

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## **CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN Y EL DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR CON FACTOR K**

**INFORME DE SUFICIENCIA  
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:  
JUAN MANUEL POMA CONGACHI**

**PROMOCIÓN  
2010-I**

**LIMA-PERÚ  
2013**

**CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN Y EL DISEÑO  
DE UN TRANSFORMADOR CON FACTOR K**

Este trabajo lo dedico con mucho cariño para mis padres, que siempre me incentivan a dar lo mejor de mí, así como a mi querida esposa y mis pequeñas hijas, que son lo mejor que me paso en esta vida.

## SUMARIO

El objetivo del presente trabajo es exponer la metodología para la selección y el diseño de un transformador con factor  $k$  tomando como ejemplo casos de estudio. De acuerdo a ello en este informe de suficiencia profesional se realiza el análisis de armónicos y el cálculo del factor  $K$ . Se desarrollan métodos para clasificación y las consideraciones técnicas de diseño de transformadores instalados en sistemas de distribución con armónicos, con la finalidad de encontrar la potencia, a la que debería operar un transformador, siendo esta menor a la potencia nominal para que fue diseñado.

La metodología consiste utilizar las lecturas de los análisis de armónicos de un sistema independiente, para determinar el factor  $K$  correspondiente a la cantidad de armónicos que existen en este sistema analizado.

La metodología es aplicada a dos casos de estudio:

- La empresa Dynacor Exploraciones del Perú S.A. que cuenta con unidad minera y una micro central hidroeléctrica.
- El sistema eléctrico de baja tensión del almacén Alfa,

Para ambos casos de estudio, se desarrollan los siguientes ítems: Alcance, marco normativo, esquema de medición, metodología de medición y equipo analizador utilizado, resultados, comentarios, recomendaciones, conclusiones.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INGENIERÍA</b> .....	3
1.1 Descripción del problema .....	3
1.2 Objetivos del trabajo .....	3
1.3 Evaluación del problema .....	3
1.4 Alcance del trabajo .....	5
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL</b> .....	6
2.1 Armónicos.....	6
2.1.1 Distorsión armónica .....	7
2.1.2 Definición armónica .....	8
2.1.3 Fuentes de armónicos .....	8
2.1.4 Efectos producidos por la distorsión armónica.....	10
2.2 Selección y desclasificación de transformadores.....	13
2.2.1 Transformadores con cargas no lineales .....	13
2.2.2 Pérdidas en un transformador .....	13
2.2.3 Desclasificación de transformadores .....	15
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>ANÁLISIS DE ARMÓNICOS Y CÁLCULO DEL FACTOR K</b> .....	19
3.1 Primer caso de estudio .....	19
3.1.1 Alcance.....	19
3.1.2 Marco normativo .....	19
3.1.3 Esquema de medición .....	23
3.1.4 Metodología de medición y equipo Utilizado.....	25
3.1.5 Resultados.....	26
3.1.6 Conclusiones .....	45
3.1.7 Recomendaciones .....	47
3.2 Segundo caso de estudio .....	47
3.2.1 Alcance.....	47
3.2.2 Marco normativo .....	47

3.2.3	Esquema de medición .....	48
3.2.4	Metodología de medición y equipo analizador utilizado .....	49
3.2.5	Resultados.....	49
3.2.6	Comentarios .....	52
3.2.7	Conclusiones .....	53
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>54</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>55</b>

## INTRODUCCIÓN

El trabajo se enfoca en exponer la metodología para la selección mediante el análisis de armónicos y cálculo del factor  $k$ , tomando como ejemplo dos casos de estudios.

El tema surge por la necesidad de utilización de un transformador de manera eficiente en un sistema de distribución con gran cantidad de armónicos.

Para mantener la calidad de la tensión y la corriente de red dentro de un nivel aceptable para el mercado eléctrico moderno, las reglamentaciones vigentes exigen trabajar con armónicas que no superen ciertos valores límites establecidos por ejemplo la IEEE 519 "Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia, o las Tablas 1 y 2 de las resoluciones 465/96 y 99/97 del ENRE-Entidad Reguladora de Energía Eléctrica Argentina.

