DE HERRAMIE														R. CENTRAL		\$39,963.00			
CARRETEROS # 24 CUAUTITLAN IZCALI MEX																			
EL PAGO DE ESTE IMPORTE NO LO LIBERA DE ADEUDOS ANTERIORES																			

Figura 5. 1. Factura de consumo de energía eléctrica con bonificación por alto factor de potencia

LUZ Y FUERZA DEL CENTRO														
NUMERO DE SU CUENTA				No. O.C.	FECHA DE FACTURACION			R.F.C. CLIENTE	CICLO FACTN.	TARIFA	CIA.	PERIODO DE CONSUMO		
45 10 723 9705 1				068492	ANO	MES	DA	HSI860519QT2	03	HM	4	DESDE	HASTA	
MEDIDOR NUM.	LECT.ANT.	LECT.ACT.	CONSTANTE MEDIDOR	CONCEPTO	FACTOR DE POTENCIA	CARGOS	CREDITOS	CLAVE						
04-01-14 A	04-02-12					39,963.00		AA						
ENERGIA	EN BASE			19,800 KWH		9,097.42								
	INTERMED			29,100 KWH		16,009.67								
	EN PUNTA			6,000 KWH		10,318.05								
DEM. MAX	EN BASE			227 KW										
	INTERMED			287 KW										
	EN PUNTA			231 KW										
PASA A LA FACTURA # 2														
NOMBRE O RAZON SOCIAL Y DIRECCION								C.P.	IMPORTE POR PAGAR					
HERRAMIENTAS SIGLO SA DE CV * FCA DE HERRAMIE								R. CENTRAL	*****					
CARRETEROS # 24 CUAUTITLAN IZCALI MEX									EL PAGO DE ESTE IMPORTE NO LO LIBERA DE ADEUDOS ANTERIORES					

LUZ Y FUERZA DEL CENTRO														
NUMERO DE SU CUENTA				No. O.C.	FECHA DE FACTURACION			R.F.C. CLIENTE	CICLO FACTN.	TARIFA	CIA.	PERIODO DE CONSUMO		
45 10 723 9705 1				068492	ANO	MES	DA	HSI860519QT2	03	HM	4	DESDE	HASTA	
MEDIDOR NUM.	LECT.ANT.	LECT.ACT.	CONSTANTE MEDIDOR	CONCEPTO	FACTOR DE POTENCIA	CARGOS	CREDITOS	CLAVE						
FACTURA #2														
				248 KW		24,881.90								
					87.848	1,085.55								
						1,534.80								
						9,208.90								
					+0.500	0.20								
NOMBRE O RAZON SOCIAL Y DIRECCION								C.P.	IMPORTE POR PAGAR					
HERRAMIENTAS SIGLO SA DE CV * FCA DE HERRAMIE								R. CENTRAL	\$72,136.00					
CARRETEROS # 24 CUAUTITLAN IZCALI MEX									EL PAGO DE ESTE IMPORTE NO LO LIBERA DE ADEUDOS ANTERIORES					

**Figura 5. 2.** Factura de consumo de energía eléctrica con penalización por bajo factor de potencia

- a) Regulación de tensión de acuerdo a norma

$$\% \text{regulación} = \frac{(\text{tensión de vacío} - \text{tensión de carga})}{\text{tensión de carga}} \times 100$$

- b) Nitidez de señales de tv
- c) Señales sin sombra, sin efectos de lluvia, sin distorsión
- d) Ausencia de ruidos eléctricos y electrónicos

Sonidos claros

- e) Iluminación constante sin efectos de parpadeo o disminución de intensidad luminosa

f) Disminución de señales transitorias

**Ejemplo:** en la tabla 5.1 se describen los costos de un servicio de mantenimiento en una industria pequeña que consume entre 20000 y 25000 kwh

*Tabla 5. 1. Costos de mantenimiento*

Descripción	Costo de inversión
Realización de pruebas	\$5000,00
Utilización de equipo especializado	\$1000,00
Costos de ingeniería de mantenimiento	\$2000,00
Costos de transporte desde oficina hasta el centro a verificar	\$400,00
Costo de refacciones emergentes	\$500,00
Corrección de la distribución de cargas	\$400,00
<b>Total</b>	<b>\$9300,00</b>

A continuación se describen los beneficios obtenidos con un aproximación del ahorro obtenido.

