



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

Análisis de la Calidad de la Energía en la Red de Distribución de
Ciudad Universitaria

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTA:

JUAN MANUEL CERVANTES JACINTO

ASESOR:

DR. NORBERTO GARCIA BARRIGA



MORELIA, MICHOACÁN, NOVIEMBRE DE 2006

Agradecimientos

- *Un Agradecimiento primeramente a dios por darme la oportunidad de haber logrado un reto más en mi vida y permitirme compartir mi felicidad con mis seres queridos.*
- *A mi madre y mis hermanos por siempre estar conmigo en todo momento.*
- *A mis abuelos Mariano y Aurora por darme la confianza de creer en mi y apoyarme siempre con sus buenos consejos.*
- *A mis maestros que me brindaron sus conocimientos durante todo este tiempo.*
- *A mis compañeros con los cuales vivimos momentos de tensiones y alegrías.*
- *Al Dr. Norberto García Barriga por haber apoyado con sus conocimientos y el tiempo que dedico en mi asesoría.*
- *A mis amigos José Trinidad y Ma. del Carmen por darme un trabajo para mantener mis estudios.*
- *Al ing. Silvestre Vargas Contreras jefe de la dirección de servicios generales por la asesoria brindada para la realización de las mediciones.*

Dedicatoria

- *A mi madre Bertha Jacinto Campos por el amor y cariño incondicional que siempre me ha brindado, a mis hermanos Leticia, Andrea y Eduardo ya que ellos son el motor que me motiva para seguir adelante.*

Resumen

En este trabajo se presenta el análisis de la calidad de la energía en la red de distribución de ciudad universitaria. La calidad de la energía es un tema que en los últimos años ha tenido una enorme relevancia en todas las industrias, lo cual es debido a la proliferación de equipo electrónico que provoca que las formas de onda de voltajes y corrientes se distorsionen. En la red de distribución de ciudad universitaria se han presentado recientemente algunos problemas en el suministro de energía, los cuales tienen relación con fenómenos de calidad de la energía. Por otra parte, desde la implementación del sistema de distribución subterránea no se ha llevado a cabo un estudio minucioso del estado de operación del sistema.

El presente análisis de calidad de la energía se lleva a cabo en cada uno de los transformadores que conforman la red de distribución de ciudad universitaria. Se realiza un muestreo de cada uno de estos transformadores durante un periodo de 24 horas con la finalidad de conocer el comportamiento del suministro de energía durante este periodo. Dicho muestreo indica un panorama muy claro de la situación actual del sistema y del consumo de las cargas de la red universitaria.

Para llevar a cabo este muestreo se utiliza el equipo Power Platform 4300 (PP4300), el cual realiza muestreos en intervalos preestablecidos y analiza los disturbios del voltaje, interrupciones y distorsión total armónica (THD). Este último parámetro indicará el contenido armónico que se encuentre presente en la red universitaria.

Entre los fenómenos de calidad de energía más importantes estudiados en este trabajo se encuentran armónicos, interrupciones y depresiones e incrementos de voltaje. Además, se reportan las potencias aparente, real, reactiva y el factor de potencia en los circuitos secundarios de bajo voltaje de los transformadores de la red universitaria.

Contenido

Agradecimientos	<i>ii</i>
Dedicatoria	<i>iii</i>
Resumen	<i>iv</i>
Lista de Figuras	<i>vii</i>
Lista de Tablas	<i>ix</i>
Lista de acrónimos y símbolos	<i>x</i>
Publicaciones	<i>xi</i>

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes	2
1.2. Descripción General del Problema	3
1.2.1. Configuración de la red de distribución de Ciudad Universitaria	5
1.2.2. Situación actual del funcionamiento de la red	6
1.3. Objetivo	8
1.4. Justificación	8
1.5. Metodología	10
1.6. Descripción de los Capítulos	11

Capítulo 2. Armónicos

2.1. Introducción	12
2.2. Efecto de los armónicos	14
2.3. Formulación para el cálculo de los armónicos	16
2.4. Análisis armónico del voltaje	16
2.5. Análisis armónico de la corriente	22
2.6. Desbalance de corriente por el neutro	27
2.7. Conclusiones	32

Capítulo 3. Factor de potencia y potencias.

3.1. Introducción	34
3.2. Definición de la Potencia aparente, real y reactiva	36
3.3. Análisis de la potencia real, reactiva y aparente	41
3.4. Definición del factor de potencia	57
3.5. Análisis del factor de potencia	59
3.6. Frecuencia de línea	62
3.7. Conclusiones	64

Capítulo 4. Interrupciones, depresiones e incrementos de voltaje

4.1. Introducción	66
4.2. Principales disturbios de la energía	66
4.2.1. Interrupciones de energía	68
4.2.2. Depresiones de voltaje (Sag)	68
4.2.3. Incrementos de voltaje (Swell)	69
4.2.4. Desbalance de voltaje	70
4.3. Análisis de interrupciones, depresiones e incrementos de voltaje	71
4.4. Conclusiones	79

Capítulo 5. Conclusiones

5.1. Conclusiones Generales.	81
5.1.1 Conclusiones Particulares.	84
5.2. Trabajos Futuros	84

Apéndice A	85
-------------------	----

Referencias	87
--------------------	----

Lista de Figuras

1.1	Diagrama de conexión de equipo	4
1.2	Diagrama de conexión del equipo en campo.	5
1.3	Diagrama de ubicación de los transformadores de la red de distribución de ciudad universitaria	7
2.1	Cargas que no generan armónicos	13
2.2	Cargas no lineales que generan armónicos	14
2.3	Diagrama de tiempo del % THDv del transformador 1	19
2.4	Espectro armónico del voltaje en la fase A del transformador 1	20
2.5	Resumen de la distorsión armónica total del voltaje %THDv	21
2.6	Resumen del espectro armónica del voltaje en la fase A	22
2.7	Diagrama de tiempo del % THDi del transformador 1	24
2.8	Espectro armónico de la corriente en la fase A del transformador 1	25
2.9	Resumen de la distorsión armónica total de la corriente %THDi	26
2.10	Resumen del espectro armónica de la corriente en la fase A	27
2.11	Sistema trifásico, cuatro hilos	28
2.12	Diagrama de tiempo de la corriente en el transformador 1	30
2.13	Corriente eficaz en las fases y el neutro	31
3.1	Representación del cubo de potencias.	41
3.2	Diagrama de tiempo de la potencia real del transformador 1	42
3.3	Diagrama de tiempo de la potencia aparente del transformador 1	43
3.4	Diagrama de tiempo de la potencia reactiva del transformador 1	45
3.5	Diagrama de flujo para el cálculo de los parámetros de calidad de la energía	46
3.6	Punto de análisis de la potencia reactiva positiva en el transformador 1	47
3.7	Formas de onda del voltaje y la corriente (reactivos positivos)	48
3.8	Punto de análisis de la potencia reactiva negativa en el transformador 1	51
3.9	Formas de onda del voltaje y la corriente (reactivos negativos)	52

3.10	Potencia real de cada uno de los transformadores en cada una de las fases	55
3.11	Potencia aparente de cada uno de los transformadores en cada una de las fases	56
3.12	Potencia reactiva de cada uno de los transformadores en cada una de las fases	57
3.13	Diagrama de tiempo del factor de potencia del transformador 1	61
3.14	Diagrama del factor de potencia de los transformadores de la red Universitaria	62
3.15	Diagrama de tiempo de la frecuencia del transformador 1	63
4.1	Depresión de voltaje	69
4.2	Incremento de voltaje	70
4.3	Desbalance trifásico ocurrido a las 9:45:47 del transformador 2	72
4.4	Desbalance trifásico ocurrido a las 22:01:45 del transformador 2	73
4.5	Desbalance trifásico ocurrido a las 19:17:05 del transformador 10A	74
4.6	Desbalance trifásico ocurrido a las 16:09:05 del transformador 14A	75
4.7	Desbalance trifásico del transformador 14A	76
4.8	Decremento de voltaje, (a) inicio del SAG, (b) continuación y (c) fin del SAG	77
4.9	Desbalance trifásico del transformador 15	78
5.1	Red de distribución Universitaria detectando los transformadores que se encuentran en condiciones inadecuadas.	83

Lista de Tablas

2.1	Calendario de mediciones	17
2.2	Resumen de valores críticos en %THDv del transformador 1	19
2.3	Resumen de valores críticos en %THDi del transformador 1	24
2.4	Resumen de valores críticos de la corriente en el transformador 1	30
2.5	Resumen del funcionamiento de los transformadores	33
3.1	Resumen de valores críticos de la potencia real del transformador 1	42
3.2	Resumen de valores críticos de la potencia aparente del transformador 1	43
3.3	Resumen de valores críticos de la potencia reactiva del transformador 1	45
3.4	Datos de la forma de onda del voltaje y la corriente.	49
3.5	Comparación de resultados (reactivos positivos)	50
3.6	Datos de la forma de onda del voltaje y la corriente.	53
3.7	Comparación de resultados (reactivos negativos)	54
3.8	Resumen de valores críticos del FP del transformador 1	61
3.9	Resumen de valores críticos de la frecuencia del transformador 1	63
3.10	Resumen de los transformadores	65
4.1	Categorías y características típicas de fenómenos electromagnéticos definidos en IEEE 1159:1995	67
4.2	Resumen de los transformadores	80

Lista de acrónimos y símbolos

i	Corriente instantánea
v	Voltaje instantáneo
T	Periodo.
t	Tiempo.
kWH	kilowatt-horas.
h	Enésimo armónico.
w_0	Frecuencia angular.
THD	Distorsión armónica total.
$THDi$	Distorsión armónica total de la corriente.
$THDv$	Distorsión armónica total del voltaje.
P	Potencia real.
Q	Potencia reactiva.
S	Potencia aparente.
D	Potencia de distorsión.
FP	Factor de potencia.
p	Potencia instantánea.
V_{rms}	Voltaje eficaz.
I_{rms}	Corriente eficaz.
SAG	Depresión de voltaje.
SWELL	Incremento de voltaje.
Hz	hertz
I_n	Corriente en el neutro.
I_a	Corriente en la fase A.
I_b	Corriente en la fase B.
I_c	Corriente en la fase C.

Publicaciones:

- J. M. Cervantes y N. García “Análisis de la Calidad de la Energía en la Red de Distribución de Ciudad Universitaria” IEEE ROPEC 2006, Morelia Michoacán, noviembre 8-10, 2006.
- J. M. Cervantes y N. García, “Fenómenos de Calidad de la Energía en la Red de Distribución de Ciudad Universitaria”, artículo aceptado para ser presentado en el 2° foro Académico Nacional de Ingenierías y Arquitectura, Morelia Michoacán, diciembre 6-8, 2006.

Capítulo 1

Introducción

La calidad de la energía se puede definir como la ausencia de interrupciones, sobre tensiones o distorsión de la forma de onda. El estudio de la calidad de la energía tiene la finalidad de mejorar la energía utilizada, así como el funcionamiento óptimo de los equipos y la reducción de las pérdidas de energía. Actualmente, este término ha tenido una mayor importancia debido al incremento de cargas sensibles en los sistemas de distribución. En este trabajo se realizará un estudio de la red de distribución de ciudad universitaria, la cual está conformada por 14 transformadores. Estos transformadores están provistos para alimentar edificios, alumbrado, talleres y laboratorios.

En las instalaciones universitarias se cuentan con una enorme cantidad de equipo eléctrico y electrónico que son sensibles a los disturbios en el suministro de energía pero al mismo tiempo son los causantes del decremento en la calidad del suministro. El estudio de fenómenos como fluctuaciones de voltaje, interrupciones y análisis armónico permitirá conocer cuales son las cargas o equipos generadores de armónicos así como también los periodos de tiempo en el cual se presenta este comportamiento.

Un parámetro importante a considerar es el factor de potencia, el cual indica la eficiencia con la cual se está aprovechando la energía eléctrica. Esto es de suma importancia ya que la universidad estaría sujeta a pagar una penalización de existir un bajo factor de potencia, y de igual manera existirán enormes pérdidas afectando de manera considerable la operación del sistema eléctrico universitario. Otro beneficio a considerar son los costos adicionales en la facturación.

1.1 Antecedentes

El término calidad de energía es utilizado como sinónimo de confiabilidad de la fuente, el cual tiene la finalidad de indicar que existe una fuente de alimentación adecuada y segura. En general la calidad de la energía abarca tres aspectos como son: confiabilidad de la fuente, calidad de la energía ofrecida y disposición de la información. Tomando en cuenta las innumerables contribuciones al tema en los últimos años, la calidad de la energía se utiliza para expresar la calidad del servicio eléctrico en una red eléctrica.

La mayoría de los trabajos pioneros en el área de calidad de la energía hacen referencia a los armónicos. La distorsión provocada por los armónicos aumenta considerablemente el problema de calidad de la energía. Además es necesario incluir los transitorios y las desviaciones no-periódicas de las formas de onda. Estas desviaciones son utilizadas para determinar la compatibilidad electromagnética (EMC), la cual se refiere a la operación adecuada de componentes y sistemas sin interferir con otros componentes del sistema [Arrillaga et al. 2000].

La calidad de la energía, es un término que abarca todos los aspectos asociados con amplitud de fase y frecuencia del voltaje que existe en circuitos de distribución de energía. Niveles no adecuados de calidad de la energía pueden encontrarse en periodos transitorios en circuitos de potencia, durante la conexión de cargas no lineales de nivel relativamente grande o una gran cantidad de cargas no lineales de bajo nivel.

En años anteriores, a excepción del factor de potencia y el parpadeo (*flicker*) los problemas de calidad de la energía les preocupaban exclusivamente a las compañías suministradoras del servicio eléctrico. Sin embargo, durante la última década estos problemas han adquirido relevancia debido al incremento de las cargas sensibles a la calidad del suministro [Acha y Madrigal 2001].

Existen diferentes fenómenos que pueden ser analizados y corregidos por medio del análisis de la calidad de la energía, algunos de estos son:

- Distorsión de la forma de onda fundamental de voltaje dentro de instalaciones.
- Existencia de altas corrientes circulando por el neutro.
- Diferencia de potencial de neutro a tierra.
- Calentamiento excesivo de los transformadores.
- Grandes campos magnéticos que emanan de transformadores.

Las cargas no lineales están directamente asociadas a los fenómenos antes mencionados ya que producen corrientes no-senoidales. Estas cargas han existido en los sistemas eléctricos desde siempre, principalmente del tipo magnético, como las corrientes de excitación de los transformadores y los balastos magnéticos de luminarias tipo fluorescentes. La aparición de la electrónica de potencia ha mejorado mucho las propiedades de los productos, pero ha traído consigo otros problemas, como la generación de armónicos [IEEE 1992].

1.2 Descripción general del problema.

Los equipos de hoy en día son más sensibles a las variaciones de la energía que los equipos utilizados en años anteriores. Asimismo, varias cargas contienen controles basados en instrumentos electrónicos los cuales son sensibles a los disturbios eléctricos. En ciudad Universitaria se cuenta con una enorme cantidad de equipo eléctrico y electrónico el cual tiene que mantenerse en condiciones adecuadas para su óptimo funcionamiento. Por la tanto, es importante proveer un suministro de calidad que permita el buen funcionamiento de los equipos, afectando lo menos posible la red universitaria.

A continuación se muestra en la Figura 1.1 los elementos principales involucrados en el desarrollo de este trabajo. El tipo de estudio desarrollado en esta tesis se enfoca al análisis del estado de operación de los diferentes transformadores que conforman la red de distribución de Ciudad Universitaria. Es por ello que el instrumento de medición se coloca en el secundario de cada uno de los transformadores que conforman la red de distribución. Para realizar el análisis correspondiente de las mediciones se utiliza una PC con el programa Dran-View 6.

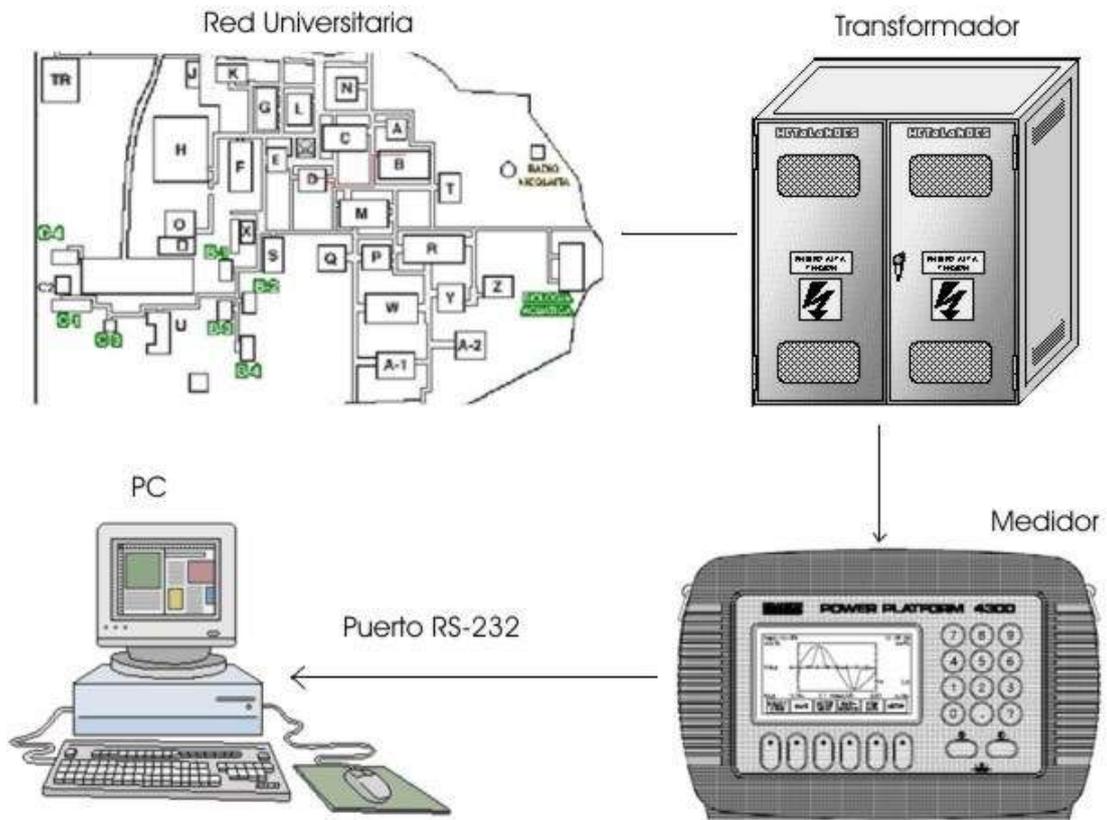


Figura 1.1 Diagrama de conexión del equipo.

En la Figura 1.2 se muestra el equipo PP4300 conectado a uno de los transformadores de la red universitaria. Se puede observar las terminales del PP4300 conectadas a las terminales del transformador para medir los voltajes de línea. De la misma manera se observa la conexión de la puntas TR-2500 y TR-2022 en los cables de salida del transformador, las cuales medirán las corrientes de línea respectivamente para cada una de las fases y el neutro. Estas puntas TR-2500 tienen una capacidad para medir hasta 500 amperes mientras que la TR-2022 mide hasta 1000 amperes.



Figura 1.2 Diagrama de conexión del equipo en campo.

1.2.1 Configuración de la red de distribución de ciudad universitaria.

La red de distribución de la Universidad Michoacana tiene como fuentes de alimentación los circuitos 4040 como preferente y 4100 como respaldo de la subestación Morelia II de la red de distribución de Comisión Federal de Electricidad. La red de distribución de media tensión de Ciudad Universitaria que se encuentra configurada en anillo y operación radial, con dos fuentes de alimentación para la red principal. La transición que forma el anillo se localiza en la entrada oriente, en la calle Tlalpujahuá, una en la esquina con Nicolás bravo y la otra en la esquina con Alberto Alvarado. La transición que alimenta al bombeo se localiza en la esquina de Av. Universidad y la calle Lisboa [Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo 1999].

1.2.2 Situación actual del funcionamiento de la red.

La red de distribución de la universidad ha tenido importantes modificaciones, como lo es el aumento considerable de cargas y por consecuencia la instalación de nuevos transformadores a la red. Es por ello que los transformadores ya instalados han sufrido modificaciones en su operación. Las conexiones realizadas en los transformadores ya instalados son inadecuadas, por lo que afecta de manera considerable el funcionamiento de los equipos y por consecuencia presentan pérdidas de energía en el sistema eléctrico universitario. Otro punto importante a destacar es que al incorporar nuevas cargas a los transformadores no se ha tomado en cuenta la necesidad de balancear las cargas para cada una de las fases de manera adecuada.

Actualmente, la universidad cuenta con una enorme cantidad de equipo de cómputo, alumbrado (lámparas fluorescentes), equipo de bombeo, hornos eléctricos, talleres y laboratorios, por lo que es de suma importancia conocer las condiciones de la red de distribución universitaria.

La Figura 1.3 muestra el diagrama de la red de distribución de Ciudad Universitaria. Donde se indica la ubicación de los transformadores y el área de influencia de cada uno de los transformadores.

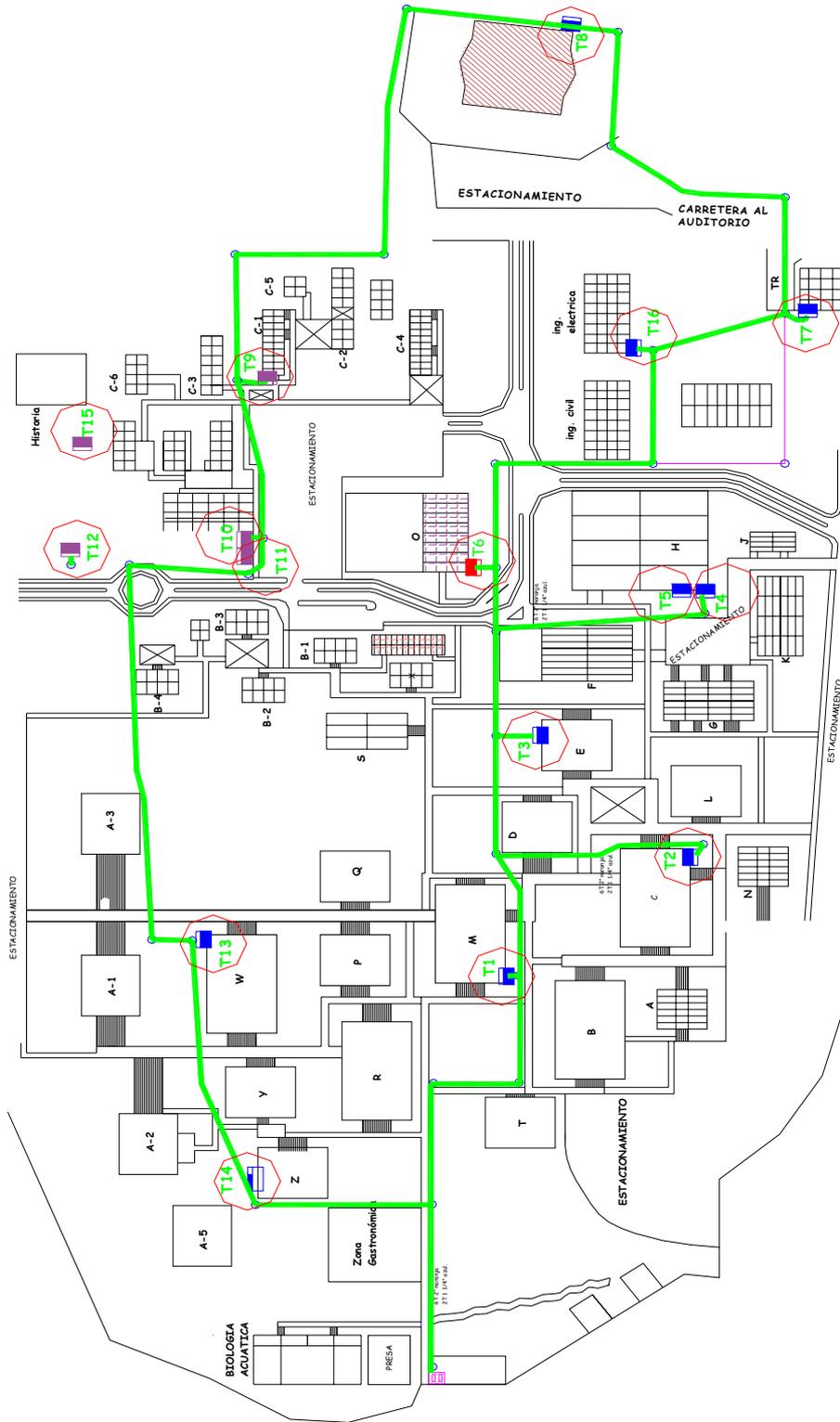


Figura 1.3 Diagrama de ubicación de los transformadores en la red de distribución de Ciudad Universitaria.

1.3 Objetivo.

El objetivo de esta tesis es realizar un análisis minucioso del estado de la calidad de la energía en la red de distribución de Ciudad Universitaria. Para llevar a cabo este estudio se propone realizar estudios encaminados a determinar el estado del suministro en cada uno de los transformadores de la red de distribución. Este tipo de análisis permite detectar los compromisos de calidad en materia de energía, de los cuales se pueden resaltar las elevaciones de voltaje (SWELLS), depresiones de voltaje (SAG), interrupciones en el suministro y la distorsión de la forma de onda debido a los armónicos en la red.

Los objetivos particulares de este trabajo son:

- Investigar el estado actual de la red de distribución en ciudad universitaria.
- Investigar el nivel de utilización de los transformadores.
- Estudiar los niveles de distorsión armónica en la red de distribución.
- Monitorear fenómenos de calidad de la energía tales como interrupciones, depresiones e incrementos de voltaje.
- Estudiar el impacto que causa la existencia de los armónicos.

1.4 Justificación

Debido a la gran importancia que en los últimos años se ha cobrado el tener mejores condiciones de servicio eléctrico, en este trabajo se realiza un análisis de la red de distribución de ciudad universitaria, con el cual se determinarán las condiciones actuales de operación de esta red. Uno de los principales problemas encontrados en los sistemas eléctricos es la presencia de armónicos, los cuales pueden ocasionar problemas como los que se citan a continuación [IEEE 1992].

- Disparo intempestivo de interruptores y otros equipos de protección.
- Aumento de las pérdidas, y mal aprovechamiento de la instalación
- Sobrecalentamiento de motores y transformadores.
- Mal funcionamiento de computadoras y otros equipos electrónicos de control y / o cargas sensibles.
- Interferencia con circuitos de iluminación y telefónicos.
- Distorsión en la tensión de la red.
- Error en equipos de medición
- Perturbación en los sistemas eléctricos informáticos.
- Fallas en instalaciones
- Disminución del factor de potencia.