La norma IEEE 519 sobre los límites de distorsión indica que los armónicos se miden en la frontera entre la empresa suministradora de energía y el usuario. La distorsión que el usuario produce a la empresa de energía depende de las corrientes armónicas que le inyecte y de la respuesta de impedancia del sistema a estas frecuencias. Dado ello se ha establecido que los límites de distorsión armónica permitidos a los usuarios se midan en corrientes.

La distorsión que la empresa de energía le produce al usuario se mide en la forma de onda de la tensión en el punto de frontera entre ambos. Aunque existen varios índices para establecer el grado de contaminación armónica en un punto de frontera, los índices más usados son la distorsión armónica individual y la distorsión armónica total tanto en tensión como en corriente.

En este trabajo se recoge los principales desarrollos sobre este tema y se presenta de manera simple, con la principal motivación de dar a conocer el tema a los estudiantes de ingeniería y personas relacionadas a la elaboración de proyectos y supervisores de mantenimiento de los sistemas eléctricos de distribución.

El informe está organizado de la siguiente manera

- Capítulo I "Planteamiento del problema de ingeniería".- En el cual se describe el problema, se establecen los objetivos del trabajo, se hace una evaluación del problema y se determina el alcance del trabajo.
- Capítulo II "Marco Teórico Conceptual".- Consta de dos secciones principales: 1 Armónicos (Distorsión armónica, definición armónica, fuentes de armónicos, efectos

producidos por la distorsión armónica) y Selección y desclasificación de transformadores (Transformadores con cargas no lineales, pérdidas en un transformador, Desclasificación de transformadores).

- Capítulo III "Análisis de armónicos y cálculo del factor k".- Consta de dos casos de estudio, cada uno desarrollando el alcance, el marco normativo, la metodología de medición y equipo utilizado, los resultados, conclusiones y recomendaciones.

## CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA

En este capítulo se realiza el planteamiento de ingeniería del problema, para ello primeramente se describe el problema y luego se expone el objetivo del trabajo, también se evalúa el problema y se precisan los alcances del informe,

### 1.1 Descripción del problema

Necesidad de utilización de un transformador de manera eficiente en un sistema de distribución con alto contenido de armónicos.

### 1.2 Objetivos del trabajo

Explicar la metodología para la selección de un transformador mediante el análisis de armónicos y cálculo del factor k tomando como ejemplos dos casos de estudio.

### 1.3 Evaluación del problema

Desde hace algunos años la proliferación de la electrónica de potencia ha incrementado la cantidad de corrientes y tensiones armónicas en los sistemas eléctricos de distribución.

Los armónicos son caros de mantener y por tanto es recomendable evitarlos, pero si esto no fuera posible entonces deberán ser convenientemente atenuados. Todos estos efectos contribuyen además a reducir la vida de las máquinas. En los motores también se producen pérdidas similares a parte de vibraciones mecánicas, efectos que se mencionan en la Tabla 1.1 [1].

**Tabla 1.1** Efectos de la presencia de armónicos

<b>Detalle</b>	<b>Efectos de la distorsión armónica</b>
Equipo transformador	Sobrecalentamiento del equipo
Condensadores	Quemaduras si la corriente es 1.3 veces más su nominal.
Motores de inducción	Sobrecalentamiento y vibraciones excesivas si la distorsión es superior al 5%
Cables de conexión	Sobrecalentamiento
Equipos de computación	Pérdidas de datos y daños en algunos componentes electrónicos
Equipos de medición digital	Error en la lectura, con daños en los componentes electrónicos y con probables riesgo de malograr el equipo.

Es muy importante para las empresas la reducción/eliminación de los armónicos que

se presenten en la red por las cargas no lineales.