#### ***Mayor durabilidad del equipo***

Costos total del equipo = \$ 70,000,00 en un periodo de 10 años = \$7000 por año

Costos total del equipo= \$70,000,00 en un periodo de 13 años = \$ 5584 por año

Costos total del equipo= \$5584 en un periodo de 1 años = \$ 236 por año

#### ***Minimización de corrientes del hilo neutro***

Costos de reemplazo de instalación cada 10 años =\$30000 = costo por bimestre \$333,00

#### ***Estabilidad en los niveles de tensión***

Costos de desincronización \$5000= costo bimestral \$833,00

#### ***Continuidad en el servicio***

a) Costos de restablecimiento del sistema

Costo =24000 anuales = bimestrales son \$4000

b) Costos de pérdidas de producción

Costo = \$15000 anuales =bimestrales son \$25000

### *Alto factor de potencia*

Costo sin penalización es de \$240000,00

$$\text{penalización} = \frac{3}{5} \left[ \frac{0.9}{0.8} - 1 \right] \times 100 = \$18000$$

*Tabla 5. 2. Costos de beneficios*

<b>Descripción</b>	<b>Costos de recuperación</b>
Mayor durabilidad del equipo	\$236,00
Minimización de corrientes del hilo neutro	\$333,00
Estabilidad en los niveles de tensión	\$833,00
Continuidad en el servicio	A) costos de restablecimiento del sistema \$4000 B) Costos de perdidas de producción \$2500,00
Alto factor de potencia	\$18000,00
Regulación de tensión de acuerdo a norma	\$999,00
Nitidez de señales de TV	\$133,00
Ausencia de ruidos eléctricos y electrónicos	\$133,00
Iluminación constante sin efectos de parpadeo o disminución de intensidad luminosa	\$180,00
Disminución de señales transitorias	\$0,00
<b>Total</b>	<b>\$27167,00</b>

$$\text{UTILIDAD} = \text{COSTO DE INVERSIÓN} - \text{COSTOS DE RECUPERACIÓN}$$

$$\text{UTILIDAD} = \$9300 - \$27167 = -\$17867$$

**Nota:** el signo negativo solo indica el beneficio para el usuario

Por lo anterior expuesto se deduce y se comprueba que la calidad de la energía no cuesta tiene beneficios, tal como se prevé en el preámbulo de este capítulo.



# CONCLUSIONES

Las perturbaciones eléctricas afectan tanto al funcionamiento de los equipos que se conectan a la red de suministro y degradan el tiempo de vida de los elementos que los componen; como pueden ser: transformadores, conductores, bancos de capacitores para corregir el factor de potencia.

Dichas perturbaciones incrementan además la ocurrencia de cortes en el suministro y variaciones de tensión.

El nivel de distorsión armónica se incrementa en el sistema por la gran cantidad de equipos electrónicos o cargas no lineales que se conectan al sistema eléctrico.

Los parámetros principales asociados a la calidad de la energía son:

- Variaciones de frecuencia y tensión.
- Transitorios por sobretensión.
- Severidad de parpadeo (Flicker)
- Interrupciones cortas y prolongadas de tensión.
- Desequilibrio de tensión.
- Distorsión armónica de tensión y corriente.

Estos elementos están asociados con la continuidad en el servicio y es la distorsión armónica el parámetro que mayor incide en la calidad de la energía ya que existen problemas en las instalaciones eléctricas que no se identifican fácilmente causados por la distorsión. La parte experimental de esta tesis demostró que la distorsión aumenta la corriente en el hilo neutro.

Por otro lado la distorsión puede provocar problemas en equipo de cómputo como falta de registro de datos, interrupciones de programas, parpadeo en las señales de video o audio y en general reducción en la eficiencia de los equipos.

Los resultados experimentales presentados en los diferentes registros de las respuestas eléctricas indican que se presentan altos niveles de distorsión principalmente cuando se usan cargas electrónicas, lo que da lugar a distintos y variados niveles de THD en los diferentes parámetros eléctricos: potencias P, Q, S, corriente y tensión.