En las instalaciones de Ciudad Universitaria se cuenta con una gran diversidad de equipos de comunicación, medición, transformadores, motores, líneas telefónicas, equipos de protección y muchos otros que son susceptibles de ser afectados por el suministro de energía de pobre calidad. Los costos que implica no contar con un suministro de energía adecuado se verán reflejados de manera considerable en el deterioro de los equipos mencionados anteriormente.

Recientemente, en las instalaciones universitarias se han presentado descensos de voltaje de magnitud considerable, lo cual provoca fallas en instalaciones y pérdidas de información por mencionar algunos problemas. Es por ello que es importante realizar estos estudios, permitiendo determinar en que instantes ocurre el evento y la gravedad del mismo.

Por lo mencionado anteriormente, con la finalidad de buscar soluciones a los problemas ocasionados por los armónicos y otros fenómenos de calidad, se propone llevar a cabo una etapa de medición para detectar la existencia de estos fenómenos en las instalaciones universitarias. De los resultados obtenidos en las mediciones, se realizarán las consideraciones necesarias para proponer soluciones adecuadas que permitan atacar estos problemas.

1.5 Metodología.

La primera etapa de este trabajo de tesis consiste en el monitoreo de corrientes y voltajes en el secundario de los transformadores. Las mediciones serán tomadas en un periodo de 24 horas en cada uno de los transformadores. La finalidad de considerar este tiempo es conocer cual es el comportamiento de las cargas, durante los intervalos de mayor demanda de energía eléctrica.

De acuerdo al resultado de las mediciones se determinará basándose en el estándar IEEE 519, las condiciones de operación en las que se encuentra la red en relación con los resultados obtenidos. Este estándar establece cuales son los niveles máximos permisibles de calidad de energía.

Para llevar a cabo este análisis se realizó la medición con un equipo DRANETZ BMI Power Platform 4300 (PP4300). Este equipo realiza muestreos en intervalos deseados por el usuario, puede grabar y mostrar datos en ocho canales de los cuales cuatro son de voltaje y cuatro de corriente. Algunas características adicionales de este equipo son:

- Registra acontecimientos incluso formas de onda para determinar con esto la fuente del problema.
- Captura datos de evento de acuerdo a configuraciones únicas.
- Captura voltajes reales y formas de onda de corriente y eventos relacionados con calidad de energía clasificados por el estándar IEEE 1159 para perturbaciones de voltaje.
- Cuenta también con ayuda de cada función desplegada en texto.

Este equipo graba y transfiere datos a una PC usando un módulo de comunicación y el programa DRAN-LINK 4300 Versión 1.0. Este Software realiza la comunicación del equipo PP4300 y la PC a través de la memoria interna o bien de la tarjeta de memoria. Además cuenta con una tarjeta TASKCard PQLite V. 4.0, la cual contiene un Software de calidad de energía la cual realiza estudios de varios parámetros con referencia a este término. Posteriormente para el análisis de los datos se utiliza el software Dran-View

Versión 6 (DEMO), con el cual se reportan valores de gran interés para la realización de este estudio [Dranetz BMI 2002].

1.6 Descripción por capítulos.

En el capítulo 1 se presentan los antecedentes más relevantes en el tema de calidad de la energía, una descripción del tipo de red a estudiar y los objetivos a alcanzar en esta tesis.

En el capítulo 2 se presenta un estudio sobre la presencia y los efectos de los armónicos en la red de distribución. Además, se analizan los armónicos que tienen una mayor influencia en la distorsión de los voltajes y corrientes en la red de distribución.

El capítulo 3 presenta las variaciones del factor de potencia y de la potencia aparente, real y reactiva.

En el capítulo 4 se presenta un análisis de la calidad en términos de interrupciones, depresiones e incrementos de voltaje.

En el capítulo 5 se muestran las conclusiones obtenidas con los resultados del análisis realizado en cada uno de los transformadores de la red de distribución de ciudad universitaria.

Capítulo 2

Armónicos

En este capítulo se presenta los antecedentes de los fenómenos y las causas que provocan la presencia de los armónicos, así como también el efecto que ocurre al no considerar un sistema adecuado de tierras y balance de carga. Posteriormente se presentan las mediciones y el análisis de los resultados para los voltajes y corrientes en cada uno de los transformadores.

2.1 Introducción.

La presencia de los armónicos en el sistema de potencia no es un fenómeno nuevo, los antecedentes se remontan a los primeros años de operación de las redes de potencia en 1890, cuando los transformadores y máquinas rotativas fueron identificados como la principal fuente de distorsión armónica de las formas de onda. En 1893, Charles Proteus Steinmetz se incorporó a trabajar para Thomas-Houston, en donde una de sus primeras asignaciones fue solucionar los problemas de calefacción del motor en Hartford, Connecticut. Steinmetz tenía conocimiento matemático para manejar análisis armónico e hizo buen uso de dicho conocimiento para identificar y solucionar el problema, el cual era una combinación de la resonancia en los circuitos de transmisión que alimentan la planta y un generador contribuyendo con una pequeña cantidad de distorsión en las formas de onda. Para el análisis del problema, se utilizó un dispositivo llamado medidor de onda y el análisis de Fourier. Otro problema importante de los armónicos se asoció con la forma de onda del generador, el cual se reconoce por las excesivas corrientes que circulaba en los generadores sólidamente aterrizados operando en paralelo. Hoy en día, este es un problema bien conocido que involucra el tercer armónico del voltaje de secuencia cero en máquinas

conectadas en estrella. En 1910, otro problema armónico surgió debido a la interferencia en los circuitos de comunicación que se encontraban cerca de las líneas eléctricas.

El voltaje y la forma de onda de la corriente en circuitos de corriente alterna se encuentran normalmente en condiciones senoidales, con amplitud y frecuencia constante. Sin embargo, en mayor o menor grado, todas las centrales eléctricas tienen la característica indeseable de introducir distorsión en los circuitos de corriente alterna, la cual hace que el voltaje y la forma de onda de corriente sufran distorsión de la forma de onda fundamental [Acha y Madrigal 2001].

La contaminación armónica de una red aun cuando no es causa de la interrupción de energía, hace sentir sus efectos en la calidad. En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales que a pesar de ser alimentadas con una tensión senoidal absorben una corriente no senoidal. Por lo tanto, se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de corrientes que inyectan armónicos a la red.

En la Figura 2.1 se muestra el comportamiento de las cargas lineales, las cuales no generan distorsión en la forma de onda, estas cargas son: inductancias, resistencias y capacitores. Las principales fuentes de distorsión de la forma de onda son los componentes basados en electrónica de potencia tales como convertidores y rectificadores. En la Figura 2.2 se muestran las cargas que generan armónicos.

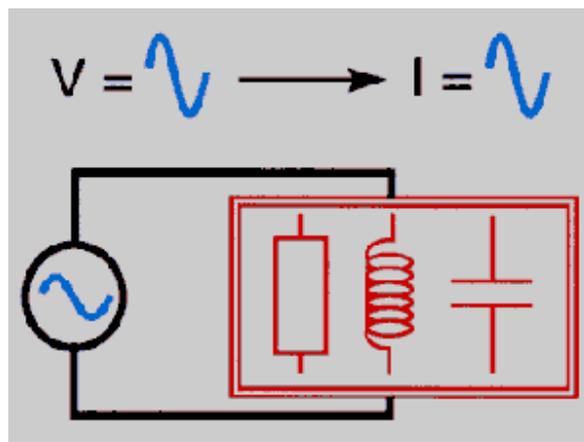


Figura 2.1 Cargas que no generan armónicos.

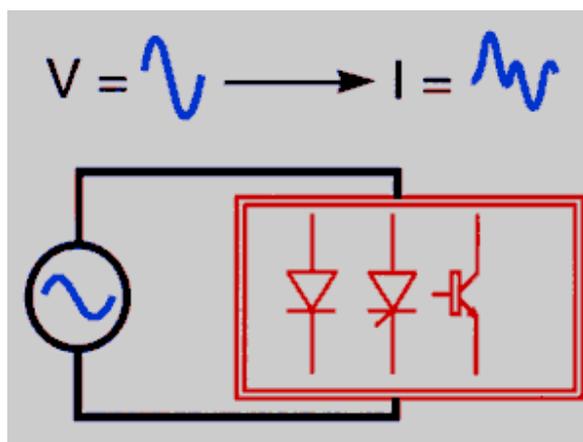


Figura 2.2 Cargas no lineales que generan armónicos.

2.2 Efecto de los armónicos.

El impacto más significativo que tiene los armónicos sobre las redes industriales se refleja en las llamadas pérdidas por efecto Joule, que se caracteriza por el calentamiento de los elementos del sistema. Además, puede provocar que el control y monitoreo de los equipos de medición registren parámetros de manera inadecuada. Adicionalmente, los armónicos pueden causar distorsión en la forma de onda del voltaje.

El mayor efecto de las corrientes y voltajes armónicos en las máquinas rotativas es el incremento del calentamiento debido a las pérdidas en el entrehierro y el cobre. Las componentes armónicas afectan la eficiencia de las máquinas y el par desarrollado por las mismas. Las corrientes armónicas en un motor dan lugar a la emisión de ruido, en comparación con la excitación senoidal la cual no presenta este problema. Esta corriente armónica también produce una distribución de flujo resultante en el entrehierro que produce problemas en motores de inducción.

Además, los armónicos aplicados en transformadores pueden resultar en un aumento de nivel de ruido audible. El efecto principal de los armónicos en los transformadores es el calentamiento producido por corrientes parásitas. Las corrientes armónicas causan pérdidas adicionales a las producidas en el cobre, mientras que los armónicos de voltaje causan un incremento en las pérdidas del hierro. El efecto global se refleja en el incremento del calentamiento en comparación con el caso puramente senoidal.

Los cables que están sujetos a niveles de corrientes armónicas están propensos a calentamientos adicionales. El flujo no senoidal en un conductor, producirá un

calentamiento adicional por encima de lo esperado bajo condiciones nominales. Esto se debe al fenómeno conocido como efecto piel o de proximidad, los cuales varían como una función de la frecuencia, así como también, del tamaño del conductor. Como resultado de estos dos efectos, la resistencia efectiva de corriente alterna se eleva por encima de la resistencia de corriente directa, especialmente para conductores grandes.

El mayor interés que surge del uso de capacitores en un sistema de potencia es la posibilidad de resonancia en el sistema. Este efecto provoca voltajes y corrientes que son considerablemente mayores a los que serían para el caso sin resonancia. La reactancia de un banco de capacitores disminuye con la frecuencia, y de esta manera actúa como un amplificador para corrientes armónicas mayores. Este efecto aumenta las tensiones dieléctricas y el calentamiento en el capacitor. Como resultado del incremento del calentamiento y la tensión de los voltajes ocasionados por las armónicas se presenta la disminución de la vida útil del capacitor.

Los equipos electrónicos pueden ser susceptibles a los efectos de la distorsión armónica. Estos equipos pueden ser afectados debido a la inclusión de armónicos, a través del suministro de potencia al equipo o por medio del acoplamiento magnético de los armónicos en las componentes del equipo. Las computadoras y los equipos asociados a ellas, tales como los controladores programables, frecuentemente requieren de fuentes de corriente alterna que no poseen más de 5% del factor de distorsión del voltaje armónico. Niveles mayores de armónicos provocan un mal funcionamiento del equipo en ocasiones imperceptible, lo cual puede, en algunos casos traer consecuencias serias. Los instrumentos pueden ser afectados de manera similar, dando datos erróneos de modo impredecible.

Las mediciones e instrumentos son afectados por los componentes armónicos, particularmente si existen condiciones resonantes que provocan altos voltajes y corrientes armónicas.

Al igual que otro tipo de equipos, las corrientes armónicas pueden aumentar el calentamiento y las pérdidas en mecanismos de control, reduciendo la capacidad de transporte de corriente y acortando la vida de algunos componentes de aislamiento. Los fusibles pueden reducir su capacidad debido al calor generado por los armónicos durante las operaciones normales. En general, los niveles armónicos que se requieren para causar

una mala operación de los relevadores son mayores que los niveles recomendados por los estándares [IEEE 1992].

2.3 Formulación para el cálculo de los armónicos.

Una función periódica $f(t)$ pueden representarse por medio de la serie de Fourier, con la suma de componentes senoidales que tienen diferentes frecuencias. En (2.1) se muestra la serie trigonométrica de Fourier [Mohan et al. 1995],

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(hwt) + b_h \text{sen}(hwt)\} \quad (2.1)$$

en donde

$$a_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(hwt) d(wt) \quad b_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \text{sen}(hwt) d(wt)$$

$$h = 1, \dots, \infty$$

El cálculo del factor de distorsión armónica total de la corriente (THD) se define de la siguiente manera,

$$\%THD_i = 100 * \sqrt{\sum_{h \neq 1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (2.2)$$

de forma similar para el voltaje

$$\%THD_v = 100 * \sqrt{\sum_{h \neq 1}^{\infty} \left(\frac{V_h}{V_1}\right)^2} \quad (2.3)$$

2.4 Análisis armónico del voltaje.

A continuación se muestra el análisis armónico de cada uno de los transformadores de la red de distribución de ciudad universitaria. Este análisis contiene el diagrama de tiempo del THD de voltaje, así como también el espectro armónico del evento más crítico durante el periodo de muestreo. Este análisis permitirá conocer los armónicos predominantes en la red universitaria.

La Tabla 2.1 muestra el calendario de las mediciones realizadas en cada uno de los transformadores de la red de distribución de ciudad universitaria.

Tabla 2.1 Calendario de mediciones.

Transformador	Capacidad en kVA	Edificios	Fecha de medición
T1	112.5	A, B, M, R, T, RADIO	20/02/2006 al 21/02/2006
T2	112.5	C, N, L	25/01/2006 al 26/01/2006
T3	112.5	D, E, S, X, G	30/01/2006 al 31/01/2006
T5	112.5	H, F, J, K	26/01/2006 al 27/02/2006
T6	112.5	O, B1, B2, Anexo de B1	21/02/2006 al 22/02/2006
T7	112.5	RECTORIA	13/02/2006 al 14/02/2006
T8	112.5	AUDITORIO Y VESTIDORES	22/02/2006 al 23/02/2006
T9	112.5	C1, C2, C3, C4, C5	14/02/2006 al 15/02/2006 15/02/2006 al 16/02/2006
T9A			
T10	300	B3, B4, U1, U4	01/02/2006 al 02/02/2006 07/02/2006 al 08/02/2006
T10A			
T13	112.5	A1, A3, W, P, Q	23/02/2006 al 24/02/2006
T14	112.5	A2, Z, Y, BIOL, Z. GASTRONOMICO	27/02/2006 al 28/02/2006 28/02/2006 al 01/03/2006
T14A			
T15	150	HISTORIA	16/05/2006 al 17/05/2006
T16	112.5	POSGRADO DE ING. ELECTRICA Y CIVIL	11/05/2006 al 12/05/2006

Los transformadores 4, 11 y 12 no se midieron debido a que estos únicamente alimentan el sistema de riego y bombeo de la red de distribución universitaria.

Para los transformadores 9, 10 y 14 la medición se realizó en dos etapas, en las cuales se dividieron en dos grupos los diferentes circuitos que alimentan estos transformadores. Esto fue necesario ya que estos transformadores presentaron una gran cantidad de circuitos conectados en el secundario, lo cual hacía imposible realizar una sola medición con el equipo que se cuenta.

2.4.1 Transformador 1

La Figura 2.3 muestra el comportamiento del porcentaje de distorsión del voltaje en las fases A, B y C. Se observan comportamientos similares en el tiempo en cual ocurren los valores máximos y mínimos registrados en las fases A y B esto se indica en la Tabla 2.2. Los valores registrados muestran niveles adecuados de THD para el voltaje según el estándar IEEE 519, ya que no exceden el máximo nivel de distorsión armónica total, el cual es de 5% de distorsión armónica total para el voltaje.

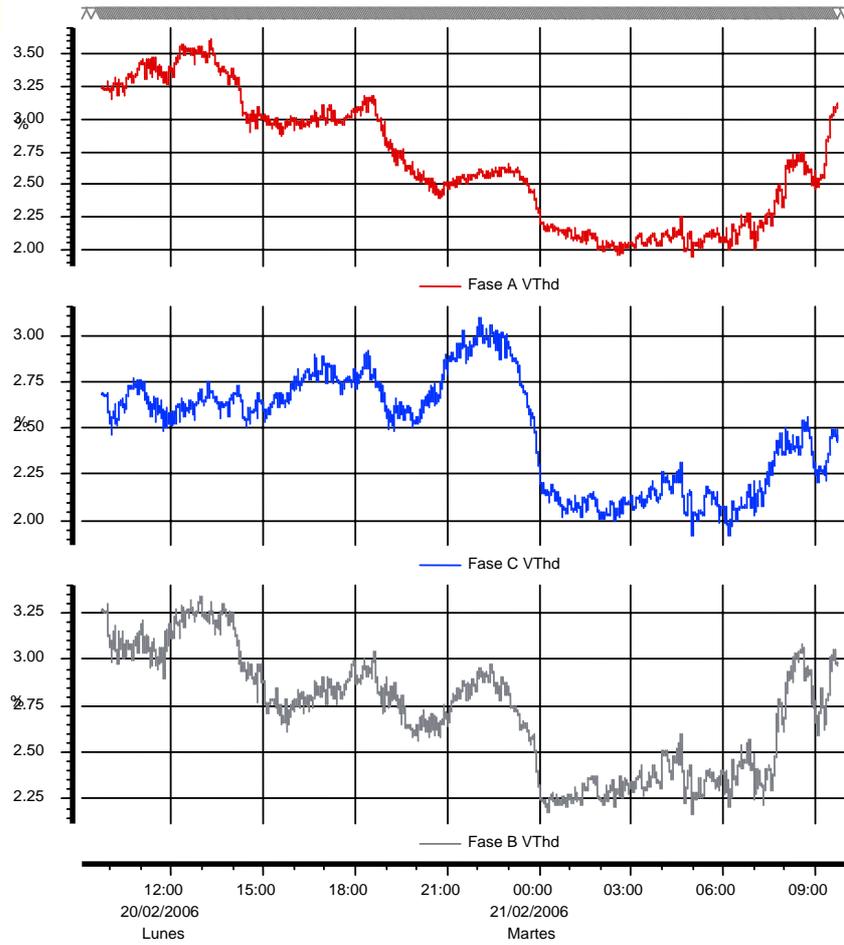


Figura 2.3 Diagrama de tiempo del %THDv del transformador 1.

Tabla 2.2 Resumen de valores críticos en %THDv del transformador 1.

		% V THD	FECHA	HORA
FASE A	MAXIMO	3,6174	20/02/2006	13:16:48
	MINIMO	1,9537	21/02/2006	4:58:48
FASE B	MAXIMO	3,3411	20/02/2006	12:56:48
	MINIMO	2,1746	21/02/2006	4:58:48
FASE C	MAXIMO	3,09538	20/02/2006	22:02:48
	MINIMO	1,92717	21/02/2006	6:10:48

En la Figura 2.4 se muestra el espectro armónico para el máximo evento ocurrido en la fase A, el día 20/02/2006 a las 13:16:48, el cual muestra valores mínimos de los armónicos tercero y quinto. Se registró un valor de distorsión de $THD = 4.601$ volts y la fundamental de $FND = 127.043$ volts. Cabe mencionar que los valores presentados en la Tabla 2.2 están en porciento de la fundamental y los resultados de la Figura 2.4 se encuentran en volts. Ambos resultados son coincidentes y relacionados mediante la expresión.

$$\%THD = 100 * \frac{THD(v)}{FND(v)} \quad (2.4)$$

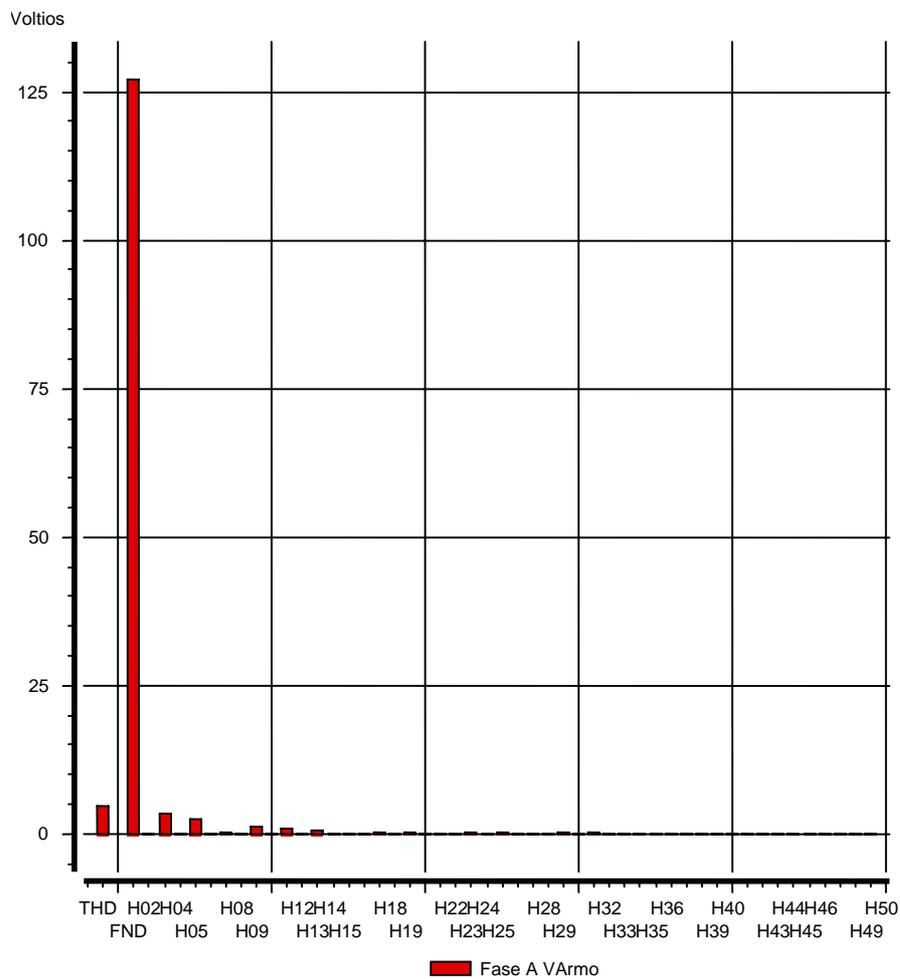


Figura 2.4 Espectro armónico del voltaje en la fase A del transformador 1.

En la Figura 2.5 se muestra el resumen del comportamiento de los valores máximos de distorsión armónica total del voltaje de cada uno de los transformadores de ciudad universitaria. Se observa que el transformador 1 es el único que alcanza un valor máximo de voltaje de 3.6174%, el cual no sobrepasa los límites establecidos por el estándar IEEE 519, los cuales son de 5% y son indicados por la línea horizontal en la Figura 2.5.

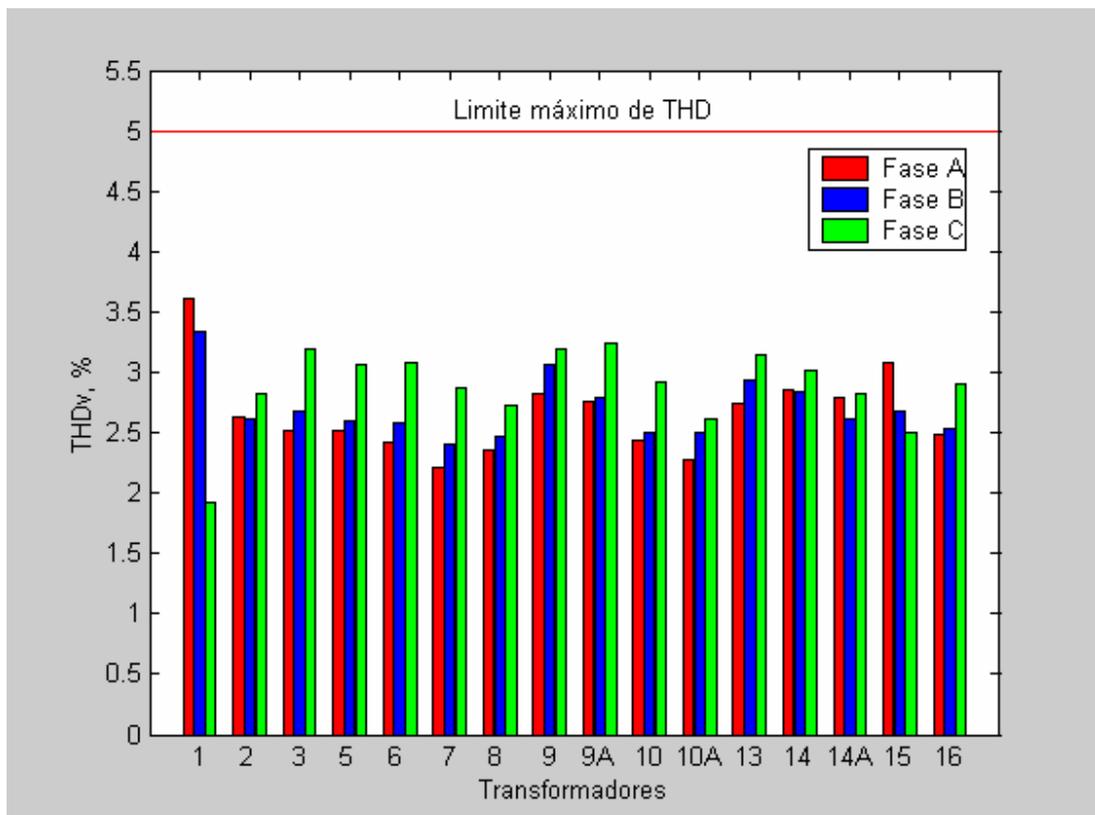


Figura 2.5 Resumen de la distorsión armónica total del voltaje %THDv.

En la Figura 2.6 se muestra el espectro armónico de los armónicos predominantes en cada uno de los transformadores. Observemos que los armónicos predominantes en la red de distribución Universitaria son el tercero, quinto y séptimo armónico. Cabe mencionar que en los transformadores 7, 8 y 14 el séptimo armónico tiene una presencia importante en comparación con los armónicos tercero y quinto.