Las empresas distribuidoras de energía eléctrica tienen tarifas regidas por OSINERGMIN. Es una norma general para todo proveedor que se aplique un cargo por energía reactiva cuando se excede del 30% del total de la energía activa. Como referencia una empresa de distribución que hace estos cobros es EDELNOR [2]

Para mantener la calidad de la tensión y la corriente de red dentro de un nivel aceptable para el mercado eléctrico moderno, las reglamentaciones vigentes exigen trabajar con armónicas que no superen ciertos valores límites establecidos [3]. Por ejemplo, IEEE 519 "Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia, o las resoluciones 465/96 y 99/97 del ENRE-Entidad Reguladora de Energía Eléctrica Argentina [4].

La norma IEEE 519 sobre los límites de distorsión indica que los armónicos se miden en la frontera entre la empresa suministradora de energía y el usuario. La distorsión que el usuario produce a la empresa de energía depende de las corrientes armónicas que le inyecte y de la respuesta de impedancia del sistema a estas frecuencias. En ese sentido se ha establecido que los límites de distorsión armónica permitidos a los usuarios se midan en corrientes.

La distorsión que la empresa de energía le produce al usuario se mide en la forma de onda de la tensión en el punto de frontera entre ambos. Aunque existen varios índices para establecer el grado de contaminación armónica en un punto de frontera, los índices más usados son la distorsión armónica individual y la distorsión armónica total tanto en tensión como en corriente.

En general el usuario debe verificar que:

- No existan sobrecargas en condensadores dentro de la planta.
- No ocurran resonancias series o paralelo a las frecuencias generadas.
- El nivel de armónico en el punto de frontera con la empresa de energía no sobrepase los límites establecidos.
- La filosofía de establecer límites de distorsión armónica al usuario, busca:
- Limitar la inyección de armónicos de cada usuario individual para que no produzca distorsiones inaceptables de la tensión en funcionamiento normal.
- Evitar que el efecto producido por dicha inyección se refleje en otros usuarios a través de una onda de tensión distorsionada.
- Evitar que entre todos los usuarios se vaya presentando un efecto acumulativo de distorsión de la forma de onda de tensión inaceptable.
- Los índices armónicos aplicables a los usuarios recomendados por la norma ANSI/IEEE-519 de 1992, se muestran en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.2** Base para los límites de corrientes armónicas (Fuente: IEEE 519-1992)

<b>Relación de Cortocircuito en el PCC</b>	<b>Voltaje máximo Individual de Frecuencia armónica (%).</b>	<b>Armónico máximo permisible de corriente A.</b>
10	2.5-3.0	Sistema dedicado
20	2.0-2.5	1-2 Clientes grandes
50	1.0-1.5	Pocos clientes relativamente grandes
100	0.5-1.0	5-20 Clientes medianos
1000	0.05-0.10	Muchos clientes pequeños

#### **1.4 Alcance del trabajo**

En este trabajo se recoge los principales desarrollos sobre este tema y se presenta de manera simple, con la principal motivación de dar a conocer el tema a los estudiantes de ingeniería y personas relacionadas a la elaboración de proyectos y supervisores de mantenimiento de los sistemas eléctricos de distribución.

En el informe se expone la metodología para la selección y el diseño de un transformador con factor k tomando como ejemplo un caso de estudio en particular.

## CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

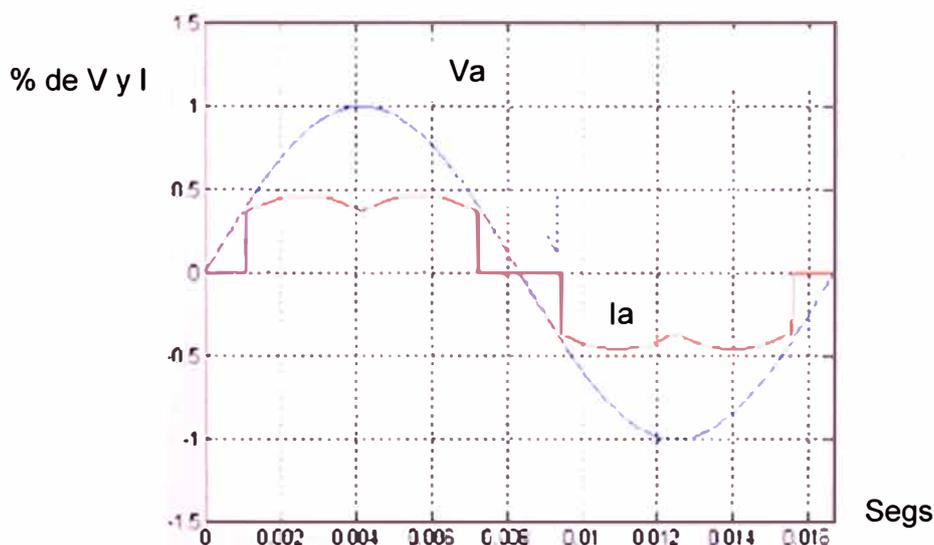
En este capítulo se exponen las bases teóricas conceptuales más importantes para la comprensión del sistema descrito en el presente informe. Se enfoca en los armónicos y selección y desclasificación de transformadores.

### 2.1 Armónicos

Los sistemas eléctricos cuentan actualmente con una gran cantidad de elementos llamados no lineales, los cuales generan a partir de formas de onda sinusoidal a la frecuencia de la red, otras ondas de diferentes frecuencias ocasionando el fenómeno conocido como generación de armónicos.

Se debe considerar a los armónicos como un nuevo fenómeno, no deseado que ha empezado a aparecer en las industrias debido al desarrollo de la electrónica de potencia, así como a la operación, cada vez más extendida, de grandes hornos de arco usados para fundición de acero, grandes instalaciones de computadoras y equipo electrónico de control. Todos ellos causan problemas tanto para los usuarios como para la entidad encargada de la prestación del servicio de energía eléctrica ocasionando diversos efectos nocivos en los equipos de la red.

Esta situación puede llegar a causar un funcionamiento incorrecto de muchos equipos (especialmente los menos robustos) que han sido diseñados para operar bajo condiciones normales (poca distorsión armónica).



**Figura 2.1** Señal de tensión y de corriente medidos en una carga no lineal.

### 2.1.1 Distorsión armónica

Cuando las corrientes y/o el voltaje de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la onda senoidal, se dice que la señal está distorsionada. La distorsión puede deberse a:

- Fenómenos transitorios, tales como arranque de motores, conmutación de capacitores, efectos de tormentas o fallas por cortocircuito entre otras (Figura 2.2).