Por lo anterior se recomienda:

Diseñar equipo electrónico con sistemas de filtros que reduzcan la distorsión armónica.

Elevar a nivel de norma, las recomendaciones que existen en México, para regular los niveles de THD tanto de corriente como de tensión. En la actualidad solo existe el proyecto de norma CFE00045.

La justificación económica en la aplicación de medidas de control de armónicas es que al disminuir dicha distorsión se mejora el factor de potencia y en consecuencia se tiene derecho a bonificaciones monetarias en la facturación de la energía.

Establecer una penalización por altos contenidos de corrientes y tensiones armónicas que provocaran los equipos de carga no lineales de los usuarios tal como se hace con las tarifas comerciales e industriales por provocar bajo factor de potencia.

Las normas referenciales que se aplican en otros países son: IEEE 519, IEC 61000-2-2, IEC 61000-3-6.

En general se observó que la eficiencia de todo sistema eléctrico está relacionado con el factor de potencia; es decir, cuando el sistema opera con un FP bajo se tiene baja eficiencia y cuando el sistema opera con un alto FP se tiene una eficiencia alta. En términos de calidad la eficiencia se refiere a la operación “adecuada” del sistema eléctrico.



**ANEXO**

**Trece Computadoras Personales (PC) de escritorio, marca Dell, Modelo Optiplex 755, figura 3.3**

Procesador Intel(R)

Pentium(R) 4 CPU 3,00GHz

2,99Ghz, 504MB de RAM



**Figura A. 72.** *Dell PC Optiplex 755*

**Dos Aires Acondicionados de la marca Carrier 2500 Frigorias Frio /Calor, figura 3.4.**

Modelo: 2500

Consumo: 1500 W, 8 A

Motor monofásico 0,22 kW 6250

Corriente: 220 V monofásico

Medidas: frente 0,70 m x alto 0,47m x largo 0,72 m



**Figura A. 73.** *Aire Acondicionado Carrier 2500 Frigorias Frio Calor*

**Siete UPS (Unit Power System), figura 3.5**

Salida 1600 W, 16 A max

50/60Hz

110V:1760VA

120V:1920VA

127V:1920VA

Para la bacteria externa:

Entrada 48V, 44 A (NOM)

41 ~55V, 60 A (Max)



**Figura A. 74.** *Powerware (UPS)*

### Analizador de calidad de energía eléctrica trifásica Power Pad<sup>TM</sup>, Modelo 3945, figura 3.6

El usuario es capaz de obtener formas de onda instantáneas de las principales características de una red eléctrica, y también monitorear su variación en un período de tiempo. El sistema de medición multi-tareas maneja todas las funciones de medición y las reproduce en formas de onda de las diferentes magnitudes, detección, grabaciones continuas y su visualización sin ninguna restricción.



**Figura A. 75.** *Power Pad<sup>TM</sup> Modelo 3945 Características del Producto.*

#### ***Características.***

- Mediciones de tensión RMS hasta de 480 V (de fase a neutro) u 830 V (de fase a fase) para sistemas de dos, tres o cuatro hilos.
- Mediciones de corrientes RMS hasta de 6500 A.
- Mediciones de frecuencias (sistemas de 41 a 70 Hz).
- Cálculo de corrientes de neutro para configuraciones WYE.
- Cálculo de factores de cresta para corriente y tensión.
- Cálculo del factor K para transformadores.
- Cálculo de parpadeos a corto plazo para tensión.
- Cálculo de desbalanceo de fases para tensión y corriente (solo sistemas trifásicos)
- Mediciones de ángulos de armónicos y velocidades (referidas a la fundamental o al valor RMS) para tensión, corriente o potencia, hasta la 50VA armónica.
- Cálculo de todos los factores de distorsión armónicos.
- Monitoreo del valor promedio de cualquier parámetro, calculado sobre un período que va desde 1 segundo hasta 2 horas.
- Mediciones de potencia activa, reactiva y aparente por fase y su respectiva suma total.
- Cálculo del factor de potencia, desplazamiento del factor de potencia y el factor tangente.
- Potencia total desde un punto en el tiempo, elegido por el operador.
- Grabación, caracterización del disturbio (subidas, caídas e interrupciones, excedentes de potencia y umbrales armónicos).
- Detección de transitorios y grabación de las formas de ondas asociadas.