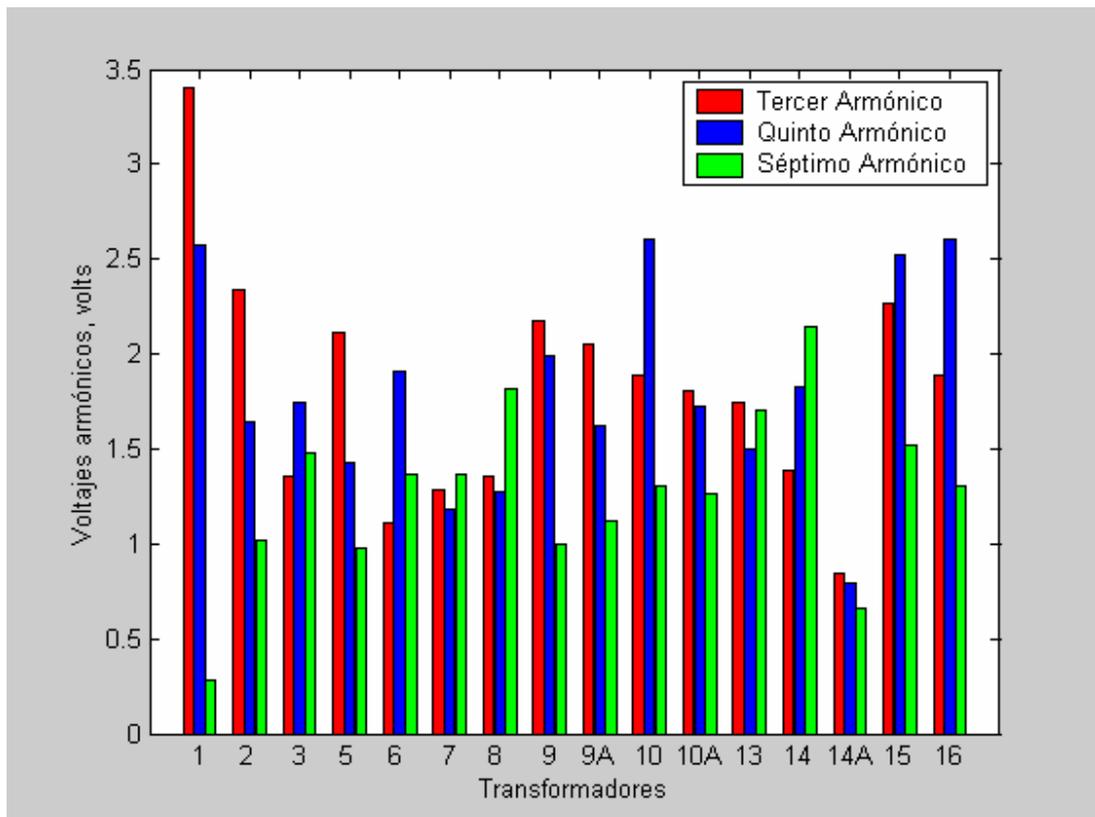


Figura 2.6 Resumen del espectro armónica del voltaje en la fase A.

2.5 Análisis armónico de la corriente.

Es importante destacar el comportamiento armónico de la corriente ya que cuando las cargas no lineales son conectadas a la red eléctrica absorben corrientes con un alto contenido armónico. Por la tanto, es importante conocer el contenido armónico de la corriente que se encuentra en la red de distribución de ciudad universitaria. De acuerdo a la carga conectada a la red de distribución el valor de la corriente de carga es de 41.4641 amperes en lado primario del circuito de media tensión, y el valor de la corriente de cortocircuito trifásico en ese punto es 2304.69 amperes. Por lo tanto, de acuerdo al estándar

IEEE 519 el valor correspondiente de % THDi el limite es del 12%, ya que $\frac{I_{CC}}{I_{CARGA}} =$

55.58

2.5.1 Transformador 1

En la Figura 2.7 se muestran los límites de distorsión armónica de la corriente, los cuales se encuentran por encima de los establecidos por la estándar IEEE 519 para el transformador 1 ya que el estándar establece un nivel de distorsión del 12% del THD. La fase A muestra que a partir de las 7:00:00 horas la distorsión comienza a incrementarse hasta las 19:00:00 horas y permanece en niveles bajos de las 20:00:00 hasta las 7:00:00 horas. En las fases B y C este comportamiento es contrario a la fase A ya que para las fases B y C existen aportaciones considerables de distorsión a partir de las 21:00:00 hasta las 7:00:00 horas. En la Tabla 2.3 se observa que los valores máximos y mínimos registrados durante el periodo de medición son en tiempos totalmente diferentes. Como se puede observar la única cercanía con relación al tiempo, es en los valores máximos, par las fases A y B.

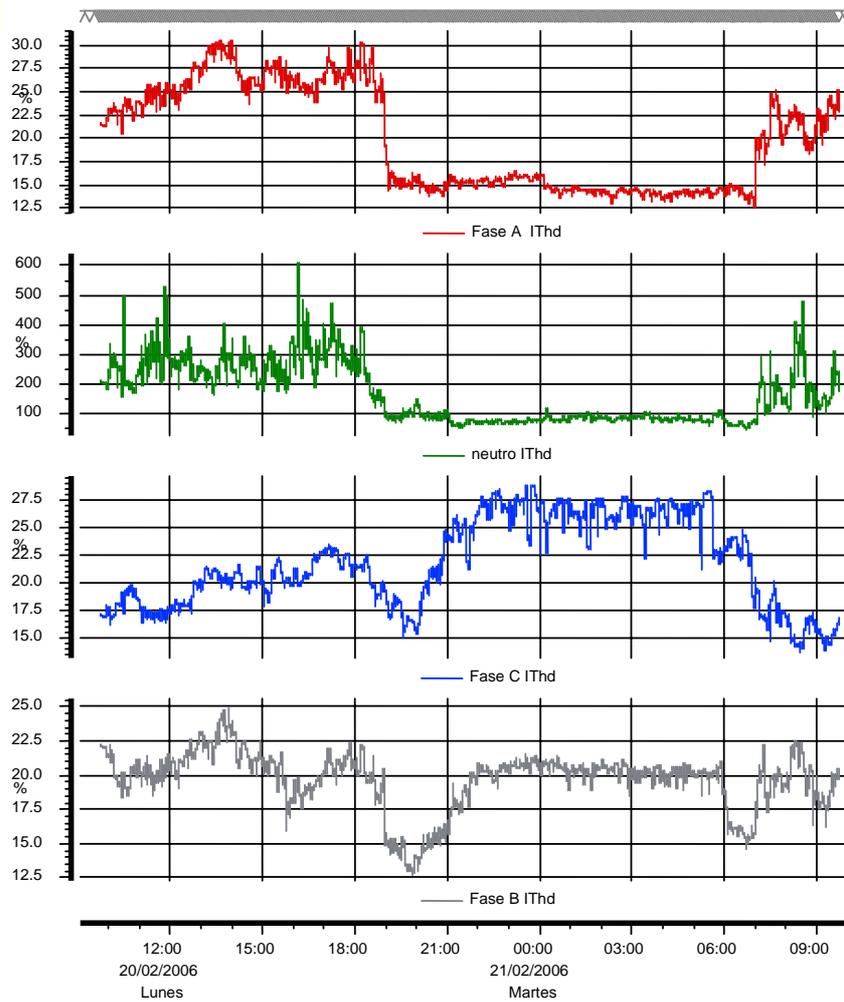


Figura 2.7 Diagrama de tiempo del % THDi transformador 1.

Tabla 2.3 Resumen de valores críticos en % THDi del transformador 1.

		% I THD	FECHA	HORA
FASE A	MAXIMO	30,6386	20/02/2006	13:36:47
	MINIMO	12,8711	21/02/2006	6:56:47
FASE B	MAXIMO	24,9848	20/02/2006	13:52:47
	MINIMO	12,9019	20/02/2006	19:52:07
FASE C	MAXIMO	28,8834	20/02/2006	23:48:48
	MINIMO	13,8956	21/02/2006	8:26:48
NEUTRO	MAXIMO	612,38	20/02/2006	16:10:47
	MINIMO	53,99	21/02/2006	6:40:48

La Figura 2.8 muestra el contenido armónico de la fase A, registrado en la Tabla 2.3. Se observa que los armónicos presentes en la red son el tercero y el quinto, el valor del THD = 79.321 y la fundamental FND = 264.761 amperes, con lo cual se indica que el valor de % THDi se encuentra muy por encima del límite de distorsión armónica. Estos valores son inadecuados para la operación de la red e involucran pérdidas adicionales en el transformador.

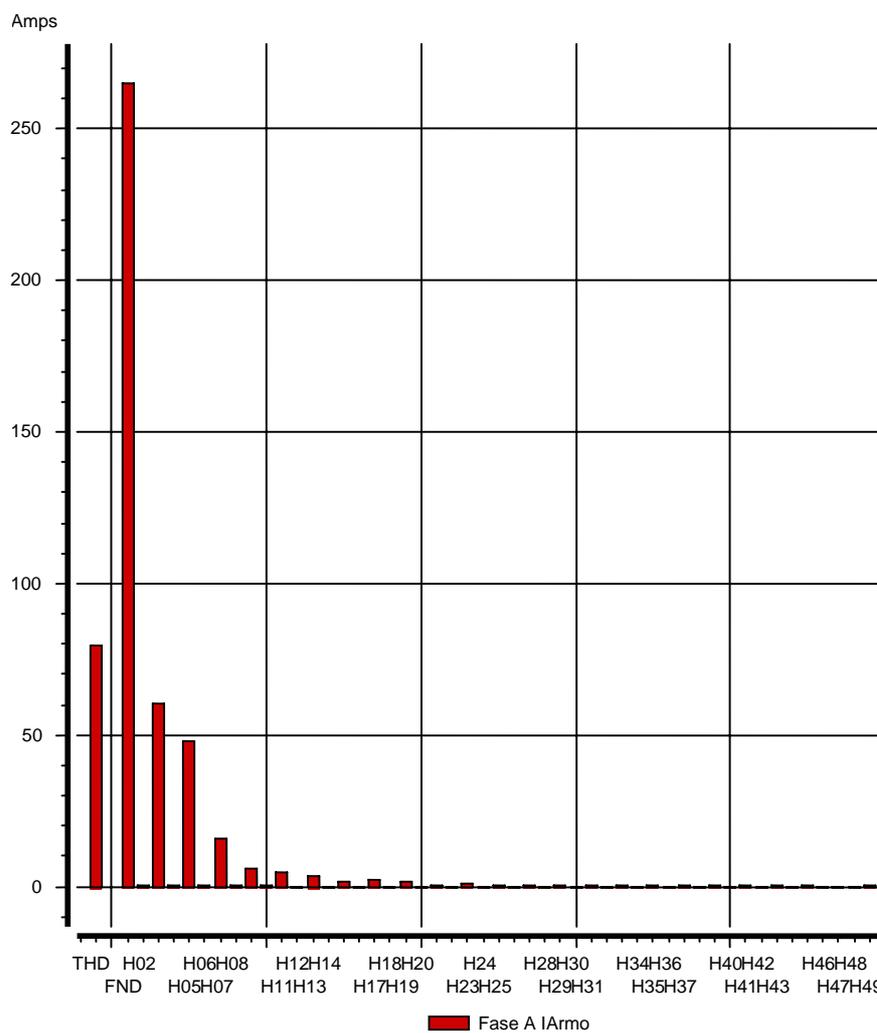


Figura 2.8 Espectro armónico de la corriente en la fase A del transformador 1.

En la Figura 2.9 se muestra el comportamiento de la distorsión armónica total de la corriente en todos los transformadores de la red Universitaria. En esta figura se indica con

la línea horizontal el nivel máximo de distorsión armónica total %THDi. Como se observa, los valores registrados para el caso de la corriente rebasan los límites establecidos por estándar IEEE 519, siendo el más crítico el de los transformadores 7 y 15.

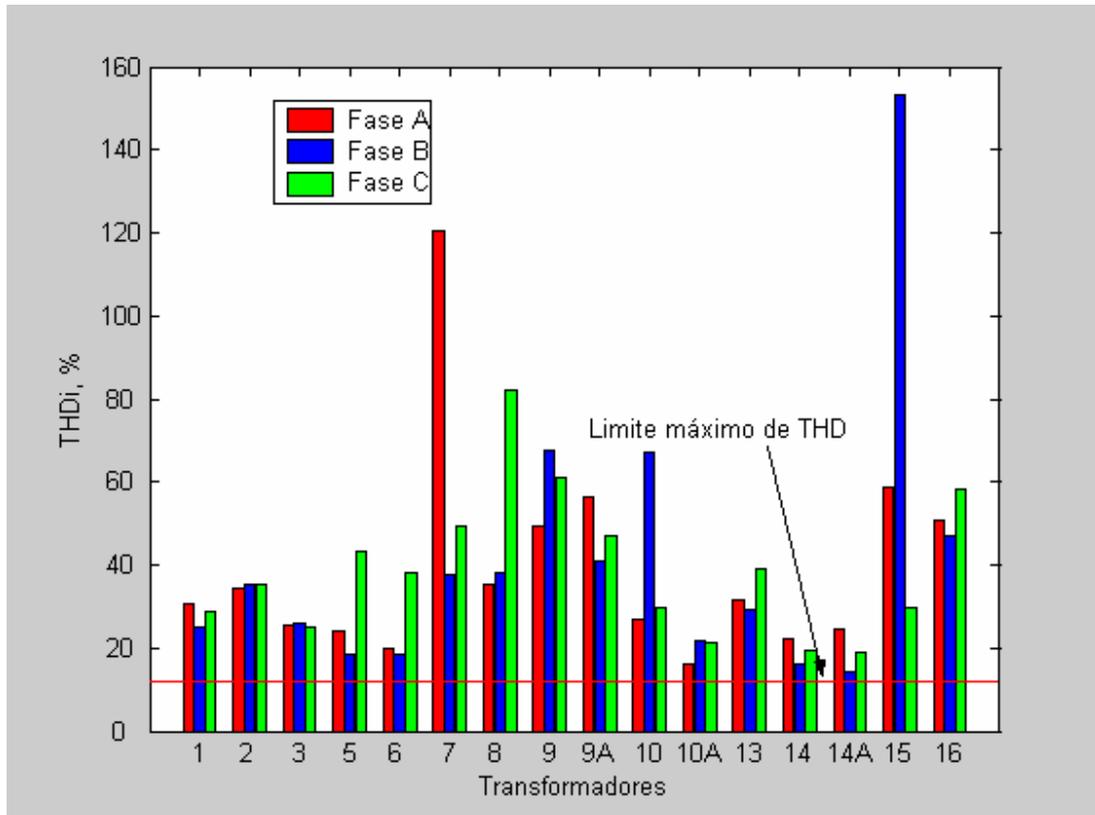


Figura 2.9 Resumen de la distorsión armónica total de la corriente %THDi.

En la Figura 2.10 se muestra el espectro armónico presente en cada uno de los transformadores. Se observa que de los armónicos predominantes en la corriente son nuevamente el tercero, quinto y séptimo. Se observa que el armónico predominante en magnitud es siempre el tercer armónico, y en los transformadores 10, 13, 14A y 15 el quinto armónico tuvo una magnitud por encima del armónico tercero. Es importante destacar que en los transformadores 5, 6, 7 y 8 presentan magnitudes mínimos de los armónicos.

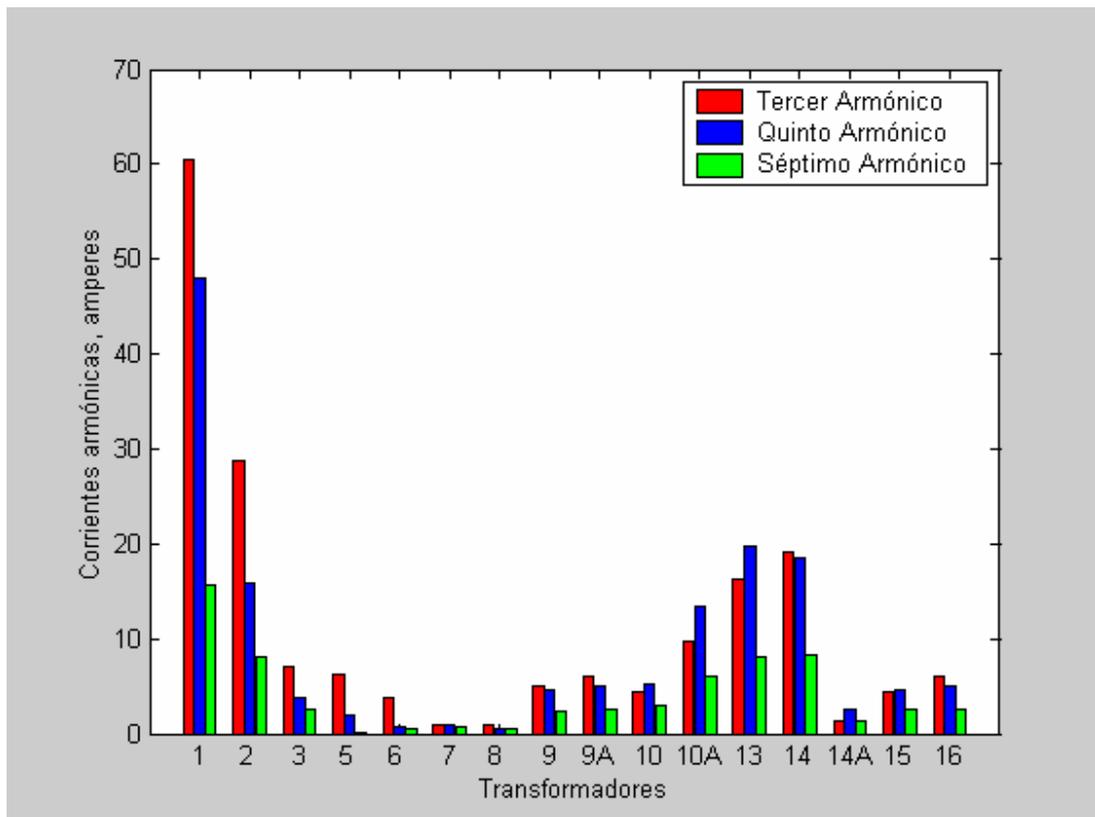


Figura 2.10 Resumen del espectro armónico de la corriente en la fase A.

2.6 Desbalance de la corriente por el neutro.

A menudo el suministro de energía en fábricas o edificios se realiza por medio de una fuente trifásica. Sin embargo, internamente la distribución de voltaje y la carga es principalmente monofásica entre una de las tres líneas de voltaje y el neutro. Esto se muestra de forma más clara en la Figura 2.11. Para el caso de las cargas lineales, si las tres fases se encuentran balanceadas respecto a la carga, entonces la corriente por el neutro es cero.

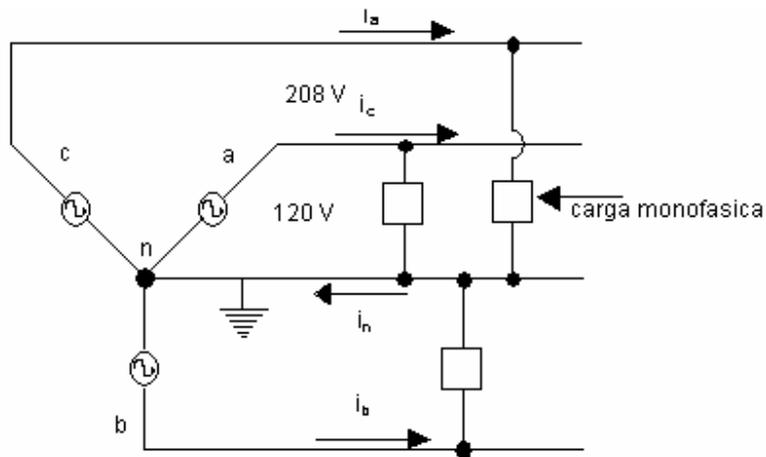


Figura 2.11 Sistema trifásico, cuatro hilos.

Considerese que una carga monofásica compuesta por un rectificador en base a diodos tiene efectos similares en cada una de las fases de un sistema trifásico. El efecto conjunto se refleja en la corriente del neutro i_n . La corriente en la fase A se describe mediante la expresión

$$i_a = i_{a1} + \sum_{h=2k+1}^{\infty} i_{ah} \quad (2.5)$$

o bien,

$$i_a = \sqrt{2}I_{s1} \text{sen}(w_1 t - \phi_1) + \sum_{h=2k+1}^{\infty} \sqrt{2}I_{sh} \text{sen}(w_h t - \phi_h) \quad (2.6)$$

donde $k = 1, 2, 3, \dots, \infty$

Asumiendo que la fuente trifásica es balanceada, las corrientes en las fases B y C están desplazadas 120° y 240° , respectivamente.

Por lo tanto

$$i_b = \sqrt{2}I_{s1} \text{sen}(w_1 t - \phi_1 - 120^\circ) + \sum_{h=2k+1}^{\infty} \sqrt{2}I_{sh} \text{sen}(w_h t - \phi_h - 120^\circ h) \quad (2.7)$$

y

$$i_c = \sqrt{2}I_{s1} \text{sen}(w_1 t - \phi_1 - 240^\circ) + \sum_{h=2k+1}^{\infty} \sqrt{2}I_{sh} \text{sen}(w_h t - \phi_h - 240^\circ h) \quad (2.8)$$

Las tres corrientes de fase se suman al neutro de tal forma que

$$i_n = i_a + i_b + i_c \quad (2.9)$$

Sustituyendo (2.6), (2.7) y (2.8) en (2.9) se tiene

$$i_n = 3 \sum_{h=3(2k-1)}^{\infty} \sqrt{2} I_{sh} \text{sen}(w_h t - \phi_h) \quad (2.10)$$

lo cual indica la presencia de armónicos múltiplos de la tercera armónica. Del resultado anterior se observa que el tercer armónico domina todos los componentes armónicos, por lo tanto, se tiene

$$I_n \approx 3I_{s3} \quad (2.11)$$

Este resultado ha llevado a cambios en los códigos de las instalaciones eléctricas, que ahora estipulan que el conductor neutro debe ser capaz por lo menos soportar tanta corriente como los conductores de línea. De hecho si la corriente de línea es altamente discontinua la corriente en el neutro puede ser tan grande como [Mohan et al. 1995],

$$I_n = \sqrt{3} I_{linea} \quad (2.12)$$

2.6.1 Transformador 1

La Figura 2.12 muestra el comportamiento de las corrientes de fase y el neutro durante el periodo de muestreo realizado en el transformador 1. La Tabla 2.4 registra el día y la hora en la cual se suscitaron los eventos más importantes. Es importante resaltar la gran cantidad de corriente por el neutro ya que de acuerdo a lo indicado en la Tabla 2.4 esta registra un valor máximo de 154 amperes, lo cual es una magnitud considerable de corriente que fluye por el neutro.

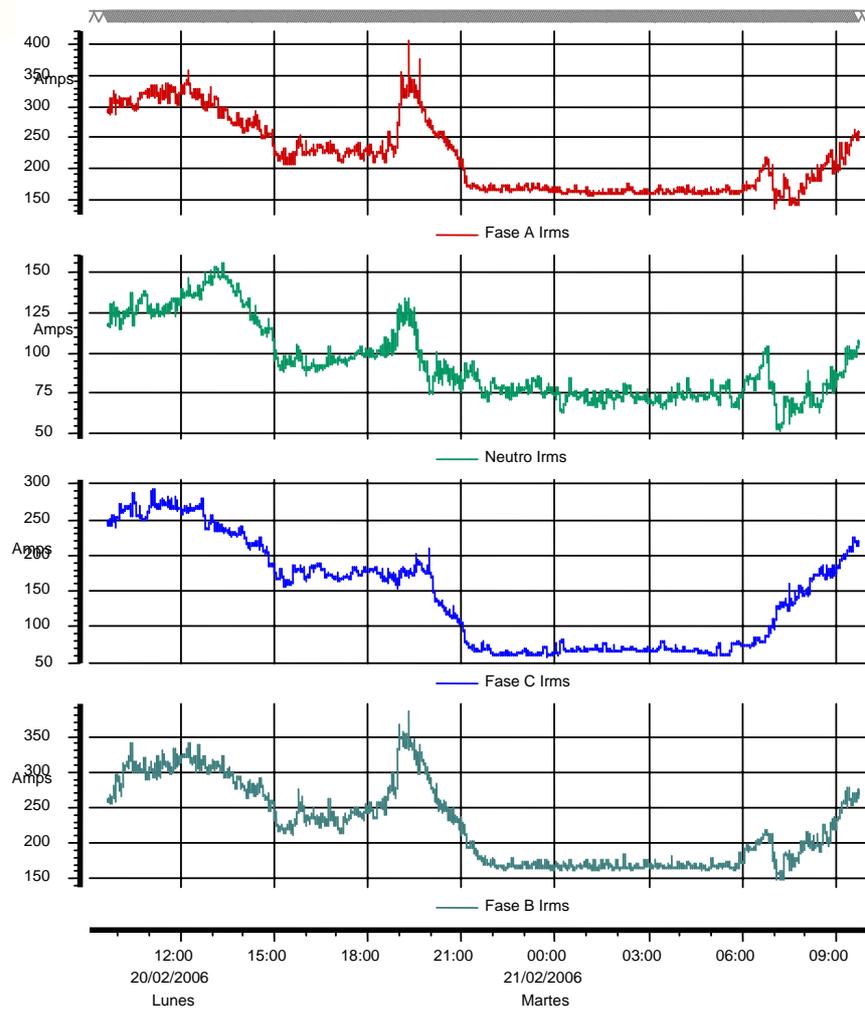


Figura 2.12 Diagrama de tiempo de la corriente en el transformador 1.

Tabla 2.4 Resumen de valores críticos de la corriente en el transformador 1.

		CORRIENTE	FECHA	HORA
FASE A	MAXIMO	407,77	20/02/2006	19:18:11
	MINIMO	138,77	21/02/2006	7:02:47
FASE B	MAXIMO	384,12	20/02/2006	19:18:11
	MINIMO	149,28	21/02/2006	7:10:47
FASE C	MAXIMO	294,734	20/02/2006	11:06:47
	MINIMO	60,789	20/02/2006	23:44:43
NEUTRO	MAXIMO	154,957	20/02/2006	13:20:47
	MINIMO	52,094	21/02/2006	7:10:47

En la Figura 2.13 se muestra el valor máximo de corriente eficaz (I_{rms}), en el cual se observa que en los transformadores 1, 2 y 9 la corriente que circula por el neutro se encuentra en niveles de corriente arriba de los 100 amperes, mientras que los demás transformadores no rebasan este nivel. Obsérvese que en el transformador 1, el nivel de corriente se encuentra por encima de los 400 amperes para la fase A. Caso contrario para el transformador 15, el cual muestra los menores niveles de corriente registrados. Los valores registrados de la corriente que circula por el neutro en cada uno de los transformadores refleja que las cargas no se encuentran distribuidas de manera adecuada.