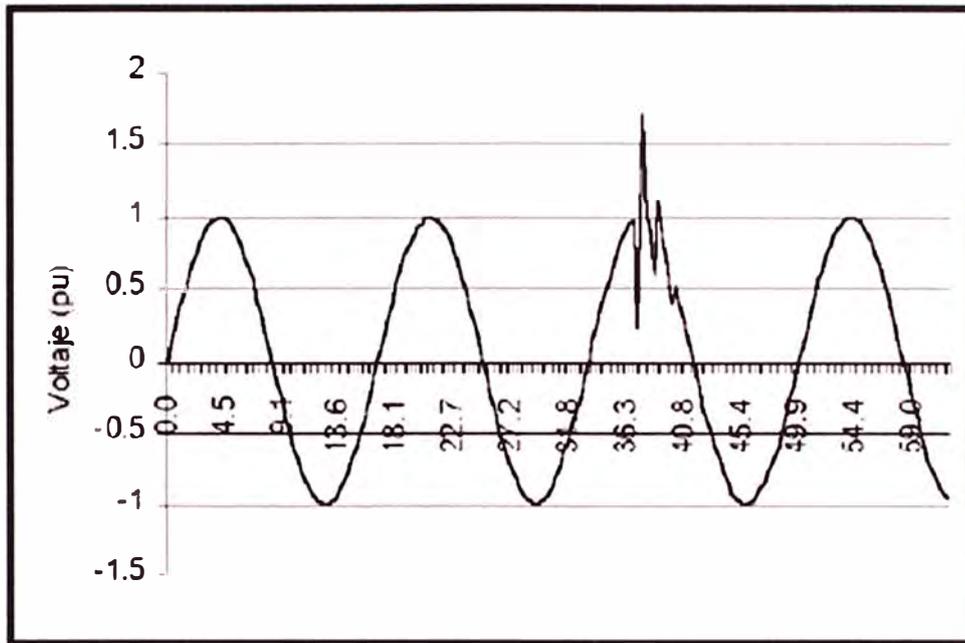


Figura 2.2 Fenómenos transitorios.

- Condiciones permanentes, que están relacionados con armónicas de estado estable. En los sistemas eléctricos es común encontrar que las señales tendrán una cierta distorsión que cuando es baja, no ocasiona problemas en la operación de equipos y dispositivos.

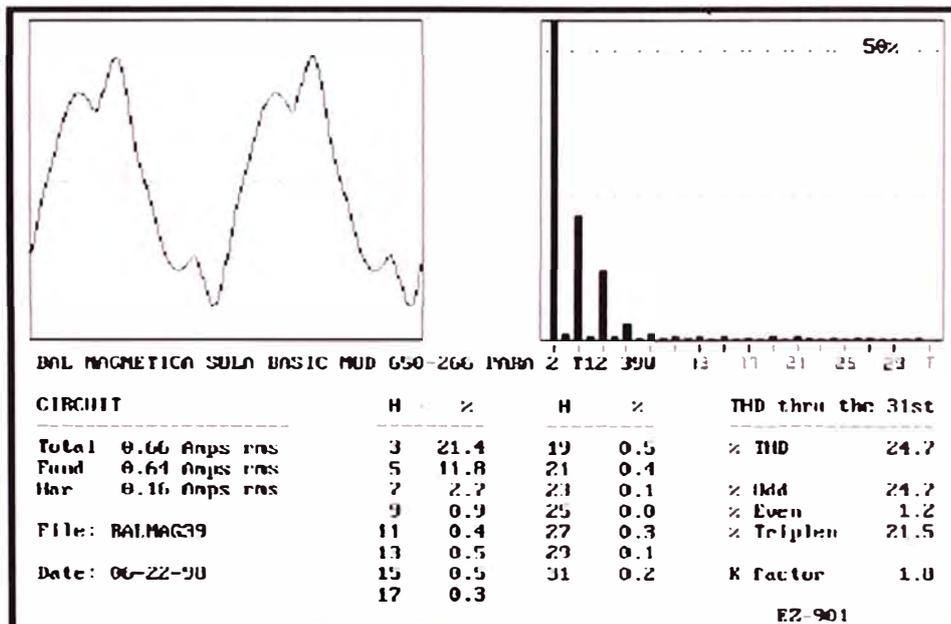


Figura 2.3 Condiciones permanentes

### 2.1.2 Definición armónica

Las armónicas son corrientes y/o voltajes sinusoidales presentes en un sistema eléctrico, que poseen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental a la cual el sistema está diseñado para operar. Así, en el sistema eléctrico con frecuencia de 60Hz, las formas onda distorsionadas pueden ser descompuestas en una suma de la frecuencia fundamental y las armónicas características como, la tercera (180Hz), quinta (300Hz), séptima (420Hz) y novena (540Hz), por citar algunas.