A 3D illustration of a mechanical gear system. It features a large central gear with a smaller gear meshing with it. Above the gears is a structure resembling a grid or a window frame. The entire scene is rendered in a light gray, semi-transparent style.

# **GLOSARIO**

**Armónicas:** son tensiones o corrientes senoidales que tienen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental del sistema eléctrico (50 ó 60 Hz). Los armónicos se deben al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.

**Calidad de energía:** se puede entender como un bajo nivel de disturbios en la red o sea con el mínimo de distorsiones armónicas, variaciones de tensión, interrupciones, sobretensiones, tanto en el suministro como en la recepción. Además le concierne la estabilidad de tensión, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico.

De acuerdo al artículo 222° del D.S. N°327/97, *Reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos*, la *calidad de servicio* es el conjunto de propiedades y estándares normales que, conforme a la ley y el reglamento, son inherentes a la actividad de distribución de electricidad concesionada, y constituyen las condiciones bajo las cuales dicha actividad debe desarrollarse. La calidad de servicio incluye, entre otros, los siguientes parámetros:

- a. Las normas y condiciones que establezcan los decretos de concesión.
- b. La seguridad de las instalaciones y de su operación así como el mantenimiento de las mismas.
- c. La satisfacción oportuna de las solicitudes de servicio, en los términos y condiciones establecidos.
- d. La correcta medición y facturación de los servicios prestados, y el oportuno envío a los usuarios y clientes.
- e. El cumplimiento de los plazos de reposición de suministro.
- f. La oportuna atención y corrección de situaciones de emergencia, interrupciones de suministro, accidentes y otros imprevistos.
- g. La utilización de adecuados sistemas de atención e información a los usuarios y clientes.
- h. La continuidad del servicio.
- i. Los estándares de calidad del suministro.

**Calidad del suministro:** de acuerdo al artículo 223° del D.S. N°327/97, la calidad del suministro es el conjunto de parámetros físicos y técnicos que, conforme al reglamento y las normas técnicas pertinentes, debe cumplir el producto electricidad. Dichos parámetros son, entre otros, tensión, frecuencia y disponibilidad.

**Cargas eléctricas:** existe una gran diversidad de cargas eléctricas las mismas que debido a su función específica generan formas de onda de corriente senoidal o diferentes a la onda senoidal en el sistema eléctrico y varias inclusive afectan directamente a la forma de onda de tensión.

**Cargas lineales:** la mayor parte de las cargas eléctricas se tipifican como cargas convencionales; estas se comportan linealmente, lo cual significa que al aplicar una tensión, la forma de onda de la corriente conserva esa misma forma, aunque en general estará desplazada en el tiempo un ángulo.

**Cargas no lineales:** son todas aquellas que generan corrientes no senoidales, es decir, corrientes que además de la componente fundamental tienen otras que son múltiplos enteros de la fundamental y que se conocen como armónicos.

**Distorsión de la forma de onda:** es definida como una desviación del estado estable de la forma ideal senoidal del sistema principalmente caracterizado por su contenido espectral.

**Factor de potencia:** se define como la relación entre la potencia activa  $P$  y la potencia aparente  $S$ .

- Un FP bajo comparado con otro alto, origina, para una misma potencia, una mayor demanda de intensidad, lo que implica la necesidad de utilizar cables de mayor sección.
- La potencia aparente es tanto mayor cuanto más bajo sea el FP, lo que origina una mayor dimensión de los generadores.

**Fluctuaciones de tensión:** son variaciones sistemáticas de tensión o series de cambios de tensión, la magnitud permisible de estas fluctuaciones no debe de excederse de los rangos de tensión especificados por el ANSI C84.1-1982 de 0,9 hasta 1,1 pu.

**Forma de onda:** es la representación gráfica de forma con que una onda evoluciona a lo largo del tiempo. Normalmente estos fenómenos ondulatorios tales como son las ondas electromagnéticas obedecen a funciones matemáticas periódicas. Para cada función la evolución de la amplitud de onda a lo largo del tiempo es diferente y define una forma de onda diferente.