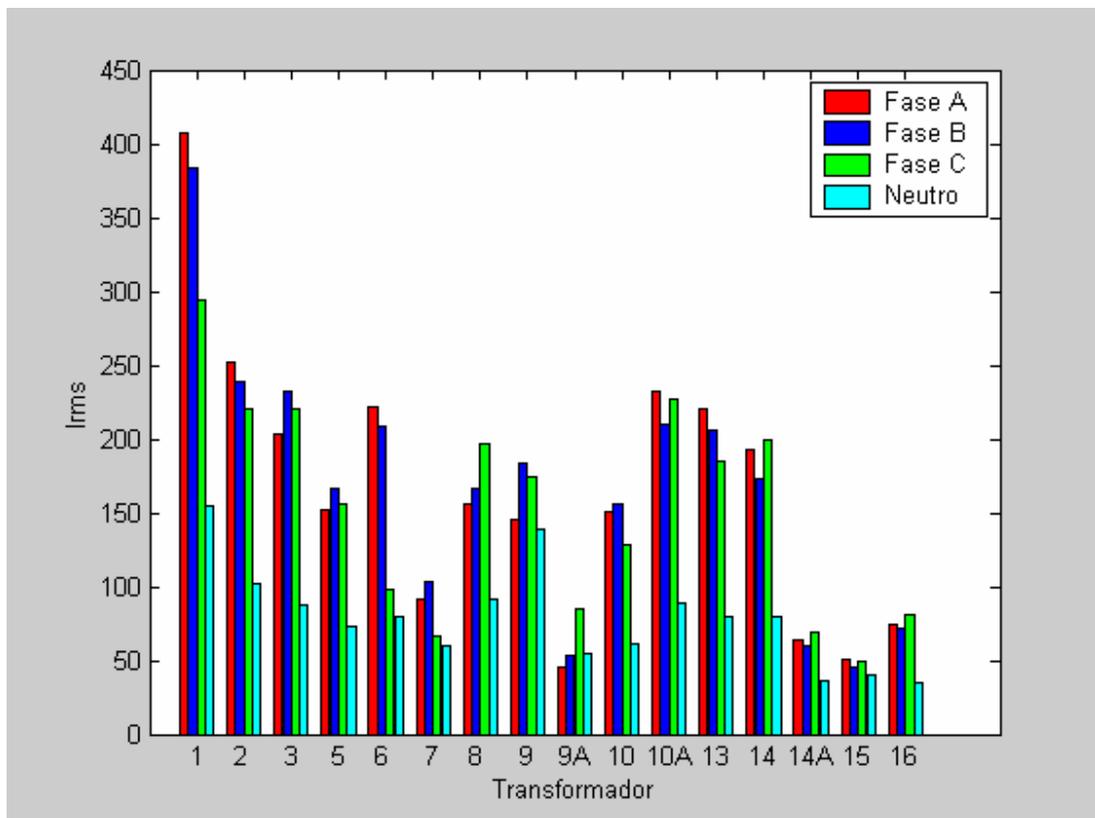


Figura 2.13 Corriente eficaz en las fases y el neutro.

2.7 Conclusiones

La contaminación por armónicos en la red de distribución de ciudad universitaria es de magnitudes considerables ya que durante las mediciones realizadas en cada uno de los transformadores se manifestó un nivel de distorsión de la corriente por encima de los límites establecidos por el estándar IEEE 519. Este problema no se presentó para el voltaje ya que de acuerdo a las mediciones realizadas con el PP4300 la distorsión para el voltaje se encuentra por debajo del estándar. El aumento de la distorsión dependerá del tiempo en el cual inicien a trabajar las cargas que generan armónicos para cada uno de los transformadores.

La contaminación afecta de manera considerable muchos de los equipos instalados en la red universitaria, ya que estos se encuentran expuestos a la propagación de los armónicos generados por cargas no lineales. Lo anterior provoca la presencia de errores en medición, interferencia en las comunicaciones y operación errónea de equipos de protección, por mencionar algunos casos.

Es de suma importancia conocer el tiempo en el cual se registran los valores máximos de distorsión. En este sentido se puede destacar las horas en las que operan los equipos que generan mayor distorsión armónica. Con dicha información es posible proponer una solución posible que permita erradicar el problema cuando se encuentren presentes estos disturbios.

La magnitud de los armónicos máximos y mínimos de distorsión dependerá del tipo de carga conectada a cada uno de los transformadores que conforman la red universitaria, esto es debido a que algunos alimentan únicamente aulas y otros alimentan laboratorios y aulas. Los armónicos predominantes en la red universitaria en la corriente de acuerdo a los resultados son: el tercero, quinto, séptimo y en algunos casos en menor se encuentran presentes el noveno y décimo primero. Es importante mencionar que por el tipo de conexión del transformador los armónicos múltiplos del tercer armónico retornan a través del neutro.

La circulación de corriente por el conductor neutro es debido principalmente a la mala distribución de cargas monofásica, razón por la cual en cada uno de los transformadores se presenta una circulación de corriente por el neutro. La magnitud y

duración de los impulsos de la corriente aumentará en mayor o menor grado la circulación de corriente en el neutro.

La Tabla 2.5 resume el estado de funcionamiento de cada uno de los transformadores, señalando con una cruz los casos en los cuales los transformadores se encuentran en condiciones no adecuadas de funcionamiento y con una paloma si están en buenas condiciones de operación. En el transformador 1 se muestran valores por encima de los nominales, ya que en las fases A y B la corriente se excede del valor nominal, siendo la corriente nominal de 295.23 amperes y excediéndose hasta 407.77 amperes en la fase A. Este comportamiento trae como consecuencia una alta circulación de corriente por el neutro.

Tabla 2.5 Resumen del funcionamiento de los transformadores.

Transformador	THD Voltaje	THD Corriente	Corriente por el neutro mayor a capacidad del conductor	Sobrecarga del transformador
T1	✓	✗	✓	✗
T2	✓	✗	✓	✓
T3	✓	✗	✓	✓
T5	✓	✗	✓	✓
T6	✓	✗	✓	✓
T7	✓	✗	✓	✓
T8	✓	✗	✓	✓
T9	✓	✗	✓	✓
T9A	✓	✗	✓	✓
T10	✓	✗	✓	✓
T10A	✓	✗	✓	✓
T13	✓	✗	✓	✓
T14	✓	✗	✓	✓
T14A	✓	✗	✓	✓
T15	✓	✗	✓	✓
T16	✓	✗	✓	✓

Capítulo 3

Factor de potencia y potencias

En este capítulo se analiza el comportamiento de la potencia real, reactiva y aparente, así como también el factor de potencia y la frecuencia del suministro eléctrico en Ciudad Universitaria. Primeramente, se presenta los antecedentes y conceptos básicos relacionados con dichos parámetros eléctricos. Posteriormente se presenta las mediciones realizadas en cada uno de los transformadores del sistema eléctrico de distribución de ciudad universitaria y su análisis correspondiente de los resultados.

3.1 Introducción

Los antecedentes del suministro de energía en sistemas trifásicos se remontan al siglo XIX. Por ejemplo, en el año de 1886 W. Stanley tenía estructurada la primera línea de corriente alterna (CA) en Great Barrington, MA. Un año después, T. A. Edison inició una campaña en contra de las aplicaciones de la CA y meses después N. Tesla patentó el motor de CA polifásico. El tema de la CA se convirtió en un asunto muy importante en las reuniones del instituto americano de ingenieros electricistas (AIEE). Los mejores electricistas de ese tiempo luchaban por encontrar el significado físico del desplazamiento de fase entre el voltaje y la corriente.

Por lo menos 15 años tuvieron que pasar antes de que los ingenieros de ese tiempo comenzaran a entender que los circuitos de CA actúan de manera diferente a los de corriente continua y aceptar el concepto de la potencia aparente y reactiva. Desde 1910 los ingenieros debatían dos tipos de definiciones acerca de la potencia aparente: el vector VA y el aritmético VA. Estas dos definiciones rinden los mismos resultados únicamente cuando el sistema es balanceado, de lo contrario, los VA aritméticos son mayores que los VA vectoriales, con sus respectivas diferencias en el factor de potencia. Los sistemas balanceados eran entendidos con facilidad, puesto que el comportamiento era similar en los

sistemas monofásicos. Sin embargo, en sistemas desbalanceados no eran aun determinados los efectos en la potencia aparente y el factor de potencia.

En 1927 C. I. Budeanu describió el primer modelo de la potencia en sistemas monofásicos con formas de onda distorsionadas. Budeanu propuso una resolución tridimensional de la potencia aparente S , la componente de potencia activa P , potencia reactiva Q y la potencia de distorsión D . La difusión de la teoría de Budeanu condujo a la necesidad de contar con una teoría unificada que englobara todas las condiciones posibles en redes de CA [Emanuel 2004].

La potencia aparente, medida en kVA, entregada por la empresa de suministro eléctrico consiste en una potencia activa medida en kW y una potencia reactiva medida en kVAR. La potencia activa o real es la potencia que realiza trabajo y la potencia reactiva es la que se relaciona con el almacenaje de energía en forma de campo magnético. La potencia reactiva se puede definir con la componente ortogonal de la potencia aparente.

$$kVAR = \sqrt{kVA^2 - kW^2} \quad (3.1)$$

La potencia reactiva tiene un papel importante en la operación de las redes eléctricas, donde debido a la mayoría de carga inductiva una gran cantidad de equipos eléctricos consumen de manera significativa la potencia reactiva, lo cual está asociado al uso de motores y transformador en la red. Todo esto trae como consecuencia un incremento de las pérdidas de energía en los sitios donde se consume. Además, el flujo de la potencia reactiva también causa caídas de voltaje excesivas. Una solución a este problema consiste en la instalación de bancos de capacitores con la finalidad de reducir los kVAR entregados por la compañía y mejorando así el factor de potencia. En este sentido, altos niveles de consumo de potencia reactiva provocan bajos niveles del factor de potencia y, por ende penalización en la facturación del suministro.

Por otra parte, la presencia de cargas no lineales como equipo electrónico, hornos eléctricos y motores de inducción generan armónicos que incrementan los valores RMS de la corriente, lo cual provoca un incremento en el consumo de los kVA y disminución del factor de potencia. Cabe mencionar que los armónicos no aumentan el consumo de los kVAR y bajo estas condiciones el uso de bancos de capacitores no es suficiente para que el

factor de potencia sea unitario. En este sentido las dos componentes ortogonales de la potencia aparente no generan suficiente información para mejorar el factor de potencia cuando los armónicos se encuentran dentro de la red eléctrica. Puesto que las cargas no lineales tienen una presencia importante en las redes eléctricas de potencia modernas, los métodos de compensación de la potencia reactiva requieren estudios considerando los armónicos en base a mediciones y análisis adecuados.

3.2 Definición de la Potencia aparente, real y reactiva

3.2.1 Condiciones senoidales.

Las siguientes expresiones son utilizadas en los sistemas eléctricos para determinar la potencia real y reactiva,

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos \theta \quad (3.2)$$

$$Q = V_{rms} I_{rms} \sin \theta \quad (3.3)$$

en donde θ es el ángulo de fase entre el voltaje y la corriente, mientras que los valores del voltaje y la corriente RMS se define como

$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

$$I_{rms} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \quad (3.5)$$

Estas expresiones satisfacen de manera adecuada el estudio de los circuitos eléctricos en condiciones senoidales de voltaje y la corriente, pero no son aplicables en casos donde estas condiciones no se cumplan. Es importante hacer notar estas consideraciones ya que algunas cargas pueden cambiar de ser casi-lineal a altamente no lineal, por lo que es importante destacar el uso de (3.2) y (3.3).

Potencia instantánea.

La potencia instantánea entregada por la fuente es el producto del voltaje y la corriente,

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (3.6)$$

donde el voltaje $v(t)$ y la corriente $i(t)$ son funciones periódicas, con periodo T_0 .

$$v(t) = v(t + T_0) \quad (3.7)$$

$$i(t) = i(t + T_0) \quad (3.8)$$

Integrando la potencia instantánea resulta la potencia promedio, la cual se relaciona directamente con la potencia suministrada por la fuente.

Potencia activa o promedio

Esta potencia es definida como la potencia instantánea consumida en un periodo T_0 ,

$$P = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} p(t) dt \quad (3.9)$$

la cual tiene unidades de watts

Valores RMS

El voltaje y la corriente RMS son definidos de la siguiente manera bajo condiciones senoidales.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} v^2(t) dt} \quad (3.10)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} i^2(t) dt} \quad (3.11)$$

Potencia aparente

La potencia aparente es definida por

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (3.12)$$

la cual tiene unidades en volts-amperes (VA)

3.2.2 Condiciones no senoidales.

Las definiciones anteriores de las potencias, valores RMS y factor de potencia son válidas para condiciones senoidales. A continuación se presenta la expresión correspondiente para condiciones no senoidales.

El voltaje y la corriente periódicos expresados por la serie compleja de Fourier.

$$v(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} V_m e^{jm\omega_0 t} \quad (3.13)$$

$$i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n e^{jn\omega_0 t} \quad (3.14)$$

Potencia activa

Sustituyendo (3.13) y (3.14) en (3.6) da como resultado.

$$p(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_m I_n e^{j(m+n)\omega_0 t} \quad (3.15)$$

Aplicando la definición de la potencia activa de (3.9) y sustituyendo en (3.15) da como resultado,

$$P = \sum_{m=-\infty}^{\infty} V_m I_{-m} \quad (3.16)$$

en donde la potencia tiene unidades de watts. Se debe observar que las operaciones integrales proporcionan un valor diferente de cero únicamente cuando $m = -n$.

Valores RMS

Usando (3.13) y como sabemos que $v^2(t)$ está dado por

$$v^2(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{m'=-\infty}^{\infty} V_m V_{m'} e^{j(m+m')\omega_0 t} \quad (3.17)$$

donde la integral de $v^2(t)$ es diferente de cero únicamente a partir de que $m = -m'$ por lo tanto el valor RMS está dado por

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{m=-\infty}^{\infty} V_m V_{-m}} \quad (3.18)$$

o bien,

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{m=-\infty}^{\infty} |V_m|^2} \quad (3.19)$$

De la misma manera para la corriente, se tiene

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=-\infty}^{\infty} |I_n|^2} \quad (3.20)$$

Cabe mencionar que cuando los armónicos son incluidos en el cálculo de los valores RMS entonces son llamados valores RMS verdaderos.

Potencia aparente

Utilizando (3.19) y (3.20) y las definiciones sobre la potencia aparente en (3.12) resulta la siguiente expresión

$$S = \sqrt{\sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} |V_m|^2 |I_n|^2} \quad (3.21)$$

Componentes ortogonales de la potencia aparente

La potencia aparente dada por (3.21) se descompone en tres componentes ortogonales con la finalidad de generar información adicional para el estudio de compensación del factor de potencia. Esto es,

$$S^2 = P^2 + Q_H^2 + D_H^2 \quad (3.22)$$

en donde el término de la potencia real está dado por (3.23)

$$P^2 = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_m I_{-n} V_n I_{-m} \quad (3.23)$$

El segundo término a la derecha de la igualdad (3.22) se llama potencia reactiva Q_H ,

$$Q_H^2 = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left(|V_m|^2 |I_m|^2 - V_m I_{-m} V_m I_{-m} \right) \quad (3.24)$$

el cual está dado por la multiplicación de voltajes y corrientes armónicos de la misma frecuencia.

El tercer término de (3.22) se llama potencia de distorsión D_H ,

$$D_H^2 = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty, |n| \neq |m|}^{\infty} \left(|V_m|^2 |I_m|^2 - V_m I_{-m} V_n I_{-n} \right) \quad (3.25)$$

el cual representa la potencia de distorsión dada por la multiplicación del voltaje y corriente armónico de frecuencias diferentes. S, P, Q_H , y D_H tienen unidades de VA, W, VAR y VAD , respectivamente. La Figura 3.1 muestra la representación geométrica de estas potencias [Acha y Madrigal 2001], en donde se puede observar que el cubo de potencia considera el efecto que provoca la potencia de distorsión.

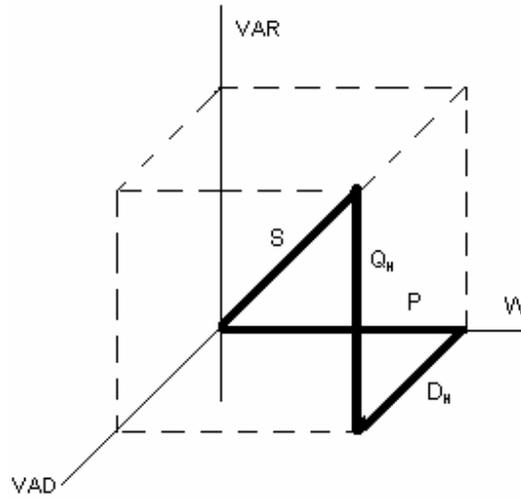


Figura 3.1 Representación del cubo de potencias.

3.3 Análisis de la potencia real, aparente y reactiva.

A continuación se presentan las gráficas de las potencias obtenidas a través de mediciones realizadas en cada uno de los transformadores que conforman la red de distribución de ciudad universitaria. Dichas mediciones tienen la finalidad de conocer el comportamiento de la potencia real, aparente y reactiva durante una ventana de medición de 24 horas.

3.3.1 Transformador 1

La Figura 3.2 indica el comportamiento de las cargas en términos de la potencia real demandada en terminales del transformador. La Tabla 3.1 presenta un resumen de los valores máximo y mínimos para la potencia activa, en donde se observa que existe un valor máximo de potencia a las 19:00:47 en la fase B. Se observa que existe mayor demanda a la hora punta y como era de esperarse las horas de menor consume de potencia se encuentran en periodos de 21:00:00 hasta las 6:00:00.

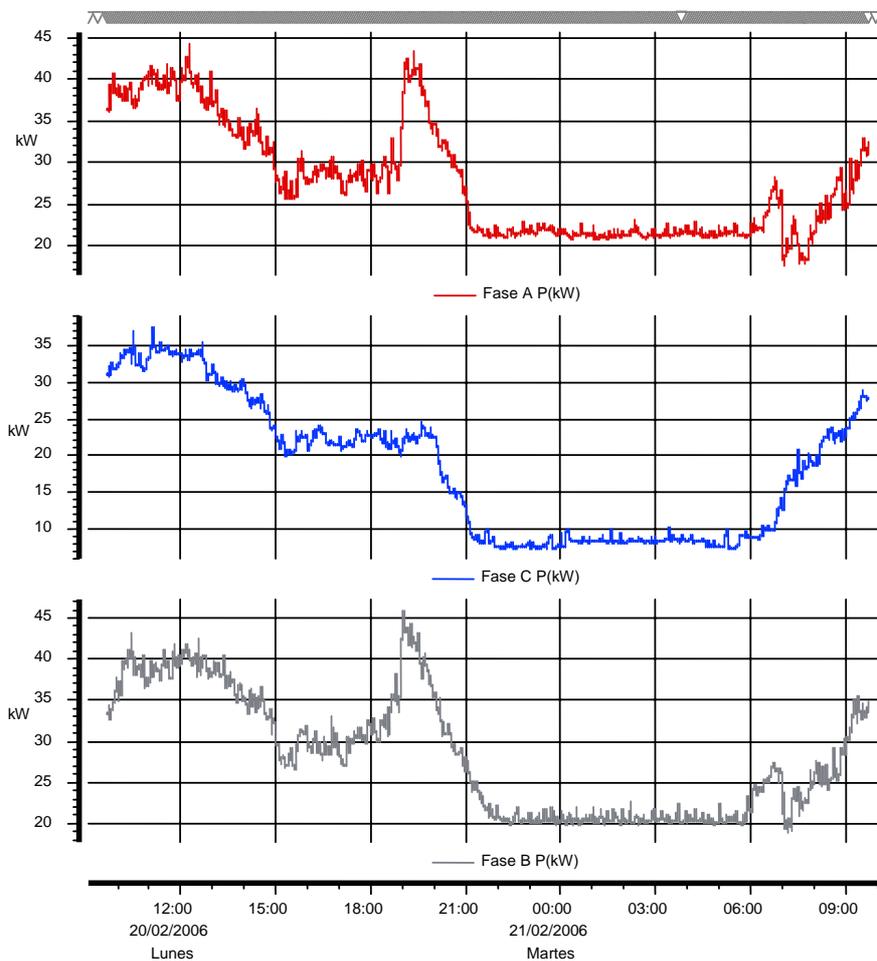


Figura 3.2 Diagrama de tiempo de la potencia real del transformador 1.

Tabla 3.1 Resumen de valores críticos de la potencia real del transformador 1.

		P. REAL (KW)	FECHA	HORA
FASE A	MAXIMO	44,333	20/02/2006	12:14:28
	MINIMO	17,742	21/02/2006	7:02:47
FASE B	MAXIMO	45,91	20/02/2006	19:00:47
	MINIMO	19,062	21/02/2006	7:10:47
FASE C	MAXIMO	37,528	20/02/2006	11:06:47
	MINIMO	7,431	20/02/2006	23:44:48

La Figura 3.3 indica el comportamiento de la potencia aparente la cual muestra el comportamiento de la carga durante las 24 horas. Se observa el mismo comportamiento

como en la potencia real. En la Tabla 3.2 se muestra el resumen de los valores máximo y mínimos registrados durante las 24 horas del muestreo.

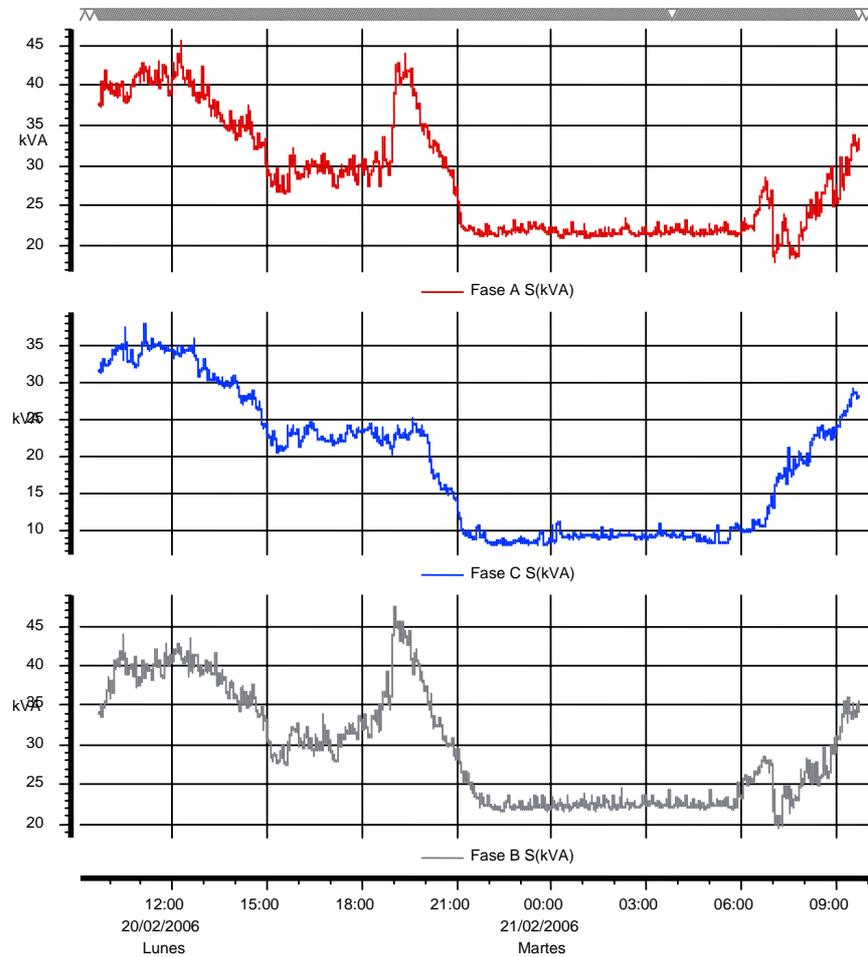


Figura 3.3 Diagrama de tiempo de la potencia aparente del transformador 1.

Tabla. 3.2 Resumen de valores críticos de la potencia aparente del transformador 1.

		P. APARENTE (KVA)	FECHA	HORA
FASE A	MAXIMO	45,603	20/02/2006	12:14:48
	MINIMO	18,15	21/02/2006	7:02:47
FASE B	MAXIMO	47,505	20/02/2006	19:00:47
	MINIMO	19,679	21/02/2006	7:10:47
FASE C	MAXIMO	38,088	20/02/2006	11:06:47
	MINIMO	8,108	20/02/2006	22:06:47

La Figura 3.4 muestra el comportamiento de la potencia reactiva para el intervalo de muestreo de 24 horas. Esta figura indica que para la fase A aparentemente se tienen lapsos de tiempo en los que existe una contribución de reactivos a la red. Sin embargo, este comportamiento no se puede atribuir a la presencia de un elemento capacitivo cuya capacidad en kVAR permita variar la potencia reactiva en el transformador de 7.5 kVAR a -7.5kVAR aproximadamente. Además, llama la atención que este comportamiento se presente exclusivamente en la fase A. Por lo tanto, las mediciones registradas en la Figura 3.4 para la fase A que muestra valores negativos de kVAR., en realidad representa valores positivos de kVAR. La presencia de este signo negativo en la medición es errónea y se le atribuye exclusivamente al medidor PP4300. En la Tabla 3.3 se indica la magnitud mínima así como también la hora en la cual se suscito este evento.