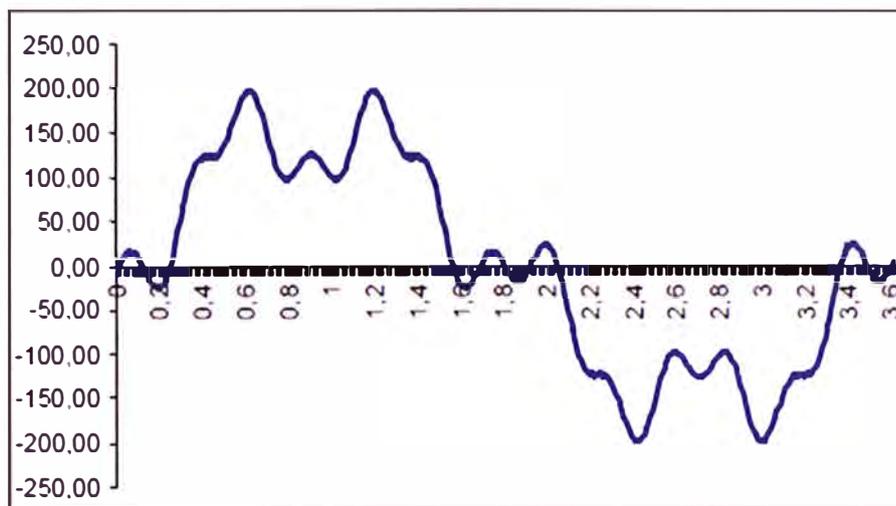


Figura 2.4 Onda Distorsionada.

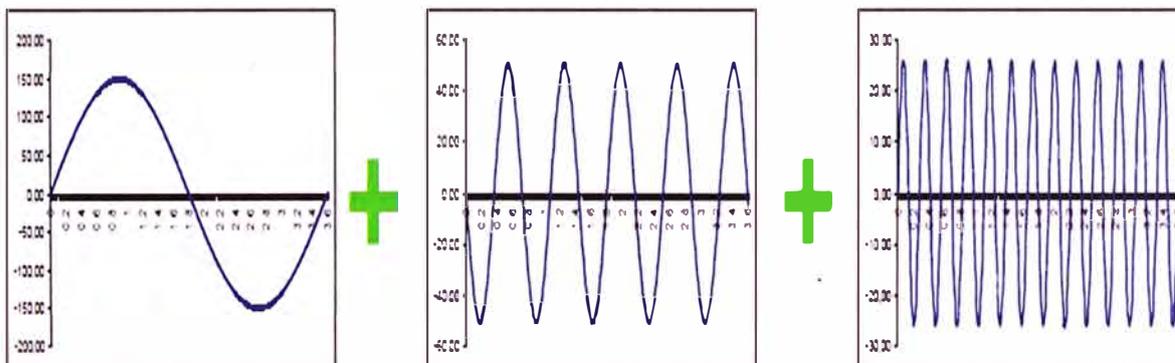


Figura 1.5 Componentes fundamental y armónicas.