**Muesca:** es un periodo de disturbio de la tensión causada por la operación normal de convertidores electrónicos cuando la corriente es conmutada desde una fase a otra (período de conmutación).

**Pico de tensión:** es un incremento en el nivel de tensión que dura microsegundos. Es debido principalmente por fallas en la red eléctrica, descargas atmosféricas y maniobra de interruptores de grandes cargas.

**Ruido:** se denomina ruido eléctrico, interferencias o parásitos a todas aquellas señales, de origen eléctrico, no deseadas y que están unidas a la señal principal o útil de manera que la pueden alterar produciendo efectos que pueden ser más o menos perjudiciales. El ruido en los sistemas eléctricos puede ser causado por dispositivos electrónicos, circuitos de control, equipo de arco eléctrico, cargas con rectificadores de estado sólido, y apertura y/o cierre de los suministros de energía.

**Transitorios:** son variaciones muy rápidas asociadas con maniobras de cambios de estado, fallas eléctricas o sobretensiones inducidos debido a descargas atmosféricas.

**Variaciones de frecuencia del sistema:** son definidas como la desviación de la frecuencia fundamental del sistema que es especificada como valor nominal (60 Hz). La frecuencia del sistema es directamente relacionada para la velocidad de rotación de los generadores que suministran la energía al sistema.



## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Perturbaciones en la red eléctrica, Víctor Sánchez Huerta, México, 2006
- [2] Calidad de la energía, Ing. Eugenio Tallez Ramírez, AP&C
- [3] Distorsión Armónica, Ing. Eugenio Tallez Ramírez, AP&C
- [4] IEEE 519 “Practicas recomendadas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia”.
- [5] CFE L0000-45 “perturbaciones permisibles en las forma de onda de tensión y de corriente del suministro de energía eléctrica”.
- [6] Factor de Potencia, Armónicos y Filtros Armónicos, Tom Shaughnessy, PowerCET.
- [7] Las conexiones sueltas provocan problemas de calidad de potencia, Soluciones POWERLOGIC, Schneider Electric.
- [8] Estudio de calidad de la Energía en la vidriera “Los Reyes, COINEL S.A. de C.V, Edo. de México, 2008
- [9] IEC 61000-2-2: 2002- Electromagnetic compatibility (EMC) part 2: Environment – Section 2: compatibility levels for low – frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems (also materials used in preparation of the stand, obtained from the authors)
- [10] Factor de Potencia, Armónicos y Filtros Armónicos, Tom Shaughnessy, PowerCET, Santa Clara, C.A.;
- <http://jaimevp.tripod.com/Electricidad/FPyArmonicos.htm>
- [11] Nociones Básicas de Teoría de Circuitos, Departamento de Electrónica, Universidad de Málaga, Francisco Javier Marín Martín, , 2008.
- <http://www.uma.es/marin>
- [12] Eficiencia Integral en Agua y Energía, (USAID), Octubre de 2008.
- <http://www.waterymex.org/>
- [13] Distorsión Armónica, SicaNews ,2008.
- <http://www.paginadigital.com.ar/articulos/2002rest/2002terc/tecnologia /sica90.html>
- [14] Calidad de la Energía, Francisco Graña, PROCOBRE Perú2005,
- <http://www.procobreperu.org> .

<sup>[15]</sup> Las conexiones sueltas provocan problemas de Calidad de Potencia, Schneider Electric España, 2001,

<http://www.powerlogic.schneiderelectric.es/PowerLogic/docs/solucion1.2.pdf>

<sup>[16]</sup> Calidad de Energía Eléctrica, (CBEMA), México, 2004.

<sup>[17]</sup> Perturbaciones en la Red Eléctrica, Víctor Sánchez Huerta, México, 2006

<sup>[18]</sup> Analizador de redes eléctricas, Ing. José Valentín López Rivas, México, 2003

<sup>[19]</sup> ¿Qué es “Factor Cresta” y Por Qué se Usa?, Alan Friedman, [www.DLengineering.com](http://www.DLengineering.com), ENGINEERING CORPORATION

<sup>[20]</sup> Universidad SIMO bolivar , calidad del servicio eléctrico power quality, grupo de sistemas industriales de electrónica de potencia