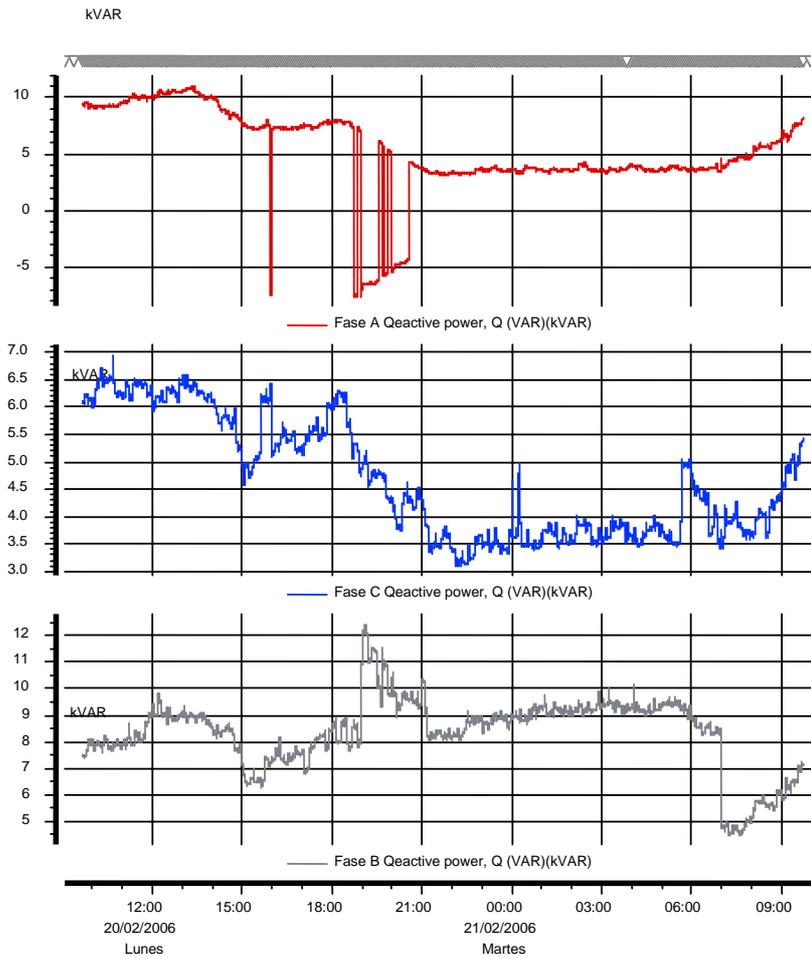


Figura 3.4 Diagrama de tiempo de la potencia reactiva del transformador 1.

Tabla 3.3 Resumen de valores críticos de la potencia reactiva del transformador 1.

		P. REACTIVA (KVAR)	FECHA	HORA
FASE A	MAXIMO	11,0198	20/02/2006	13:16:48
	MINIMO	-7,5406	20/02/2006	18:56:47
FASE B	MAXIMO	12,4255	20/02/2006	19:04:48
	MINIMO	4,5171	21/02/2006	7:12:47
FASE C	MAXIMO	6,9462	20/02/2006	10:40:48
	MINIMO	3,1193	20/02/2006	22:14:28

3.3.1.1 Análisis del signo de la potencia reactiva

A continuación se presentan dos casos de estudio en el transformador 1, el cual alimenta los edificios A, B, M, R, T, RADIO. Estos análisis se presentan para verificar el valor negativo de la potencia reactiva que aparece en la Figura 3.4

En la Figura 3.5 se muestra el diagrama de flujo que describe el procedimiento para realizar el cálculo de los diferentes parámetros a partir de los datos en el tiempo del voltaje y la corriente proporcionados por la medición.

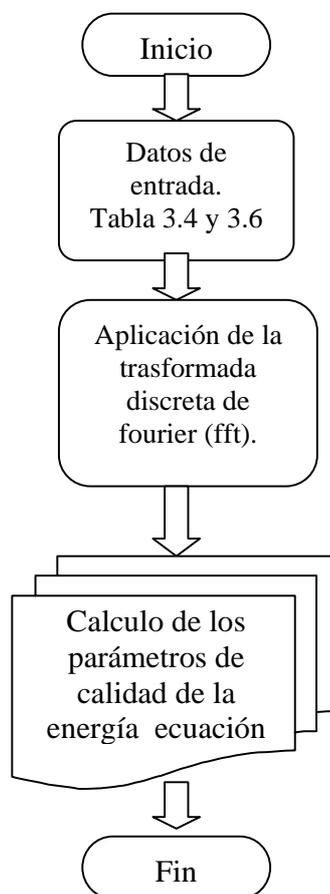


Figura 3.5 Diagrama de flujo para el cálculo de los parámetros de calidad de la energía.

Primer caso de estudio. Potencia reactiva sin signo negativo.

En la Figura 3.6 se muestra un acercamiento al diagrama de tiempo de la potencia reactiva, de la Figura 3.4 para el transformador 1. En esta figura se observa que el Dran-View no reporta un valor negativo en dicha potencia.

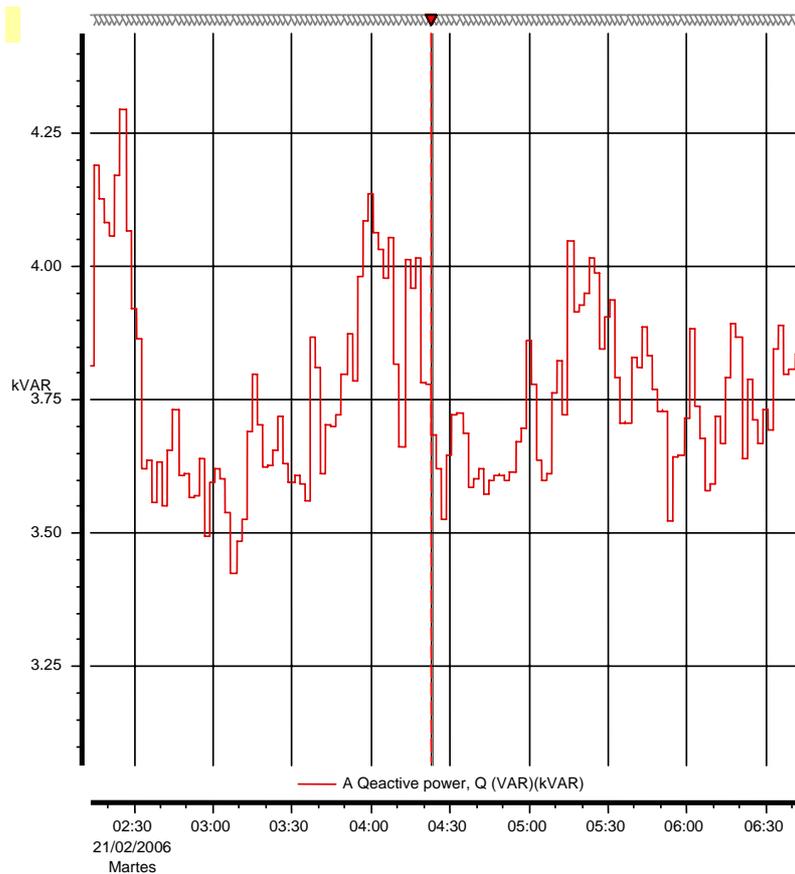


Figura 3.6. Punto de análisis de la potencia reactiva positiva en el transformador 1.

Considerando el punto marcado en la Figura 3.6, el cual se presenta el día 21/02/2006 a las 4:22:47 con una magnitud de potencia reactiva de 3.6854kVAR, en la Figura 3.7 se muestra la forma de onda instantánea del voltaje y la corriente en dicho punto.

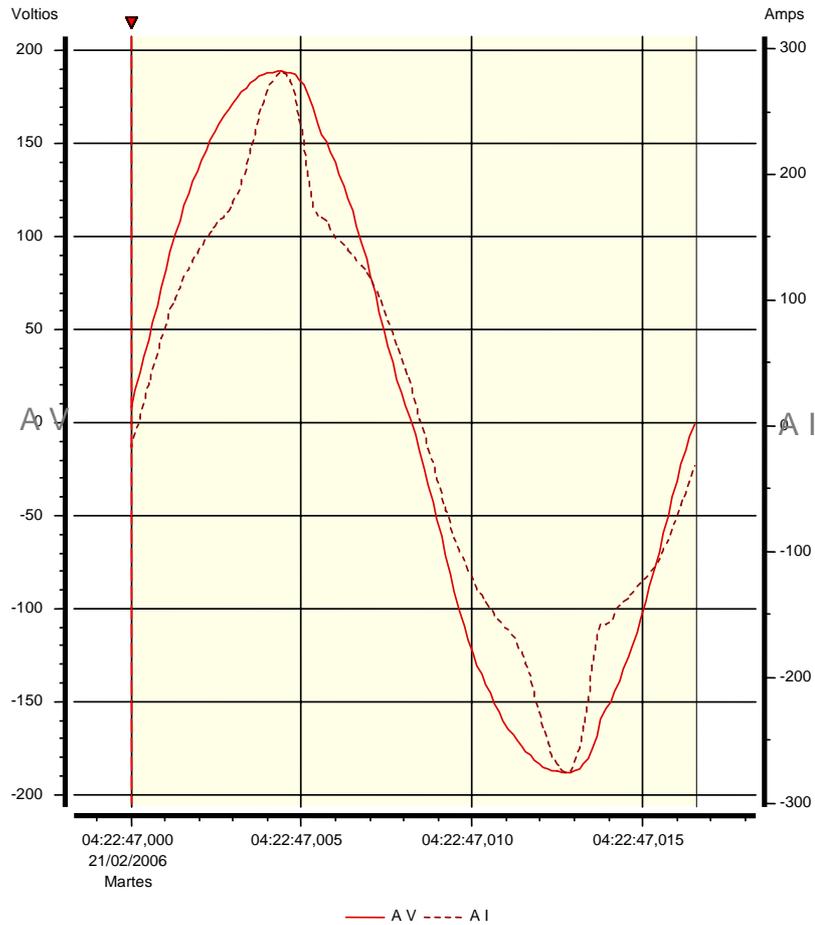


Figura 3.7. Forma de onda del voltaje y la corriente (reactivos positivos).

A continuación se muestran en la Tabla 3.4 los datos en el tiempo que conforman la forma de onda de la Figura 3.7. Los valores que se muestran en esta tabla son los valores medidos por el equipo PP4300, los cuales utilizara el programa Dran-View para determinar los parámetros de las potencias, factor de potencia y THD. Partiendo de estos mismos datos se verificará los cálculos realizados por el programa Dran-View con respecto a los resultados que se obtienen a partir de la formulación matemática correspondiente.

Tabla 3.4 Datos de la forma de onda del voltaje y la corriente.

v	i	v	i	v	i	V	i
8,013	-16.61	188,364	275.40	-6,007	18.05	-187,367	-268.88
17,531	-4.32	188,865	279.72	-15,029	5.05	-187,868	-273.95
26,547	7.21	188,865	281.90	-24,547	-5.77	-187,868	-275.40
35,570	19.50	188,364	279.72	-33,563	-17.34	-187,868	-273.95
44,084	32.52	187,868	273.95	-42,580	-30.34	-186,865	-267.43
53,602	45.52	186,865	263.11	-52,098	-43.36	-185,862	-256.59
63,120	57.81	184,859	247.19	-61,616	-55.65	-183,855	-240.69
72,638	69.38	181,855	224.80	-71,635	-67.94	-180,852	-217.57
82,156	80.94	176,845	198.04	-81,654	-78.78	-175,842	-190.81
91,674	91.06	169,328	174.92	-91,178	-88.91	-168,325	-167.68
100,696	101.19	160,312	166.24	-100,696	-99.01	-159,308	-158.29
108,709	109.85	154,800	166.24	-109,211	-107.69	-153,797	-158.29
116,729	118.53	150,794	163.34	-117,224	-115.64	-149,790	-156.13
123,739	125.03	145,784	156.13	-123,739	-122.87	-144,781	-148.90
129,752	131.55	139,771	149.61	-130,253	-128.66	-138,768	-142.40
135,764	138.05	133,257	146.00	-135,263	-135.16	-132,259	-139.50
140,774	143.11	127,244	143.84	-140,774	-140.21	-126,247	-137.32
146,285	148.90	120,735	140.21	-145,784	-146.00	-120,234	-133.71
151,797	153.95	113,719	135.87	-151,295	-150.34	-113,218	-129.37
156,305	159.02	105,706	130.82	-155,803	-155.40	-105,204	-125.03
160,813	163.34	96,690	127.21	-160,312	-159.74	-96,690	-121.43
165,321	166.24	88,169	122.87	-164,820	-162.63	-87,667	-117.82
168,325	171.31	79,153	116.37	-167,829	-166.97	-78,651	-112.03
171,836	177.81	69,133	109.14	-170,833	-173.47	-69,133	-105.53
175,341	185.04	59,114	101.19	-174,338	-180.70	-59,114	-98.30
177,849	194.44	49,596	93.22	-176,845	-189.36	-49,596	-90.35
180,350	205.99	40,579	83.83	-179,347	-200.94	-40,078	-81.67
182,858	219.73	32,059	73.72	-181,855	-213.94	-31,056	-72.28
184,859	233.46	23,544	63.60	-183,855	-228.41	-22,541	-62.88
186,363	246.48	16,026	54.92	-185,360	-240.69	-14,528	-53.47
187,367	257.32	9,016	45.52	-186,363	-252.27	-7,512	-44.07
187,868	267.43	2,000	32.52	-186,865	-261.66	-0.496	-31.07

A continuación se hace uso de la formulación para obtener el cálculo de los parámetros de calidad de energía a partir de las ecuaciones definidas en este capítulo. Estas ecuaciones se utilizarán para verificar los valores reportados por el programa que acompaña al medidor y comprobar dichos resultados.

En la Tabla 3.5 se muestra la comparación de los resultados que se obtienen con el programa Dran-View y los calculados a partir de las ecuaciones (2.2) a (2.3) y (3.22) a (3.24). Estos resultados son obtenidos partiendo de los datos de la Tabla 3.4. La segunda columna de la Tabla 3.5 muestra los resultados del Dran-View y la tercera columna indica los resultados utilizando la formulación matemática.

Tabla 3.5. Comparación de los resultados (reactivos positivos).

Parámetro	Valores con el Dran-View	Valores calculados a partir de las formulas
P. Real	21.230 kW	21.160 kW
P. Aparente	21.548 kVA	21.477 kVA
P. Reactiva	3.6854 kVAR	3.6765kVAR
F.P	0.98525	0.9852
THDi	14.3446	14.4515
THDv	2.1671	2.1870

En este caso, el cual se considera un punto tomado en la Figura 3.4 en el cual no existe cambio de signo, se puede observar que los resultados mostrados en la Tabla 3.5 son muy semejantes. Con esto se confirma que los resultados calculados por el programa del medidor son confiables y son prácticamente iguales a los calculados por medio de la formulación correspondiente.

Segundo caso de estudio. Potencia reactiva con signo negativo

A continuación se presenta el segundo caso de estudio, en el cual el programa Dran-View ha reportado un signo negativo en la potencia reactiva, lo cual se podría malinterpretar como aportación de reactivos de la red de distribución de Ciudad Universitaria hacia el sistema. En la Figura 3.8 se muestra un acercamiento a un instante de tiempo en la Figura 3.4, en el cual se observa un valor negativo en la potencia reactiva, el cual fue calculado por el Dran-View.

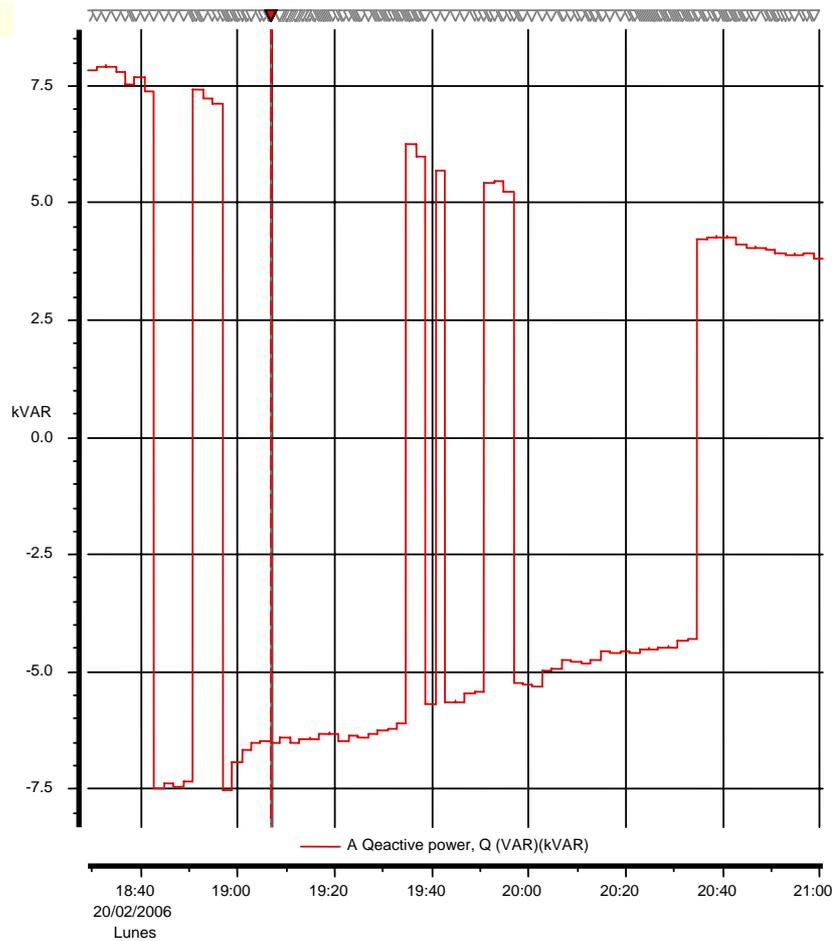


Figura 3.8. Punto de análisis de la potencia reactiva negativa en el transformador 1.

Considerando el punto marcado en la Figura 3.8, el cual se presenta el día 20/02/2006 a las 19:06:48 con una magnitud de potencia reactiva de -6.5075, en la Figura 3.9 se muestra la forma de onda instantánea del voltaje y la corriente correspondientes a dicho punto.

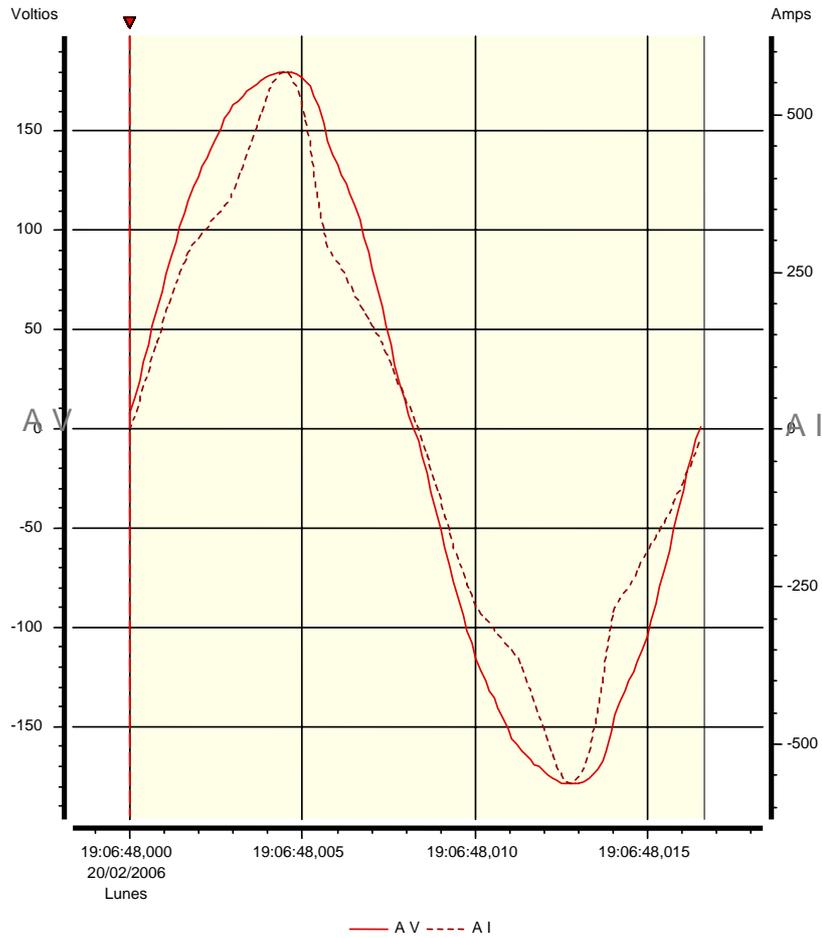


Figura 3.9. Forma de onda del voltaje y la corriente (reactivos negativos)

A continuación se muestran los datos en el tiempo que conforman la forma de onda de la Figura 3.9. Los valores que se muestran a continuación en la Tabla 3.6 son los valores medidos por el equipo PP4300, con el cual el programa Dran-View realiza su análisis para determinar todos los parámetros como potencias, factor de potencia y THD. Partiendo de estos mismos datos, se obtendrán los resultados correspondientes aplicando las expresiones matemáticas (2.2) a (2.3) y (3.22) a (3.24).

Tabla 3.6. Datos de la forma de onda del voltaje y la corriente.

v	i	v	i	v	i	v	i
7,512	0.71	178,846	554.40	-6,007	2.16	-178,344	-548.61
15,525	23.84	179,347	564.53	-13,524	-19.50	-178,846	-558.74
24,046	46.26	179,849	568.13	-22,541	-43.36	-178,846	-563.08
33,563	69.38	179,849	566.69	-32,059	-66.49	-178,846	-560.90
42,580	91.80	179,347	558.03	-41,075	-88.91	-178,846	-552.24
51,596	116.37	178,846	543.56	-50,599	-113.48	-177,849	-537.77
60,618	140.95	177,347	521.14	-59,615	-138.05	-176,344	-515.38
69,133	165.52	175,341	491.52	-68,632	-162.63	-174,338	-486.46
78,149	188.65	172,337	453.92	-77,146	-186.47	-171,836	-448.15
86,169	210.33	167,829	407.66	-85,667	-208.17	-167,328	-402.61
94,182	229.85	162,318	358.51	-94,182	-227.67	-161,816	-352.73
101,699	248.64	153,797	313.71	-101,699	-245.75	-152,794	-307.92
108,709	265.98	144,781	289.13	-108,208	-263.82	-143,778	-281.90
115,224	281.90	138,266	275.40	-115,224	-279.72	-137,269	-268.16
121,738	294.90	132,755	265.27	-121,237	-292.02	-131,758	-258.03
127,244	304.31	128,247	255.14	-126,748	-301.42	-127,244	-248.64
131,758	311.52	123,237	243.59	-131,758	-308.63	-122,735	-237.09
136,266	319.47	118,227	229.12	-135,764	-316.60	-117,726	-222.62
140,774	327.44	112,214	213.94	-140,273	-325.26	-111,719	-208.17
145,784	337.55	105,204	200.20	-145,784	-333.94	-104,703	-194.44
151,295	346.23	97,185	187.20	-150,794	-343.33	-96,690	-181.42
156,305	354.17	88,671	175.63	-155,803	-350.57	-88,169	-170.58
159,810	363.57	80,156	164.08	-158,807	-359.96	-79,654	-159.02
162,819	379.48	71,139	151.79	-161,816	-374.41	-70,638	-146.71
164,820	398.27	61,616	137.32	-163,817	-393.22	-61,114	-132.27
167,328	418.51	51,596	120.69	-166,324	-413.45	-51,094	-117.09
169,829	438.74	42,078	104.09	-168,826	-433.69	-40,579	-99.75
171,836	459.00	32,059	87.46	-170,331	-454.65	-31,056	-83.12
173,334	480.68	22,541	70.10	-172,839	-476.34	-21,538	-65.78
175,341	503.09	14,528	53.47	-174,338	-498.02	-13,023	-49.86
176,845	522.59	7,010	38.31	-175,842	-517.54	-5,010	-34.68
177,849	539.95	0.496	21.68	-177,347	-534.88	06,480	-18.05

En la Tabla 3.7 se muestra la comparación de los resultados que se obtienen del software Dran-View y los calculados a partir de las ecuaciones. La primera columna muestra los datos los cuales arroja el Dran-View y la segunda columna son los datos calculados utilizando la formulación mostrada anteriormente.

Tabla 3.7 Comparación de los resultados (reactivos negativos).

Parámetro	Valores del Dran-View	Valores calculados a partir de las formulas
P. Real	41.472 kW	41.373 kW
P. Aparente	41.979 kVA	41.881 kVA
P. Reactiva	-6.5075 kVAR	6.4983 kVAR
F.P	-0.98788	0.9879
THDi	15.8756	15.9412
THDv	2.7982	2.8042

En la Tabla 3.7 se muestran los valores de las potencias, factor de potencia y distorsión total armónica. Los valores calculados a partir de las ecuaciones (2.2) a (2.3) y (3.22) a (3.24), muestran resultados prácticamente idénticos. En esta tabla se muestra que el signo de la potencia reactiva y el factor de potencia son positivos a partir de la formulación que describe el análisis de los circuitos eléctricos bajo condiciones no-senoidales.

3.3.2 Resumen del comportamiento de las potencias

En la Figura 3.10 se muestra la magnitud de potencia real registrada de cada uno de los transformadores, así como también las fases en las cuales la demanda de esta potencia es mayor. Observemos que el transformador 1 es el que presenta un nivel máximo de consumo de la potencia real en comparación con los demás transformadores. Caso contrario al transformador 15 el cual es el que presenta el nivel más bajo de la potencia real. El comportamiento de la demanda de potencia de cada uno de los transformadores dependerá de la carga instalada en sus terminales. Por ejemplo para el transformador 1 alimenta 5 edificios y las instalaciones de la radio difusora, caso contrario al transformador 15, el cual por el momento alimenta únicamente un par de edificios de aulas.