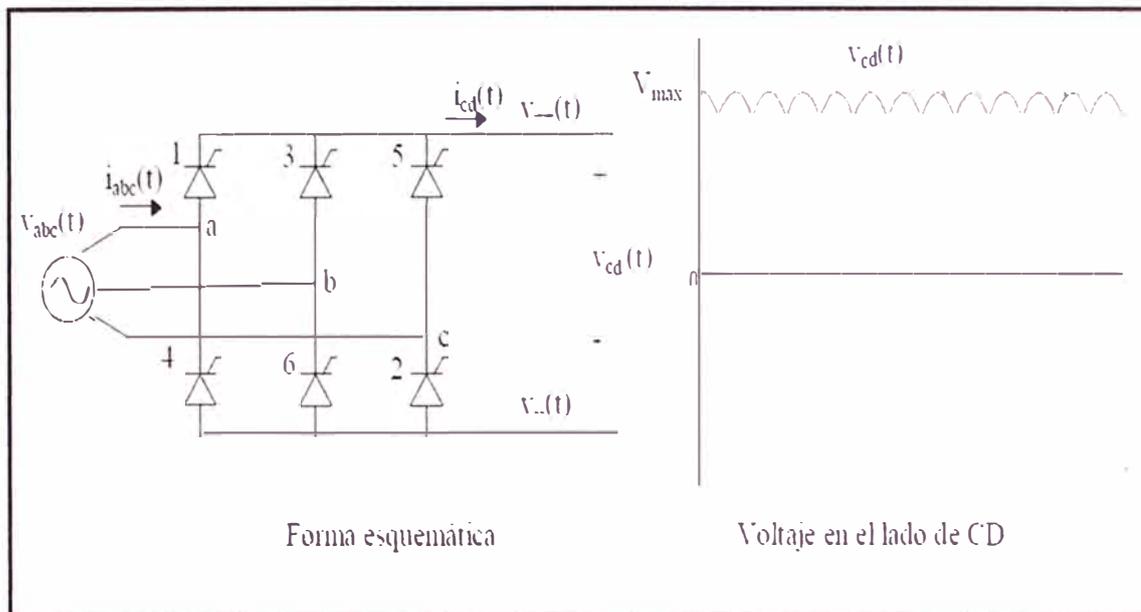
### 2.1.3 Fuentes de armónicos

Entre ellas se pueden mencionar a: Convertidores, hornos de Inducción, compensadores estáticos de potencia, hornos de arco eléctrico, saturación de transformadores, lámparas fluorescentes, equipos de cómputo, equipos domésticos, etc.

#### a. Convertidores.

Los convertidores son dispositivos que inyectan armónicas al sistema de corriente alterna debido a la operación de los elementos de switcheo (tiristores).

Un rectificador común es el que se muestra en la figura 2.6, cuyo índice de generación de armónicas en este caso depende de la operación del propio rectificador y de la carga que este alimenta.



**Figura 2.6** Rectificador trifásico

### b. Hornos de Inducción

Los hornos de inducción son utilizados en la industria de manufactura, este horno consiste en un rectificador e inversor, el cual controla la frecuencia de alimentación de una bobina. De esta manera la bobina mediante inducción hace que se calienten las piezas metálicas las cuales alcanzan temperaturas muy altas y después pasan a ser moldeadas.

### c. Compensadores estáticos de Potencia

Los compensadores estáticos utilizan tiristores para el control de la potencia reactiva y así mismo para el control del voltaje en redes de transmisión principalmente.

### d. Hornos de arco eléctrico

Estos hornos utilizados en la fundición del acero, por lo general utilizan electrodos que al hacer contacto con el acero se crea un arco eléctrico.

### e. Saturación de transformadores

La saturación de transformadores provoca la generación de armónicas, pues se trata de un elemento no lineal, las armónicas generadas por la saturación son las armónicas impares, principalmente la 3a. La generación de estas armónicas se presenta en estado estable para cuando el transformador está sobrecargado, provocando que el transformador opere en su región no lineal.

### f. Lámparas fluorescentes

El uso en gran escala de lámparas fluorescentes como un medio para reducir el consumo de energía, se ha visto recientemente incrementada en muchos lugares del mundo. La utilización de nuevas tecnologías que abarcan diseños de lámparas fluorescentes y lámparas de vapor de metal, constituyen sistemas más eficientes de

iluminación. Sin embargo es importante analizar el lado negativo del uso masivo de lámparas fluorescentes debido a la generación de armónicas.

Las lámparas incandescentes por ser lineales, producen la circulación de corriente fundamental al ser alimentadas por una fuente de voltaje senoidal de la misma frecuencia. En Cambio las lámparas fluorescentes son cargas no lineales por naturaleza, por lo tanto al aplicarles un voltaje senoidal, se produce una circulación de corrientes no sinusoidales a través de ellas. Ya que las lámparas fluorescentes de alta eficiencia se conectan a la red de distribución, las corrientes armónicas que se generan pueden fluir a través de los conductores hacia los transformadores en el sistema de distribución.

#### **g. Equipos de cómputo**

El equipo de cómputo, y en general todos los equipos de oficina funcionan en base a una fuente de alimentación la cual es un puente rectificador el mismo que posee la característica natural de generar frecuencias armónicas.