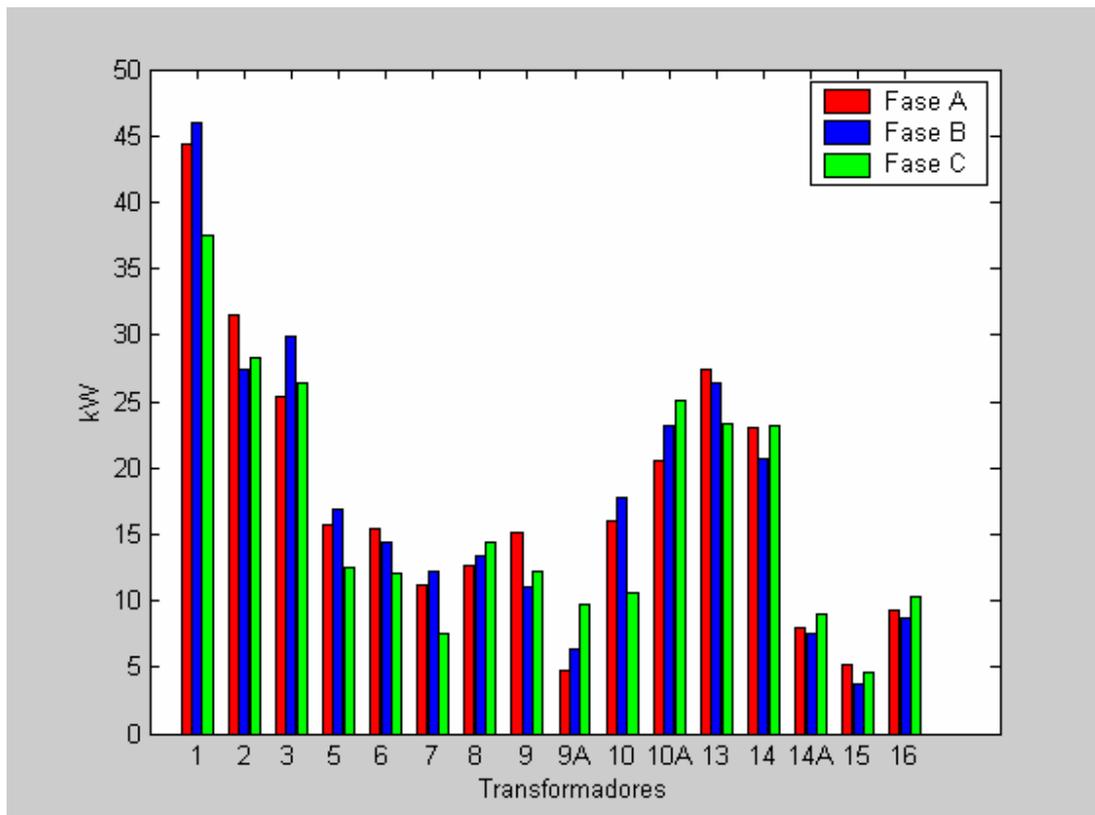


Figura 3.10 Potencia real de cada uno de los transformadores en cada una de las fases.

En la Figura 3.11 se muestra el comportamiento de la potencia aparente en cada uno de los transformadores instalados en la red de distribución de ciudad universitaria. Como se observa la Figura 3.11, muestra el mismo comportamiento que los valores de la potencia real (Figura 3.10).

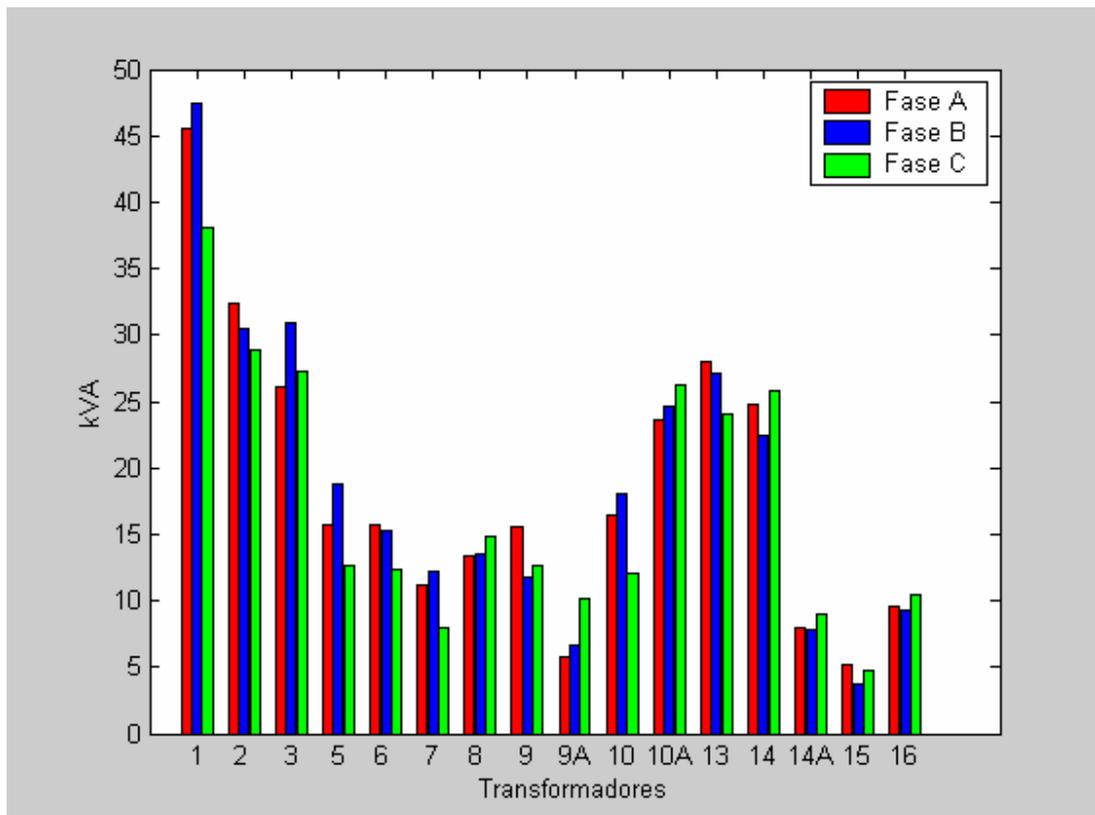


Figura 3.11 Potencia aparente de cada uno de los transformadores en cada una de sus fases.

En la Figura 3.12 se muestra el comportamiento de la potencia reactiva. Se observa que en cada uno de los transformadores el consumo de reactivos es considerable. Observemos nuevamente que el transformador 1 es la que registra el valor máximo de la potencia reactiva en comparación con los demás transformadores. Caso contrario al transformador 15, el cual registra el mínimo valor de la potencia reactiva. Es importante mencionar que la presencia de la potencia reactiva, es debido a la gran cantidad de cargas inductivas conectadas a cada uno de los transformadores de la red de distribución Universitaria.

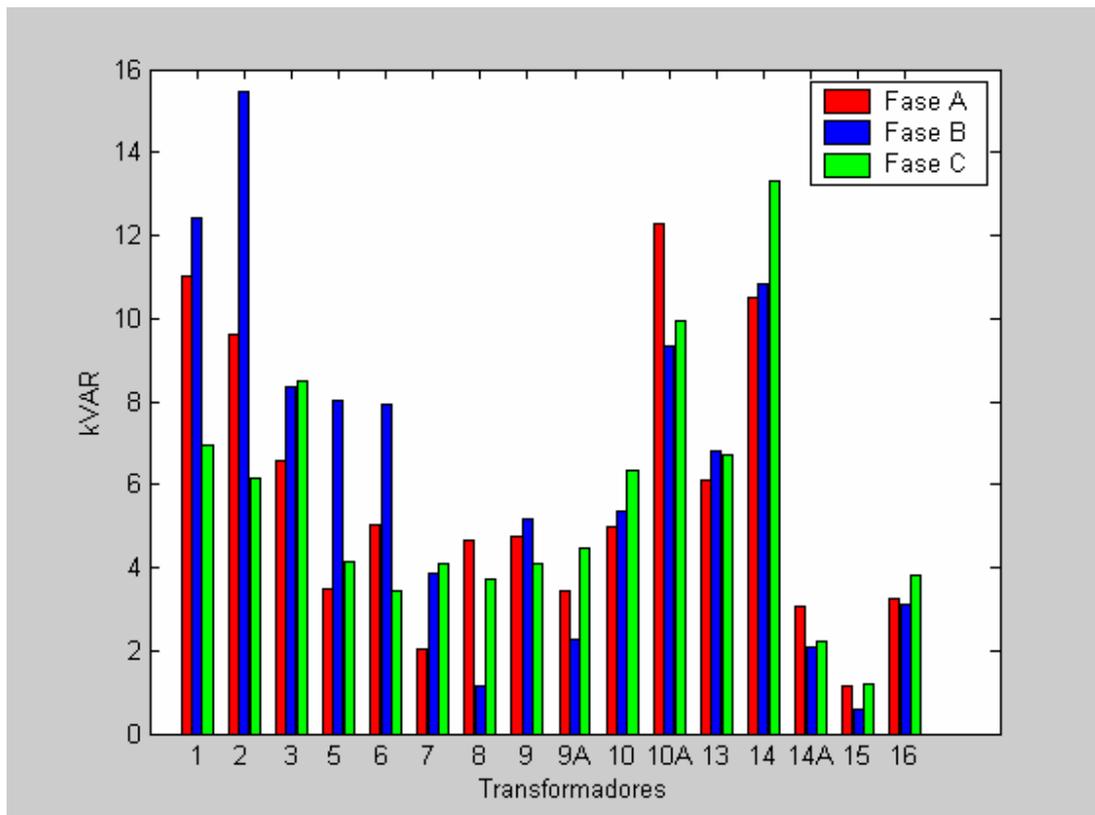


Figura 3.12 Potencia reactiva de cada uno de los transformadores en cada una de las fases.

3.4 Definición del Factor de potencia

Debido a que el factor de potencia, representa la medida de que tan eficientemente se utiliza la energía en una planta, conforme este parámetro disminuye se demandará más potencia reactiva. Una notable observación fue hecha por W. V. Lyon, quien fue probablemente el primero en entender el verdadero significado del factor de potencia. El escribió lo siguiente:

“El factor de potencia es el cociente de la potencia real a la potencia máxima que sería absorbida por cualquier carga que toma de la línea la misma corriente y el mismo voltaje RMS“.

El *Std IEEE 1459* indica las nuevas definiciones del factor de potencia según lo definido por W. V. Lyon, en el cual se hacen consideraciones a partir de un circuito monofásico conectado en serie que ayudará a entender el concepto de Lyon. Este circuito se conforma por la impedancia de la línea, la potencia absorbida por la carga y las pérdidas de

potencia. Si se considera la conexión de capacitores en paralelo con la finalidad de mejorar el bajo factor de potencia y las pérdidas, se dice que la transferencia de energía se optimiza aprovechando con esto el voltaje y la corriente de línea. Esta potencia es llamada potencia aparente $S = VI$. Lo anterior conduce a las siguientes definiciones:

- La potencia aparente es la máxima potencia transmitida a la carga (o entregada por la fuente) conservando la misma potencia de pérdidas en la línea y el mismo voltaje y corriente en la carga
- Factor de potencia es el cociente de la potencia real y la potencia máxima que podría ser transmitida conservando las pérdidas de potencia de la línea y el voltaje constante en la carga [Emanuel 2004].

Como se mencionó previamente, el factor de potencia es un indicativo de la utilización de la energía por una carga y esta definido por la siguiente expresión, la cual se basa en la consideración de operación bajo condiciones senoidales balanceadas. En este sentido, el factor de potencia se define como,

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{VI \cos \theta}{VI} = \cos \theta \quad (3.26)$$

Idealmente el factor de potencia debe ser unitario (esto es, Q igual a cero) con la finalidad de absorber potencia con una magnitud de corriente mínima y por consiguiente minimizar las pérdidas en el equipo eléctrico.

Considerando ahora el efecto cuando el voltaje es senoidal y la corriente es no senoidal se sabe que el factor de potencia de desplazamiento (DPF) es,

$$DFP = \cos \theta \quad (3.27)$$

y el factor de potencia se define como,

$$PF = \frac{I_{s1}}{I_s} DPF \quad (3.28)$$

Además, recordando que la distorsión armónica total de la corriente se define de la siguiente manera,

$$\%THD_i = 100 * \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{I_{sh}}{I_{s1}} \right)^2} \quad (3.29)$$

donde:

I_{sh} Es la componente a la frecuencia armónica.

I_{s1} Es la componente de frecuencia fundamental de la corriente.

Por lo tanto, en términos de (3.28) y (3.29) el factor de potencia considerando que la corriente es no senoidal y el voltaje senoidal puede ser expresado como [Mohan et al. 1995],

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} DPF \quad (3.30)$$

Ahora bien, cuando se presentan condiciones no senoidales tanto para el voltaje como para la corriente, el factor de potencia tiene otra representación. Sustituyendo (3.16) y (3.21) en (3.26), se obtiene la expresión general para el factor de potencia [Acha y Madrigal 2001].

$$PF = \frac{\sum_{n=-\infty}^{\infty} V_m I_{-m}}{\sqrt{\sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} |V_m|^2 |I_n|^2}} \quad (3.31)$$

3.5 Análisis del factor de potencia.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las mediciones del factor de potencia de cada uno de los transformadores que conforman la red de distribución de ciudad universitaria. De acuerdo a estas mediciones se mostrará la eficiencia con que la energía es aprovechada ya que la universidad cuenta con una enorme cantidad de equipos que

consumen reactivos para su funcionamiento. Por esta razón, es posible detectar un bajo factor de potencia en algunos transformadores lo cual implica costos adicionales a la universidad, asociados al consumo de la energía.

3.5.1 Transformador 1

En la Figura 3.13 se observa que para las fases B y C se tienen niveles dentro de valores aceptables según lo establecido por la empresa distribuidora de energía eléctrica, la cual señala que el factor de potencia debe tener un valor mínimo de 0.9. Por su parte, En la Tabla 3.8 resume los valores registrados durante el muestreo. Ahora la fase A registra valores negativos del factor de potencia, lo cual se puede observar que ocurren en los mismos instantes de tiempo en que la potencia reactiva cambia de signo (Figura 3.4). En la sección 3.2.1.1 se analiza la presencia del signo negativo, en la cual se realiza el análisis en el mismo transformador 1. El signo negativo lo introduce el programa Dran-View del medidor PP4300 pero no significa que el factor de potencia sea negativo.

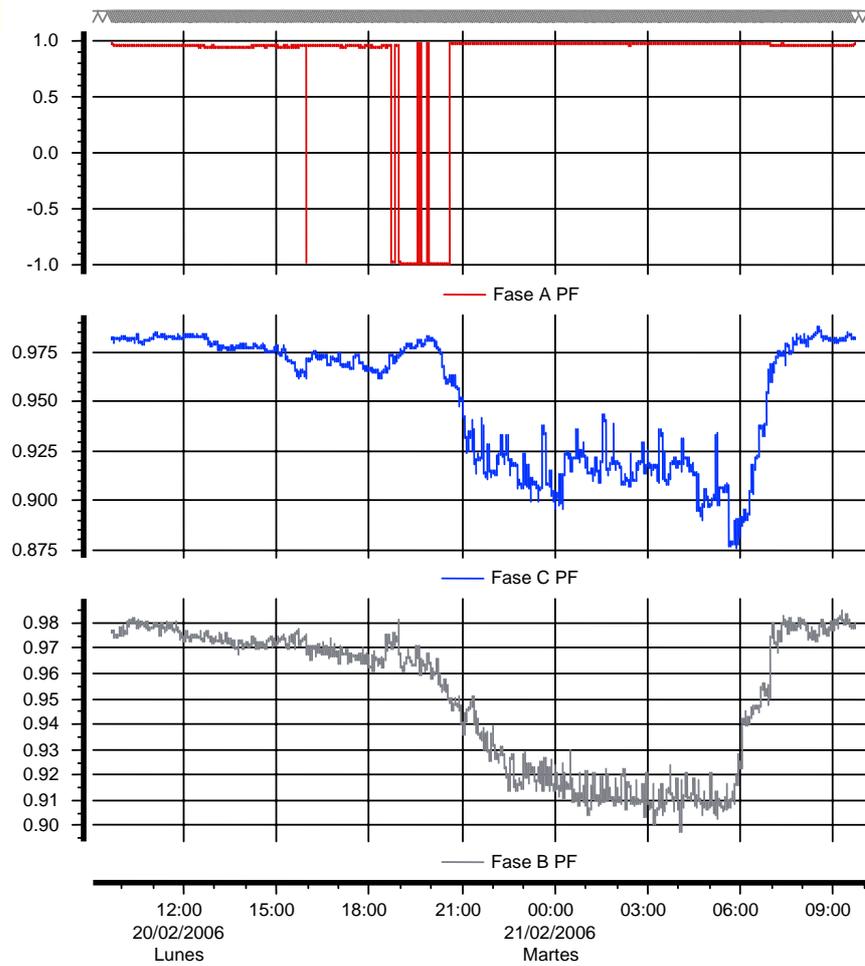


Figura 3.13 Diagrama de tiempo del factor de potencia del transformador 1.

Tabla 3.8 Resumen de valores críticos del FP del transformador 1

		FP	FECHA	HORA
FASE A	MAXIMO	0,99126	21/02/2006	6:56:47
	MINIMO	-0,99036	20/02/2006	20:30:48
FASE B	MAXIMO	0,98513	21/02/2006	9:16:47
	MINIMO	0,89804	21/02/2006	4:02:48
FASE C	MAXIMO	0,98828	21/02/2006	8:30:48
	MINIMO	0,87648	21/02/2006	5:50:47

En la Figura 3.14 se muestra el comportamiento del factor de potencia registrado en cada uno de los transformadores de la red universitaria. Es importante destacar que en la mayoría de los transformadores se detectaron bajos niveles del factor de potencia durante el

periodo de las 21:00:00 a las 6:00:00 horas, lo cual sea posiblemente a que únicamente el alumbrado universitario es la única carga que se encuentra operando en la red, y esta sea una razón por la cual se manifieste este comportamiento del factor de potencia. Observemos que el transformador 8 es el que registra el valor mínimo del factor de potencia en la fase C, seguidos de los transformadores 7 y 14A en los cuales se observa que en la fase A el valores del factor de potencia se encuentran oscilando alrededor del 0.5.

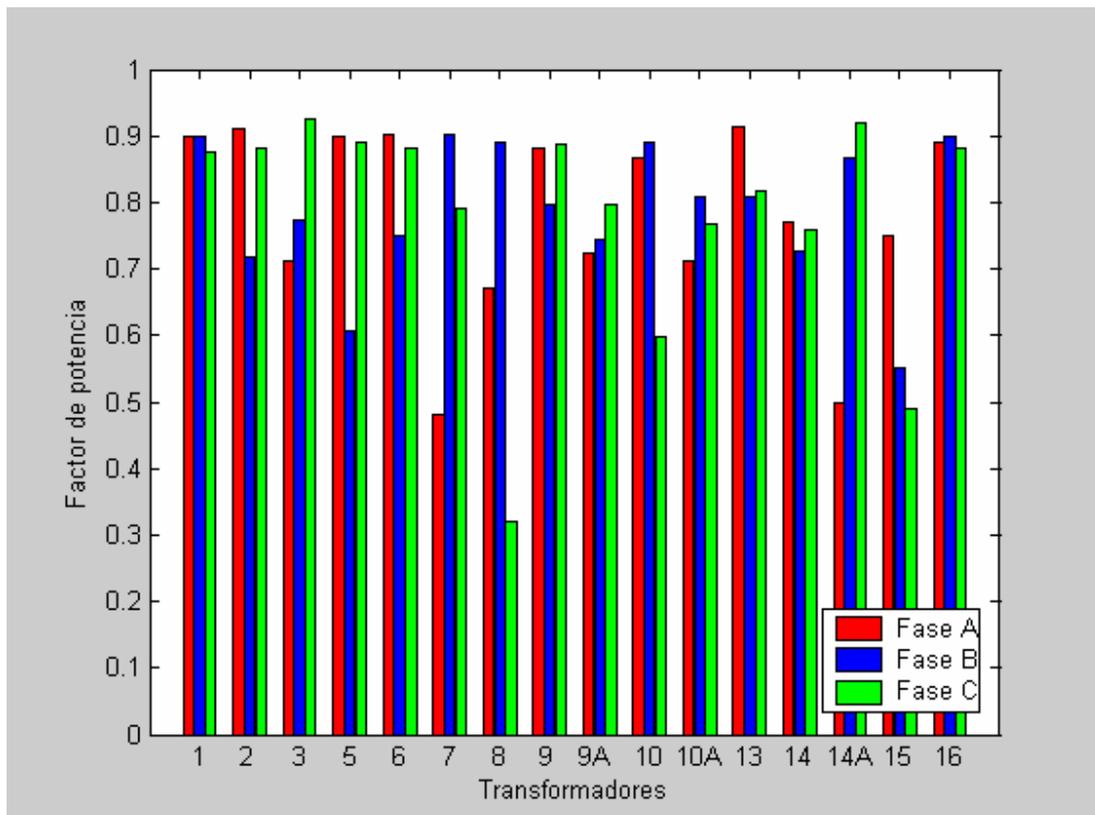


Figura 3.14 Diagrama del factor de potencia de los transformadores de la red Universitaria.

3.6 Frecuencia de la línea.

Los resultados obtenidos de la frecuencia de los voltajes suministrados muestran valores dentro de los límites máximos y mínimos establecidos por la compañía suministradora de energía eléctrica. El valor de la frecuencia nominal tiene un rango de tolerancia de $\pm 0.08\%$ Hertz según lo establecido por Comisión Federa de Electricidad. La Figura 3.15 muestra el comportamiento típico de la frecuencia durante las mediciones hechas al transformador 1, cuyo comportamiento es similar al presentado por el resto de los

transformadores. En cada uno de las mediciones realizadas a los transformadores los valores no sobrepasan este límite. La Tabla 3.9 muestra los valores máximos y mínimos registrados para las tres fases en el transformador 1.

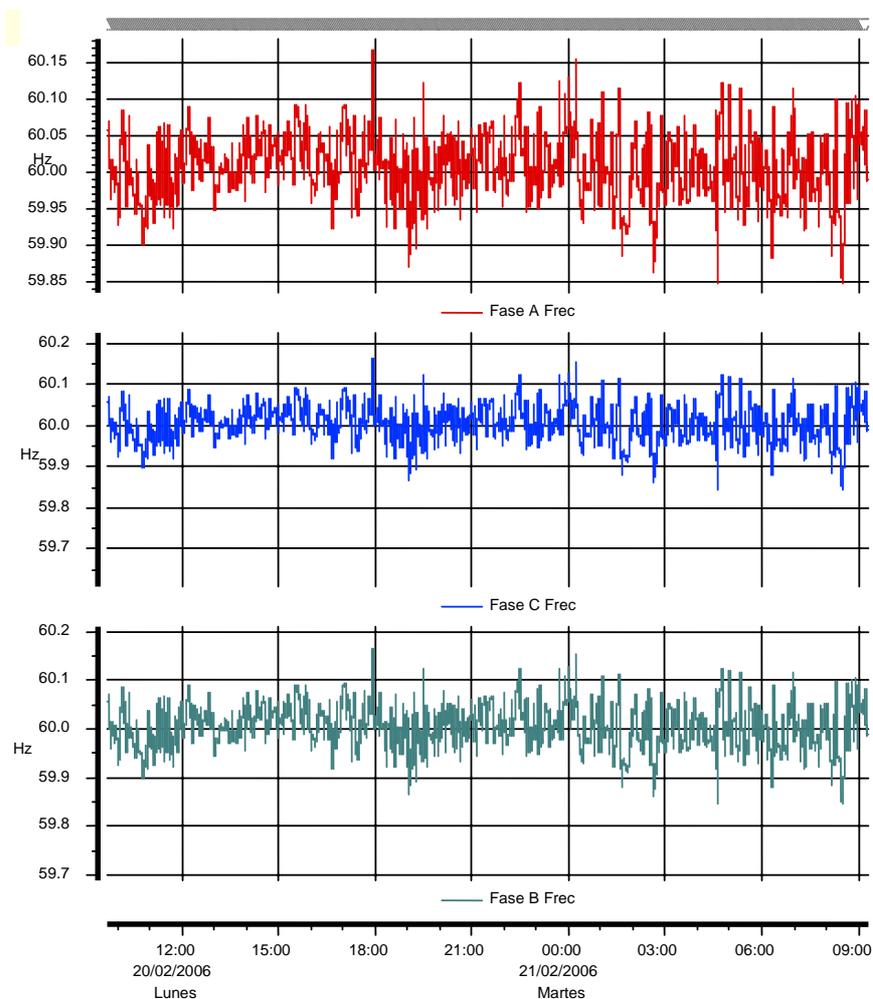


Figura 3.15 Diagrama de tiempo de la frecuencia del transformador 1.

Tabla 3.9 Resumen de valores críticos de la frecuencia del transformador 1.

		FRECUENCIA	FECHA	HORA
FASE A	MAXIMO	60,166	20/02/2006	17:54:47
	MINIMO	59,85	21/02/2006	4:36:47
FASE B	MAXIMO	60,166	20/02/2006	17:54:47
	MINIMO	59,85	21/02/2006	4:36:47
FASE C	MAXIMO	60,166	20/02/2006	17:54:47
	MINIMO	59,85	21/02/2006	4:36:47

3.7 Conclusiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos en cada una de las mediciones se deben considerar y resaltar varios aspectos. Es conocido que las cargas no lineales generan armónicos lo cual hace que aumente el valor RMS de corriente y como consecuencia se presenta un aumento en los kVA y disminución del factor de potencia. Cabe mencionar que en algunos transformadores el valor de la potencia reactiva tiende a ser negativo lo cual no indica que existe aportación de reactivos a la red universitaria. En la Tabla 3.5 y 3.7 se muestran los valores de las potencias, factor de potencia y distorsión total armónica. Los valores calculados por el medidor y los calculados a partir de las ecuaciones muestran resultados prácticamente idénticos. De la misma manera se muestra que el signo de la potencia reactiva y el factor de potencia son positivos a partir de la utilización de la formulación que describe el análisis de los circuitos eléctricos bajo condiciones no-senoidales. Cabe resaltar que para obtener ambos resultados con las alternativas Dran-View o ecuaciones, se partió de los mismos datos en el tiempo del voltaje y la corriente proporcionados por el proceso de medición y que los valores se muestran en la tablas antes mencionadas, se puede concluir que los valores calculados por medio del programa del medidor como de las ecuaciones son idénticos y que únicamente el signo tomado por el programa del medidor es la única diferencia ya que con relación a la magnitud es el mismo comportamiento. Sin embargo, no se tiene información suficiente del fabricante del medidor PP4300 y el programa Dran-View para poder determinar por que se incorpora un signo menos. Únicamente conociendo el código del programa del fabricante se podría determinar el origen del signo de la potencia reactiva y el factor de potencia.

El factor de potencia como se ha descrito en este capítulo nos indica que tan efectivamente una carga absorbe potencia real. Los resultados obtenidos en las mediciones indican niveles por debajo de los mínimos establecidos por la compañía suministradora de energía eléctrica, este valor del factor de potencia es 0.9. Los valores negativos del factor de potencia son una consecuencia del signo que introduce el medidor en la potencia reactiva. La corrección en el futuro del factor de potencia tiene varias ventajas que incluyen no solo evitar penalizaciones sino también mejorar la operación y eficiencia de los equipos reduciendo costos en el consumo de energía.

Los límites registrados de la frecuencia indican que la compañía suministradora de energía mantiene un valor adecuado de la frecuencia, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos en los transformadores ninguno sobrepasó los valores de tolerancia los cuales son de $\pm 0.08\%$ Hertz.

A continuación se presenta la Tabla 3.10 que resume el estado de los diferentes transformadores. Para los parámetros analizados en este capítulo.

Tabla 3.10 Resumen de los transformadores.

Transformador	Potencia en KVA	Factor de potencia	Frecuencia
T1	✗	✗	✓
T2	✓	✗	✓
T3	✓	✗	✓
T5	✓	✗	✓
T6	✓	✗	✓
T7	✓	✗	✓
T8	✓	✗	✓
T9	✓	✗	✓
T9A	✓	✗	✓
T10	✓	✗	✓
T10A	✓	✗	✓
T13	✓	✗	✓
T14	✓	✗	✓
T14A	✓	✗	✓
T15	✓	✗	✓
T16	✓	✓	✓

Capítulo 4

Interrupciones, depresiones e incrementos de voltaje.

El problema de la calidad de la energía ha tomado una enorme relevancia durante los últimos años. Hoy en día las cargas requieren de un alto nivel de calidad en el suministro de energía pero al mismo tiempo son las causantes del deterioro de la calidad del servicio. Los disturbios en la red eléctrica se traducen en pérdidas por lo que es importante conocer cuales son estos fenómenos.

4.1 Introducción

El estudio de la calidad de la energía tiene la finalidad de encontrar soluciones adecuadas y eficientes para atenuar los disturbios y variaciones del voltaje en la red de distribución. Se deben proponer alternativas para corregir las fallas que se encuentran en el sistema con la finalidad de tener energía eléctrica de calidad. La calidad de la energía se podría definir como una ausencia de interrupciones, sobre tensiones y deformaciones producida por armónicos en la red eléctrica y variaciones del voltaje. Existen enormes consecuencias debido a los problemas de calidad de energía entre los cuales se pueden citar: operación errónea de circuitos de control, interferencia telefónica, errores de medición y parpadeo en luminarias. Es importante destacar que de no tomar medidas adecuadas para erradicar el fenómeno de la calidad de la energía esto traerá como consecuencias un peligro latente para los equipos.

4.2 Principales disturbios de la energía

En términos de la calidad de la energía, un disturbio es una desviación temporal de la forma de onda en estado estable causado por fallas de corta duración o por cambios repentinos en el sistema. Los disturbios considerados por ciertas agrupaciones tales como la

Internacional Electrotechnical Commission (IEC) incluyen la disminución y aumento del voltaje, interrupciones cortas, impulsos y oscilaciones transitorias. En la Tabla 4.1 se indican las principales características de los disturbios que se presentan en el sistema.

Tabla 4.1 Categorías y características típicas de fenómenos electromagnéticos definidos en [IEEE 1159 1995]

	Contenido Espectral típico	Duración típica	Magnitud típica del voltaje
1 Transitorios			
1.1 Impulso			
• Nanosegundos	5- ns	< 50 ns	
• Microsegundos	1 μ S	50 ns – 1 ms	
• Milisegundos	0.1 ms	> 1 ms	
1.2 Oscilatorio			
• Baja frecuencia	<5 kHz	0.3-50 ms	0-4 pu
• Media frecuencia	5-500 kHz	20 μ S	0-8 pu
• Alta frecuencia	0.5-5 MHz	5 μ S	0-4 pu
2 Variaciones de corta duración			
2.1 Instantáneas			
• Interrupción		0.5 – 30 ciclos	<0.1 pu
• Sag (Dip)		0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 pu
• Swell		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
2.2 Momentáneas			
• Interrupción		30 ciclos – 3 s	<0.1 pu
• Sag (Dip)		30 ciclos – 3 s	0.1 – 0.9 pu
• Swell		30 ciclos – 3 s	1.1 – 1.4 pu
2.3 Temporales			
• Interrupción		3 s – 1 min.	<0.1 pu
• Sag (Dip)		3 s – 1 min.	0.1 – 0.9 pu
• Swell		3 s – 1 min.	1.1 – 1.2 pu
3 Variaciones de larga Duración			
3.1 Interrupciones sostenidas		> 1 min.	0.0 pu
3.2 Bajo voltaje		> 1 min.	0.8 – 0.9 pu
3.3 Sobrevoltaje		> 1 min.	1.1 – 1.2 pu
4 Desbalance de voltaje		Estado estable	0.5 – 2%
5 Distorsión de forma de onda			
5.1 Componente de CD		Estado estable	0 – 0.1%
5.2 Armónicos	0 – 100 Arm.	Estado estable	0 – 20%
5.3 Interarmónicos	0 – 6 Khz.	Estado estable	0 – 2%
5.4 Muesca		Estado estable	
5.5 Ruido	Banda amplia	Estado estable	0 – 1%
6 Fluctuaciones de voltaje	<25 Hz	Intermitente	0.1 – 7%
7 Variación frecuencia de Potencia		<10s	

4.2.1 Interrupciones de energía

Las interrupciones se consideran como un decremento del voltaje del 100% de la amplitud. Los efectos que pueden provocar pueden ser muy severos, como por ejemplo en los centros de cómputo donde las pérdidas de información y, por ende, económicas son importantes. Una posible protección para estas cargas es la instalación de fuentes ininterrumpibles.

4.2.2 Depresiones de voltaje (Sag)

Este término se ha venido utilizando para describir una reducción repentina (entre 10% a 90%) del voltaje en un punto del sistema. La Tabla 4.1 indica las duraciones y los diferentes tipos de **Sag**. La Figura 4.1 muestra un voltaje **SAG** el cual esta asociado principalmente con las fallas en el sistema, pero de forma similar pueden ser causados por la energización de equipo el cual demanda en un instante una gran cantidad de energía. Cabe mencionar también que los **Sag** se sub-clasifican dependiendo de la magnitud y duración, en la Tabla 4.1. Esto trae como consecuencia la operación incorrecta de los dispositivos de control, variaciones de velocidad en motores, disparo de protecciones. Estos efectos pueden ser solucionados con fuentes ininterrumpibles las cuales atenúan el problema de manera considerable.

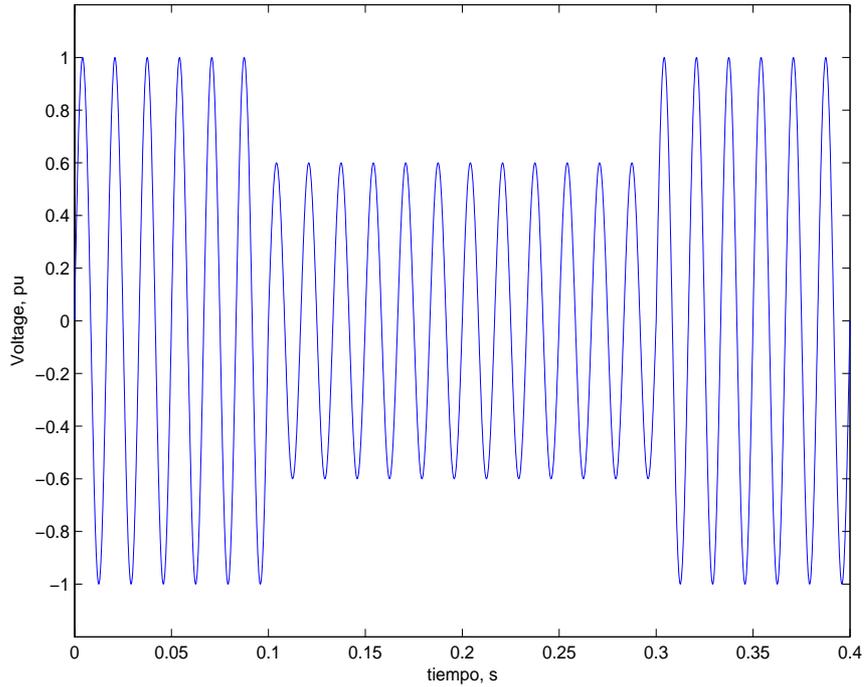


Figura 4.1 Depresión de voltaje.

4.2.3 Incrementos de voltaje (Swell)

Un **Swell** es definido como un aumento del voltaje en ciertos periodos de tiempo el cual se encuentra por encima de las condiciones de operación nominal del sistema. La Tabla 4.1 muestra las diferentes categorías de acuerdo con la duración de estos eventos y, la Figura 4.2 muestra el comportamiento típico de un **Swell**. Estos eventos pueden presentarse debido a la desconexión de grandes cargas y pueden generar problemas como disparo de protecciones a consecuencia de estos aumentos de voltaje. Una solución posible sería el uso de fuentes de alimentación continua así como las fuentes acondicionadoras.

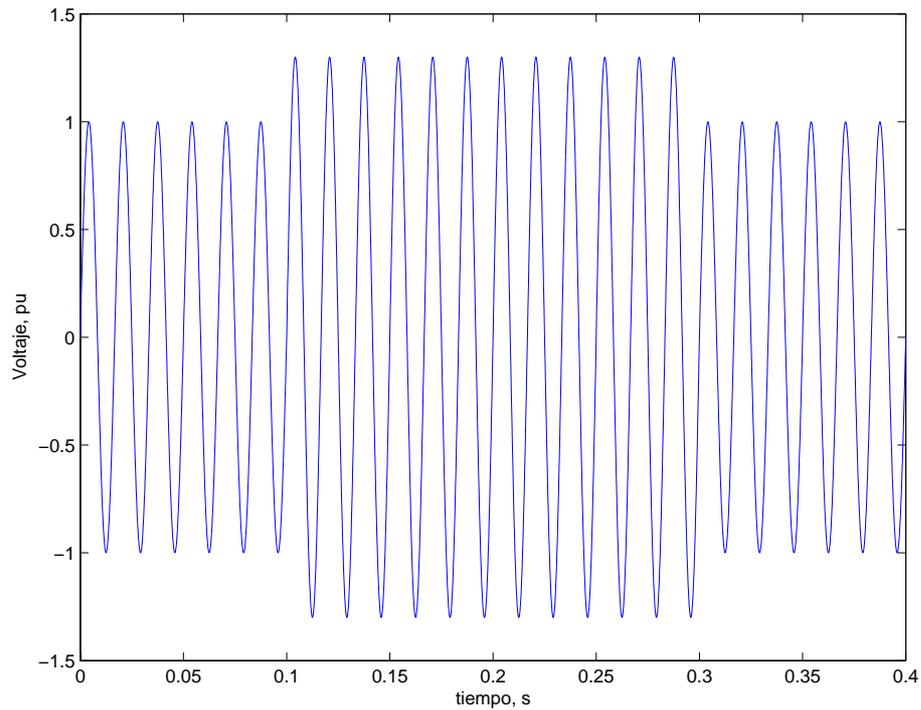


Figura 4.2 Incremento de voltaje.

4.2.4 Desbalance de voltaje

El desbalance de voltaje es definido como la desviación de los voltajes o corrientes trifásicos de sus condiciones normales de operación. La razón principal del desbalance del voltaje con niveles menores al 2% se debe a las cargas monofásicas conectadas a los circuitos trifásicos [Arrillaga et al. 2000].

El desbalance del voltaje se define mediante la relación de la secuencia negativa y de la secuencia positiva de las componentes simétricas del sistema, de tal manera que

$$Ku = \frac{V_2}{V_1} \quad (4.1)$$

en donde los términos V_2 y V_1 se determinan mediante la representación del sistema trifásico en la forma de componentes simétricas. Esto es,

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \\ V_y \\ V_B \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

en donde V_R , V_y , V_B representan los vectores de los voltajes trifásicos [Schlabach et al. 2001].

El factor de desbalance de voltaje Ku se debe determinar a la frecuencia fundamental. De no ser así, la contribución de la componente de secuencia cero asociado a la tercera armónica y/o de la componente de secuencia negativa como la 5^a armónica, pueden incrementar el factor de desbalance. Como consecuencia de lo anterior, se puede introducir errores debido a que las contribuciones de los armónicos no causan el mismo efecto en los equipos que la frecuencia fundamental [Arillaga et al. 2000].

4.3 Análisis de interrupciones, depresiones e incrementos de voltaje

A continuación se muestran los disturbios registrados en algunos transformadores que conforma la red de distribución universitaria. Cabe hacer mención que no en todos los transformadores se detectaron estos fenómenos, por lo cual únicamente se presentan aquellos en los que se encontraron estos problemas.

4.3.1 Transformador 2

En la Figura 4.3 se muestra el comportamiento de los voltajes de cada una de las fases, ahora bien se observan ligeros cambios en la magnitud, los cuales de acuerdo a la definición de desbalance son a las desviaciones de los voltajes. Los valores máximos registrados de la componente fundamental de los voltajes de las fases fueron de A = 183.4107, B = 179.4014 y en C = 181.1169. Estos valores indican un desbalance de $Ku = 0.6406\%$ el cual de acuerdo a la Tabla 4.1. se encuentra de los límites de 0.5 a 2%.

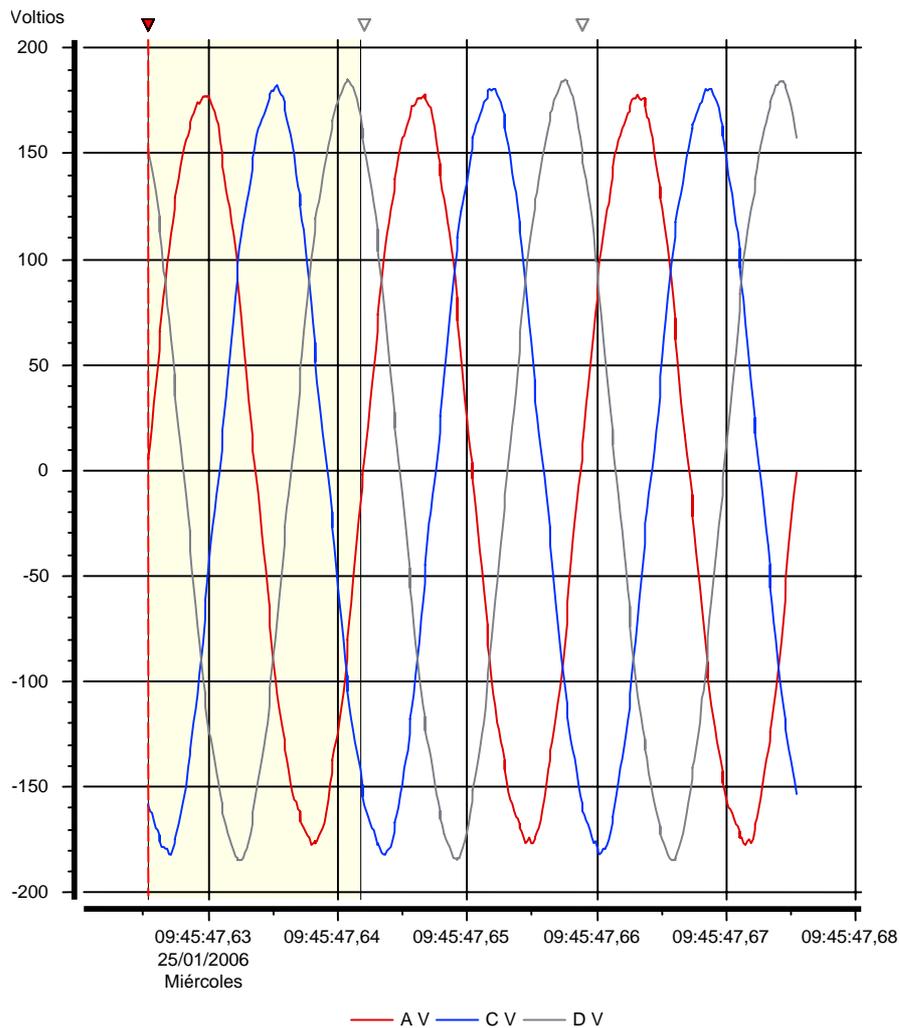


Figura 4.3 Desbalance trifásico ocurrido a las 9:45:47 del transformador 2.

La Figura 4.4 muestra de forma similar un desbalance del voltaje en las tres fases. Como se observa estos eventos ocurrieron el mismo día pero a diferente hora. Los valores máximos registrados para cada una de las fases fueron para A = 184.2706, B = 187.598y en C = 186.9929, dando como resultado un valor de $K_u = 0.8859\%$ este porcentaje de desbalance del voltaje se encuentra dentro del rango establecido en la Tabla 4.1.

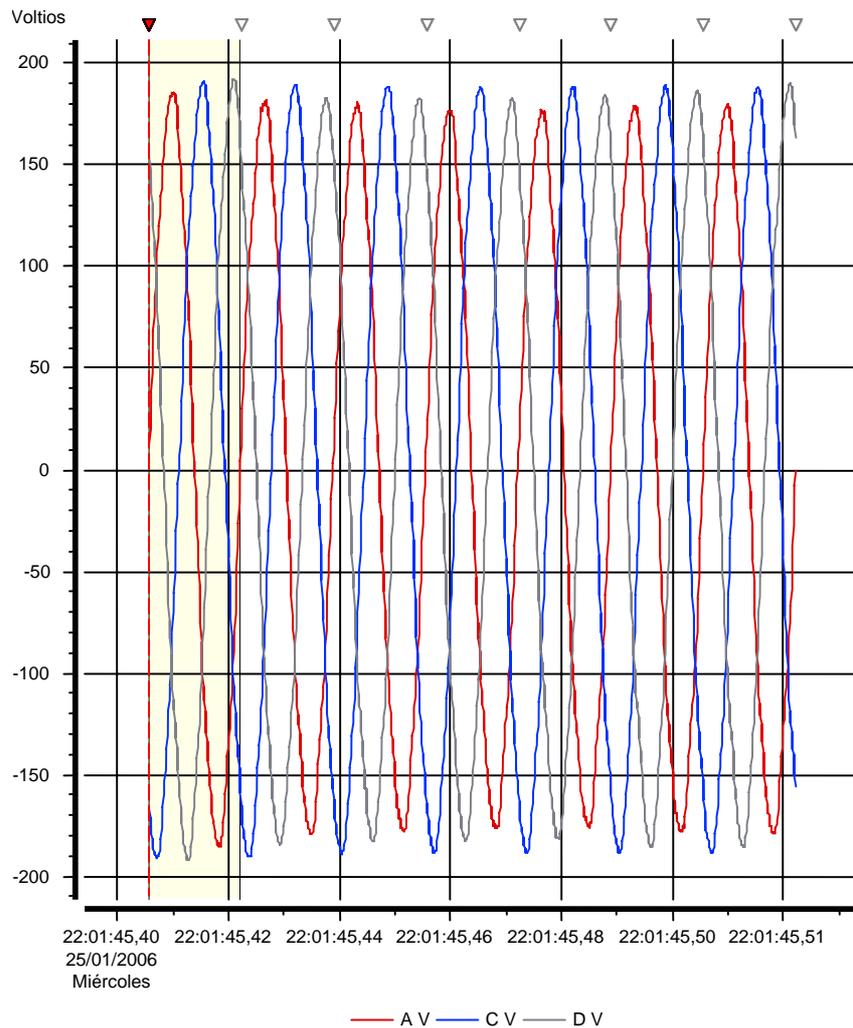


Figura 4.4 Desbalance trifásico ocurrido a las 22:01:45 del transformador 2.

4.3.2 Transformador 10A

La Figura 4.5 muestra ligeras variaciones de los voltajes en este transformador. La fase A registra un valor de $A=179.8497$, $B = 182.8634$ y $C = 181.7801$. por lo tanto, el valor de la distorsión es $K_u=0.4899\%$.

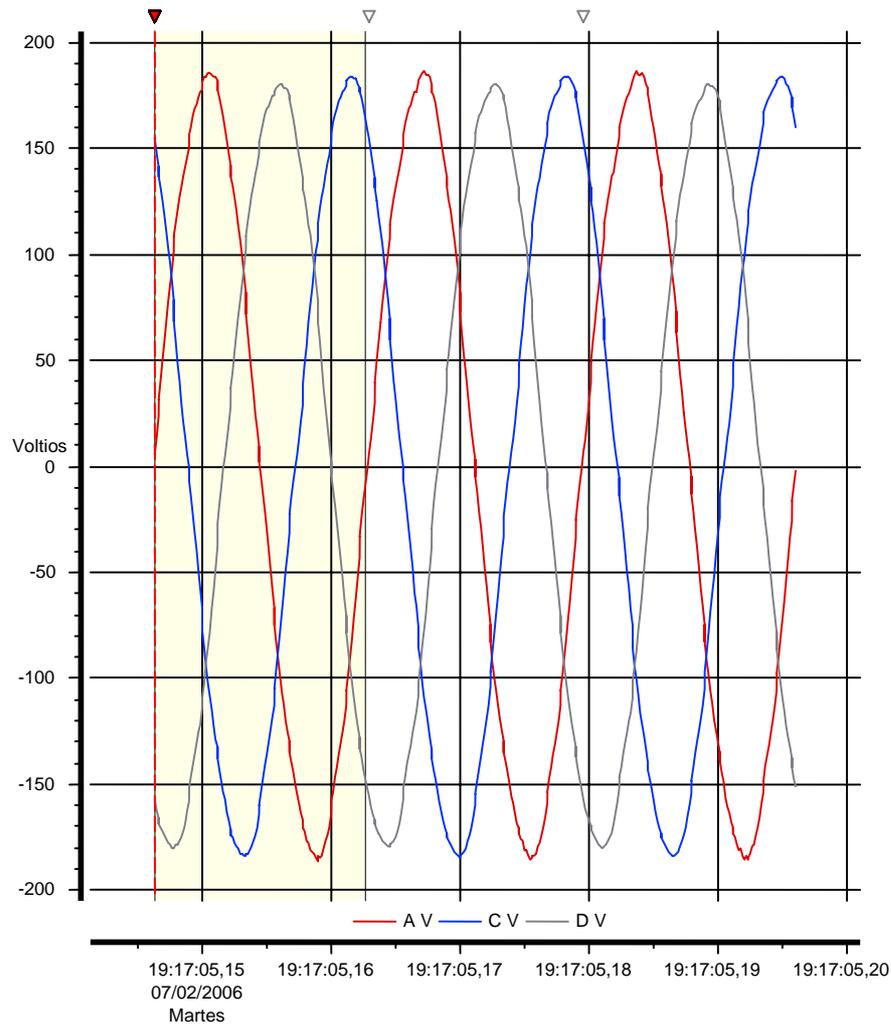


Figura 4.5 Desbalance trifásico ocurrido a las 19:17:05 del transformador 10A

4.3.3 Transformador 14A

La Figura 4.6 muestra un desbalance de voltaje bastante considerable en el transformador 14A por lo que hay que poner especial atención. En las fases A y C sufren cambios muy considerables, lo cual no se presenta en la fase B ya que la magnitud de esta permanece casi sin un cambio importante. Las magnitudes máximas registradas fueron para $A = 140.9532$, $B = 184.3667$ y en $C = 148.0130$. Por lo tanto, el desbalance a consecuencia de estos cambios abruptos del voltaje es de $K_u=8.5246\%$, rebasando por completo el valor indicado en la Tabla 4.1, la cual es de un nivel máximo del 2%.

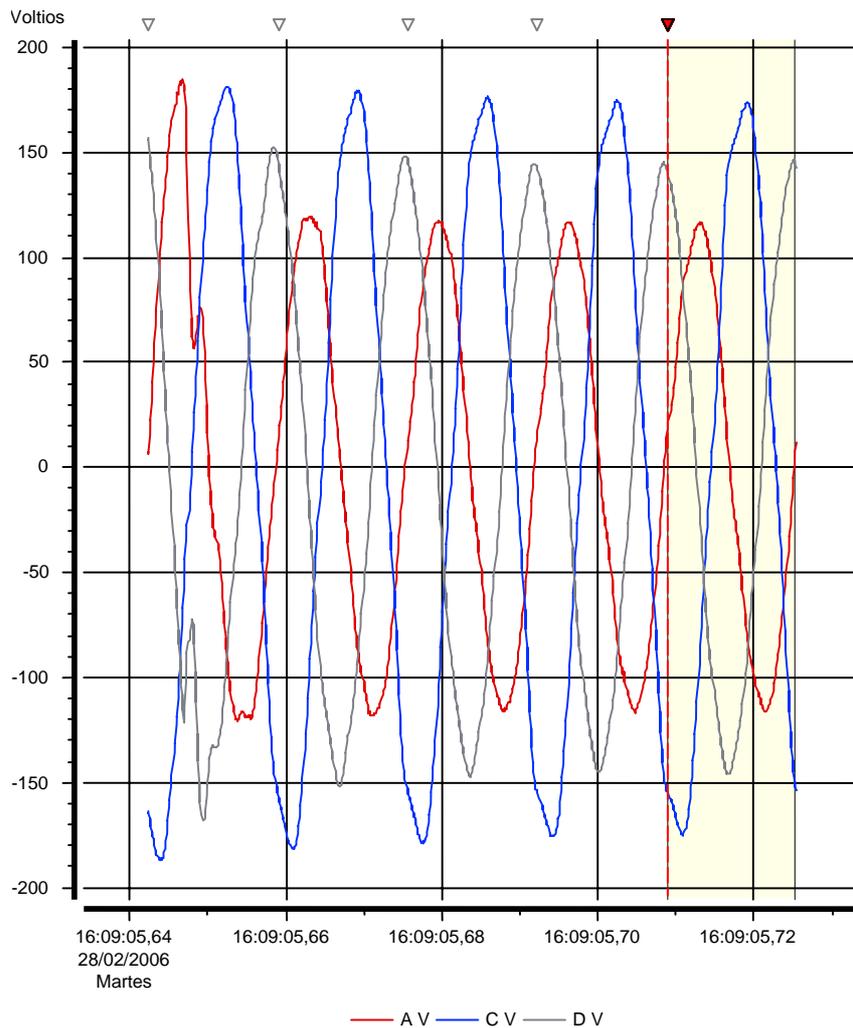


Figura 4.6 Desbalance trifásico ocurrido alas 16:09:05 del transformador 14A.

Otro evento ocurrido en este transformador es el de la Figura 4.7. Aquí se muestra de manera clara cuales son las fases que sufren mayores cambios en las magnitudes. Esto se debe posiblemente a las cargas que se encuentre instaladas en cada una de las fases. La fase A es la que sufre mayores cambios en la magnitud ya que, como se muestra en la Figura 4.7, la magnitud decae hasta en un 25% del valor nominal de operación. En este caso los valores registrados en las fases son en $A = 113.3591$, $B = 175.8998$ y $C = 144.2780$. por lo tanto, el valor de distorsión $K_u = 12.4933\%$. Como puede observarse existe un enorme desbalance en las tres fases.

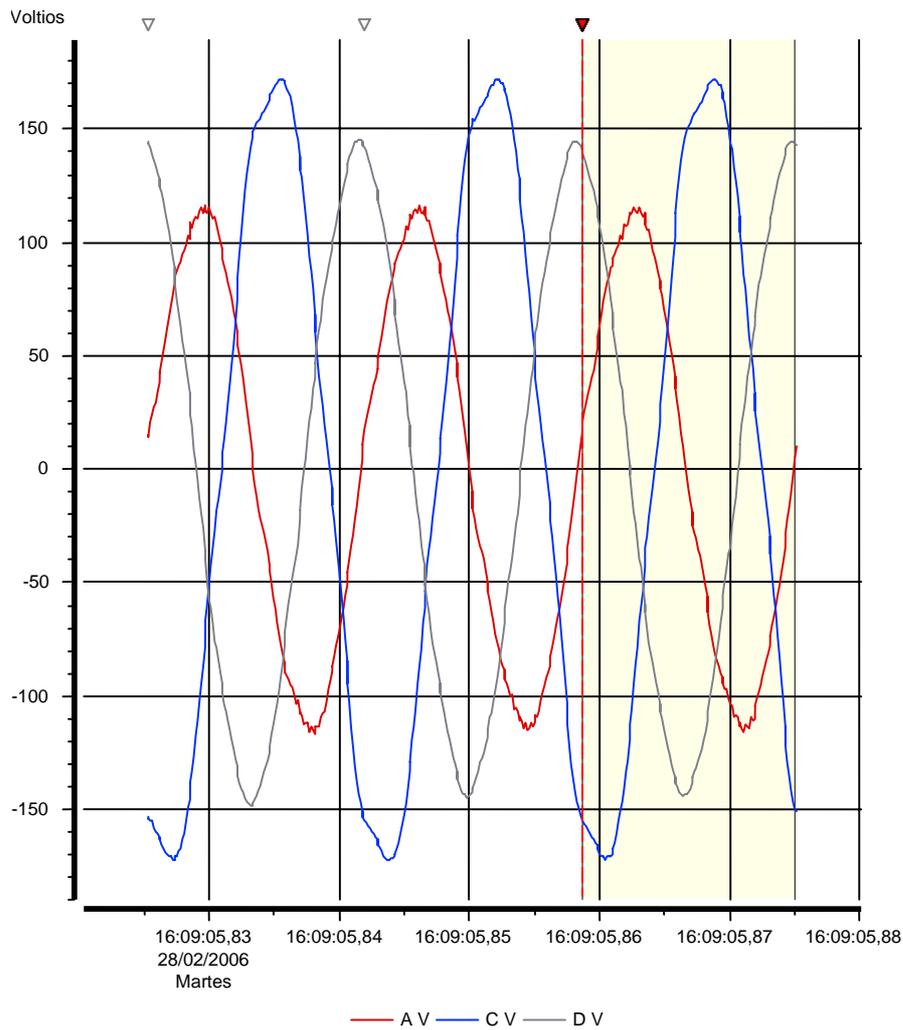
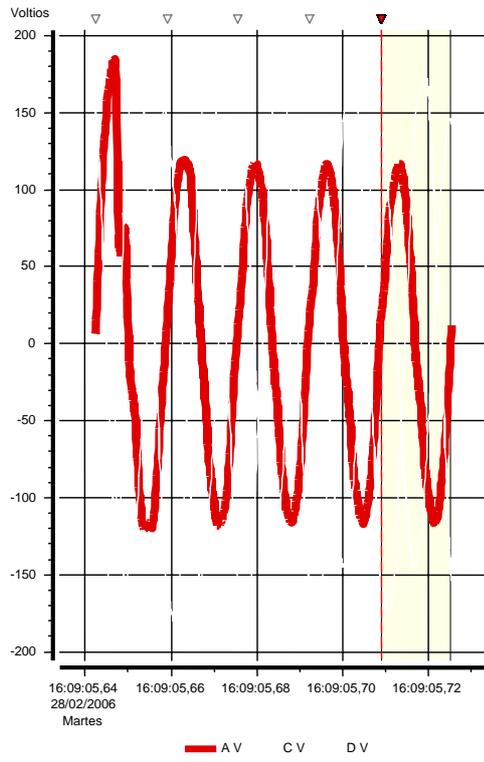
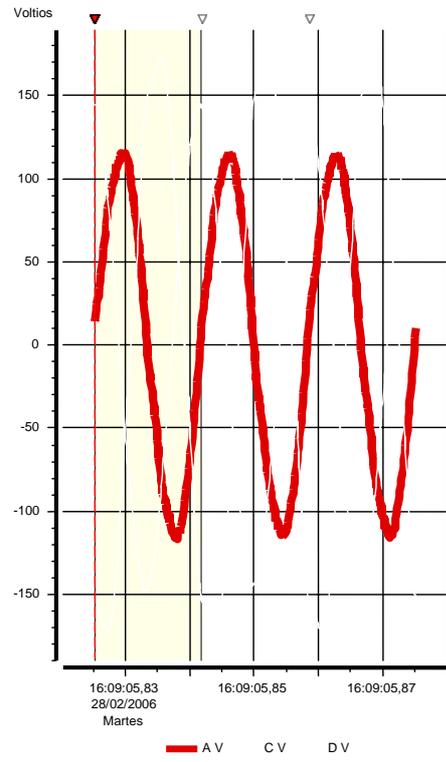


Figura 4.7 Desbalance trifásico del transformador 14A.

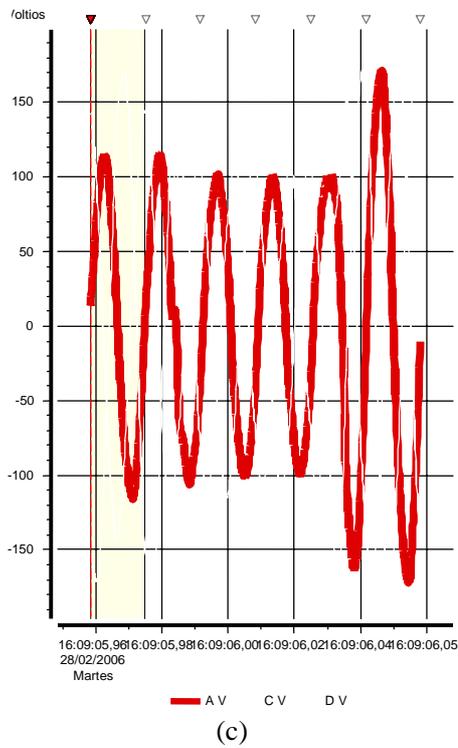
Además, en este transformador se presentó un SAG en la fase A en cual de acuerdo a la duración y al número de ciclos se encuentra dentro de la categoría de SAG instantáneos como lo indica la Tabla 4.1. La Figura 4.8 indica el inicio un SAG con duración de 12 ciclos por lo que se encuentra en el rango de 0.5 a 30 ciclos. Esto trae como consecuencia operación incorrecta de motores, así como también el disparo de protecciones.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.8 Decremento de voltaje, (a) inicio del SAG, (b) continuación y (c) fin del SAG.

4.3.4 Transformador 15.

La Figura 4.9 muestra un ligero desbalance de voltaje en el transformador de historia. Los valores registrados en las fases fueron en A =180.7506, B =181.812 y en C =178.4313. Por lo tanto, el valor de desbalance $K_u = 0.5534$ y de acuerdo a los valores de la Tabla 4.1 se encuentra dentro de un rango menor al 2%.

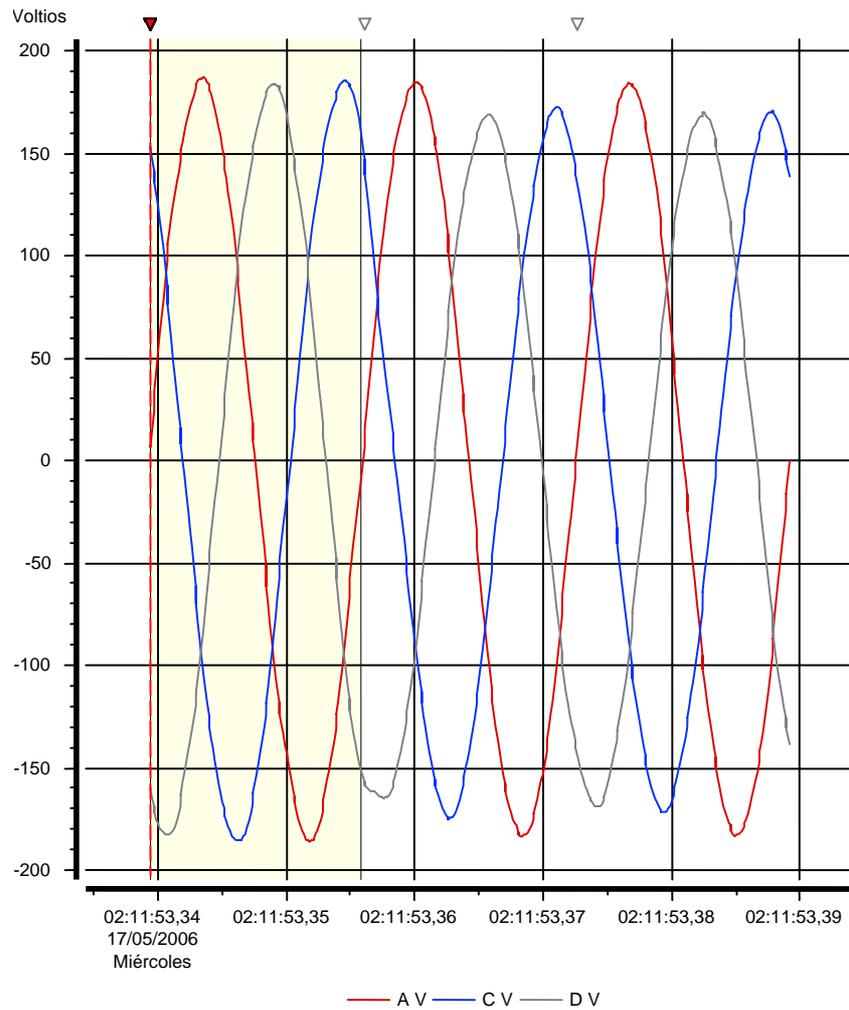


Figura 4.9 Desbalance trifásico del transformador 15.

4.4 Conclusiones

En la actualidad se requiere de mejores condiciones de la calidad del suministro en el sistema eléctrico, lo cual implica tener que atenuar todas las posibles perturbaciones que se presenten y como consecuencia afecte la calidad del servicio. Hoy en día existen equipos los cuales son cada vez más susceptibles a las variaciones del voltaje, por lo que es importante proponer soluciones adecuadas que permitan eliminar de manera satisfactoria todas las perturbaciones presentes en la red.

Las mediciones mostradas en los transformadores indican la presencia de desbalance del voltaje por encima de los límites establecidos. Esto es debido a las cargas monofásicas conectadas a los circuitos trifásicos, lo cual genera que las magnitudes de voltaje disminuyan permitiendo así la aparición de este problema.

De igual manera en el transformador 14 del segundo conjunto de circuitos conectados a este transformador se presentaron un par de perturbaciones, como lo son: desbalance y disminución de voltaje. La fase A fue la que registró estos eventos con una magnitud considerable en comparación con las fases B y C.

Todos estos resultados deben ser considerados ya que afectan de manera importante el buen funcionamiento de los equipos. La red de distribución universitaria cuenta con una gran cantidad de equipo el cual requiere un valor de voltaje constante por lo que este tipo de perturbaciones generan pérdidas las cuales se reflejan en costos adicionales para la universidad. En la Tabla 4.2 se resume los resultados presentados en este capítulo.

Tabla 4.2 Resumen de los transformadores

Transformador	Desbalance	SAG	SWELL
T1	✓	✓	✓
T2	✓	✓	✓
T3	✓	✓	✓
T5	✓	✓	✓
T6	✓	✓	✓
T7	✓	✓	✓
T8	✓	✓	✓
T9	✓	✓	✓
T9A	✓	✓	✓
T10	✓	✓	✓
T10A	✓	✓	✓
T13	✓	✓	✓
T14	✓	✓	✓
T14A	✗	✗	✓
T15	✓	✓	✓
T16	✓	✓	✓

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 Conclusiones generales.

En este trabajo se realizó el análisis de la calidad de la energía en la red de distribución de ciudad universitaria. Este análisis consistió en detectar perturbaciones en la red universitaria, poniendo especial atención en el comportamiento de voltaje, corriente, potencias (real, reactiva y aparente), factor de potencia, circulación de corriente por el neutro y los efectos de la distorsión armónica del voltaje y la corriente. Estos parámetros afectan el rendimiento adecuado del sistema eléctrico universitario provocando penalizaciones por bajo factor de potencia, sobrecalentamiento en los transformadores de la red, fallas en los circuitos de comunicación y deterioro de las instalaciones entre otras causas posibles.

De acuerdo con los resultados obtenidos se destacan varios aspectos ya que la red de distribución de ciudad universitaria de acuerdo a las mediciones realizadas muestra la existencia de los armónicos en la corriente. Los armónicos presentes más importantes son el tercero, quinto, séptimo y en algunos casos el noveno y undécimo. En consecuencia, el contenido armónico aumenta considerablemente la distorsión total armónica THD para la corriente, ya que por ejemplo en el transformador 7 en la fase A se registró un nivel de distorsión del 120% con duración de 7.58 minutos. Este nivel de distorsión se encuentra muy por encima de los límites establecidos por el estándar IEEE 519. Para el caso de la distorsión en el voltaje nunca sobrepasó del 4% de THD manteniéndose así en valores dentro del estándar.

La circulación de corriente por el neutro es bastante considerable ya que, de acuerdo a los resultados obtenidos, en cada uno de los transformadores se muestran enormes desbalance de cargas, por lo tanto es importante corregir este problema haciendo una

reubicación adecuada de las cargas monofásicas en cada una de las fases con el fin de atenuar la circulación de corriente que circula por el neutro.

El valor de la potencia reactiva en algunos transformadores tiende a ser negativo, pero esto no indica que existe una aportación de reactivos a la red universitaria. Este resultado se atribuye exclusivamente a la operación del medidor PP4300 que en algunos casos agrega el signo menos al valor de la potencia reactiva. Adicionalmente se ha encontrado un bajo factor de potencia, que se encuentra por debajo de 0.9. Es importante conocer el comportamiento del factor de potencia ya que este parámetro indica qué tan eficientemente se utiliza la energía. Por su parte, el valor de la frecuencia es estable ya que esta depende principalmente de la compañía suministradora de energía eléctrica.

De acuerdo a las mediciones realizadas en cada uno de los transformadores se encontraron perturbaciones tales como desbalance de voltaje en los transformadores de 2, 10, 14 y en el transformador que alimenta el edificio de historia. En el transformador 14 existió un decremento de voltaje.

Es importante destacar que en el transformador 1 los límites de corriente sobrepasan los valores nominales de acuerdo a la capacidad en kVA del transformador. Para algunos otros transformadores existen otras anomalías entre las cuales destacan: alambrado en mal estado, mal funcionamiento del drenaje interno, partes vivas expuestas, escurrimiento de aceite, transformadores sin protección. Los transformadores con estas anomalías son: T2, T5, T8, T9, T10, T14.

La Figura 5.1 muestra el plano de la red de distribución de Ciudad Universitaria donde se encuentran ubicados los transformadores que presentan anomalías severas.

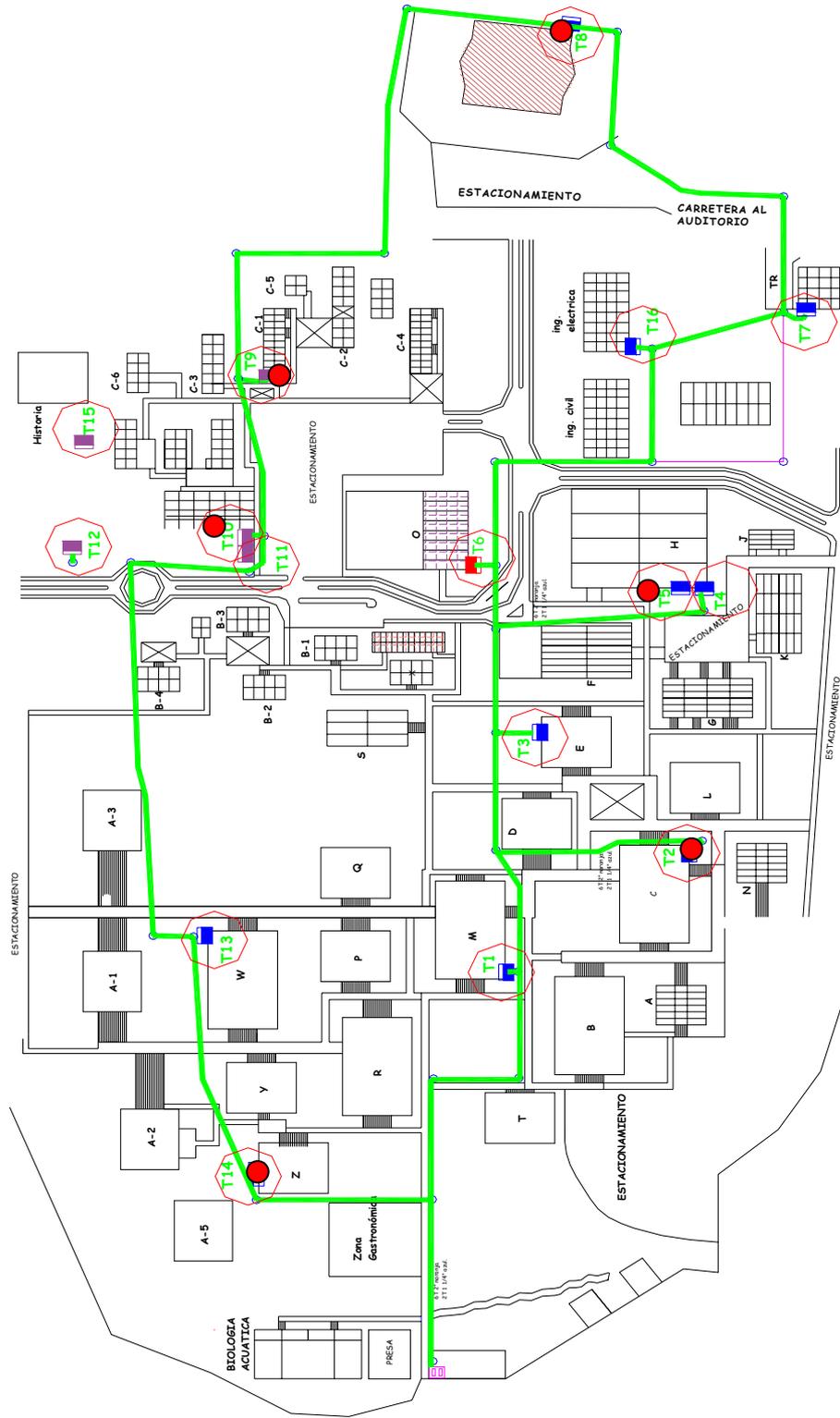


Figura 5.1 Red de distribución Universitaria detectando los transformadores que se encuentran en condiciones inadecuadas.

5.1.1 Conclusiones Particulares

Los resultados mostrados en este trabajo proporcionan información muy valiosa sobre el comportamiento de la carga en las instalaciones universitarias. Se detectaron transformadores en los cuales se están generando una enorme cantidad de disturbios en la red universitaria, así como también los periodos de tiempo en los cuales se registran la mayor contribución de armónicos en la red universitaria. De esta manera, con esta información es posible determinar una solución óptima para que la universidad cuente con una buena calidad de energía.

Para llevar a cabo acciones que permitan solucionar los fenómenos presentados en la red de distribución de Ciudad Universitaria, es importante tomar en cuenta las siguientes observaciones:

- Realizar conexiones seguras y adecuadas.
- Eliminación de las partes vivas expuestas.
- Desagüe de algunos transformadores.
- Instalación de candados.
- Balanceo de las cargas.
- Verificar que la conexión a tierra se encuentre en buen estado.

5.2 Trabajos futuros.

A partir del análisis realizado en la red de distribución de ciudad universitaria, existen varios aspectos, en los cuales se puede trabajar a futuro:

- Realizar un óptimo sistema de tierra para reducir fluctuaciones de voltaje.
- Instalación de bancos de capacitores para eliminar el bajo factor de potencia, evitando así penalización por la empresa suministradora de energía eléctrica.
- Realizar una correcta distribución de cada uno de los circuitos en las tres fases considerando las cargas instaladas en cada uno de los transformadores.
- Proponer mediante filtros de sintonización la eliminación de los armónicos predominantes en la red de distribución de ciudad universitaria.

Apéndice A

En este apéndice se presenta los datos de configuración del medidor PP4300 con el cual se llevaron a cabo las mediciones.

Dranetz-BMI PP4300 PQLite TASKCard Configuración

Eficaz de 0d - 00:00:00
ID del instrumento MODEL 4300 PQHTME
ID de la base de datos V4.40
ID del sitio UMSNH

Config Memoria

Transf. autom. de la tarjeta de memoria SI
Tipo de la memoria SOBREGRABE

Lecturas de Tiempo

Intervalo 120 segundos

Config de información analógica

Configuración de la entrada 4 HILOS / 3 SONDAS
Canales permitidos AV, BV, CV, DV, AI, BI, CI, DI,
Canal D EN ALTO
Frecuencia 60.0
Modo de sincronización de la frecuencia EXTERNO

	AV	BV	CV	DV
Interno	0.500983	0.499617	0.500273	0.500884
Escala	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
K-Factor Final	0.500983	0.499617	0.500273	0.500884
K-factor máximo final	0.500983	0.499617	0.500273	0.500884

	AI	BI	CI	DI
Interno	0.002169	0.002170	0.002165	0.002162
Escala	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
K-Factor Final	0.722835	0.723384	0.721550	4.377486
K-factor máximo final	0.722835	0.723384	0.721550	4.377486

Config Del Umbral

Configuración activa 0
Nombre de la configuración 120 VOLT SINGLE PHASE
V Número armónico 3
C Número armónico 3
Voltaje nominal de la Program. fácil 120.000
Corriente nominal de la Program. fácil 30.000
Tolerancia de la Programación fácil 0.000
Vigile la corriente SI

	A	B	C	D	Captura de Onda
V Alto límite del RMS	127.0	127.0	127.0	127.0	NO
V límite Bajo del RMS	105.0	105.0	105.0	105.0	NO
V Magnitud Transient	100.0	100.0	100.0	100.0	EN_TODOS

V límite de %THD	5.0	5.0	5.0	5.0	EN TODOS
V Frec. % Limite	0.5	0.5	0.5	0.5	NO
I Alto límite del RMS	300.0	150.0	300.0	300.0	NO
I límite Bajo del RMS	5.0	5.0	5.0	5.0	NO
I límite de la Cresta	NO	NO	NO	NO	NO
I límite de %THD	NO	NO	NO	NO	NO
I magnitud del Transient	NO	NO	NO	NO	NO
Límite Alto W	NO	NO	NO	NO	NO
Límite Alto VA	NO	NO	NO	NO	NO
Límite Alto VAR	NO	NO	NO	NO	NO
Límite Alto FP	NO	NO	NO	NO	NO
Sens V fuera lím	3.0	3.0	3.0	3.0	EN TODOS
Sens V en lím	5.0	5.0	5.0	5.0	NO
Sens I fuera lím	NO	NO	NO	NO	NO
Sens I en lím	NO	NO	NO	NO	NO
Sens % Trans V	150.0	150.0	150.0	150.0	NO
Sens % Trans I	NO	NO	NO	NO	NO
% ARM V	5.0	5.0	5.0	5.0	EN_DISPAR.
% ARM I	10.0	10.0	10.0	10.0	EN_DISPAR.

Config PQ Del Instrumento

	AV	BV	CV	DV
Histéresis del RMS (V)	5.0	5.0	5.0	5.0
Descanso de Hueco/Aumento (ms)	30000	30000	30000	30000
Impulso relativo ciclo descanso (ms)	10	10	10	10
Vuelta rel. ciclos descanso normal (ms)	2	2	2	2
Impulsos Pico. Ciclos descanso (ms)	10	10	10	10
Ciclos pico ret. a descanso normal (ms)	2	2	2	2
Histéresis de la cresta (V)	0.5	0.5	0.5	0.5
Isteresi di periodo (V)	0.5	0.5	0.5	0.5

	AI	BI	CI	DI
Histéresis del RMS (A)	5.0	5.0	5.0	5.0
Descanso de Hueco/Aumento (ms)	65535	65535	65535	65535
Impulso relativo ciclo descanso (ms)	10	10	10	10
Vuelta rel. ciclos descanso normal (ms)	2	2	2	2
Impulsos Pico. Ciclos descanso (ms)	10	10	10	10
Ciclos pico ret. a descanso normal (ms)	2	2	2	2
Histéresis de la cresta (A)	0.5	0.5	0.5	0.5
Isteresi di periodo (A)	0.5	0.5	0.5	0.5

Estado de Monitoreo

El vigilar	NO
Fuente Sistema	

Referencias

[Acha y Madrigal 2001]

E. Acha y M. Madrigal, *Power Systems Harmonics: Computer Modelling and Analysis*, Inglaterra: John Wiley Ltd & Sons, 2001.

[Arrillaga et al. 2000]

J. Arrillaga, N. R. Watson y S. Chen, *Power System Quality Assessment*, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd, 2000.

[Dranetz BMI 2002]

Dranetz BMI. *Power Platform 4300 TASKCard PQLite User's Guide*. New Jersey, 2002

[Emanuel 2004]

A. E. Emanuel, "Summary of IEEE Standard 1459: Definitions for the Measurement of Electrical Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions", *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 40, no. 3, 869-876, Mayo – Junio 2004.

[IEEE 1992]

STD IEEE 519, "Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power system", IEEE, 1992.

[Mohan et al. 1995]

Mohan, M. Undeland y William P. Robbins, *Power electronics: converters, applications*, Estados Unidos, John Wiley & Sons Inc, 1995.

[Schlabbach et al. 2001]

J. Schlabbach, D. Blume y T. Stephanblome, *Voltage Quality In Electrical Power Systems*, Londres, The Institution of Electrical Engineers, 2001

[Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo 1999]

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. *Memoria Técnica Descriptiva de Ciudad Universitaria*. Morelia, 1999.