#### **h. Equipos domésticos**

La gran mayoría electrodomésticos utilizan para su funcionamiento una gran cantidad de dispositivos electrónicos, por lo tanto son fuentes de frecuencias armónicas.

#### **i. Futuras fuentes de armónicas**

A largo plazo, se prevé un aumento importante en el contenido de armónicos en redes eléctricas, debido al uso en gran escala de autos eléctricos que requerirán recargar sus baterías en grandes bancos de rectificación.

Otras posibles fuentes de armónicas son aquellas que requerirán la conversión de grandes volúmenes de energía, posiblemente producidas por fuentes no convencionales (Eólica, solar, etc.), el uso de ciclo-convertidores para la operación de máquinas de baja velocidad y alto par, el uso de dispositivos de conversión directa de energía como baterías de almacenamiento y celdas de combustible.

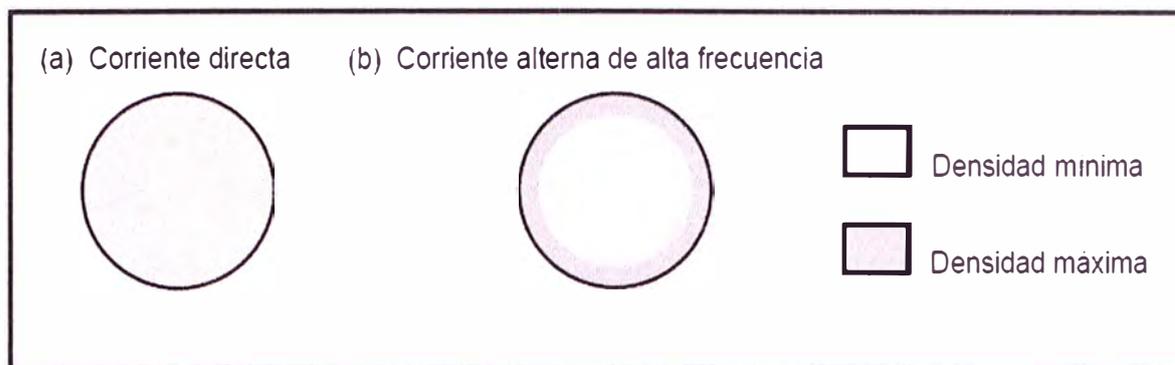
### **2.1.4 Efectos producidos por la distorsión armónica**

Los efectos producidos por la distorsión armónica en los elementos de los sistemas eléctricos han sido analizados tanto para circuitos particulares como para toda una red interconectada, no obstante en algunos casos es muy difícil cuantificarlos en forma específica puesto que dependen de muchos factores.

#### **a. Efectos en cables y conductores**

Al circular corriente directa, a través de un conductor se produce calentamiento como resultado de las pérdidas por efecto Joule ( $I^2R$ ), donde R es la resistencia al paso de la corriente directa del cable y la corriente está dada por el producto de la densidad de corriente por el área transversal del conductor. A medida que aumenta la frecuencia de la corriente que transporta el cable, disminuye el área efectiva por donde ésta circula puesto

que la densidad de corriente crece en la periferia exterior como muestra la Figura 2.7, lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor.



**Figura 2.7** Densidades de corriente a un mismo conductores

Debido al efecto piel, a medida que la frecuencia de la tensión o corriente aumenta, está tiende a circular por el exterior del conductor desaprovechando parte de la sección, lo que significa que aumenta la resistencia del cable. Esta mayor resistencia, unida a la circulación por el exterior provoca un aumento de temperatura del cable, con el consiguiente peligro de dañar el aislamiento del mismo y llegar, en ciertos casos, a generar un foco de incendio, en especial si el cable no está protegido contra el fuego.

#### **b. Efectos en transformadores.**

La mayoría de los transformadores están diseñados para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental de 60Hz, lo que implica que operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil.

Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas con carga o sin carga (de núcleo) y, que incluyen las pérdidas por efecto Joule ( $I^2R$ ), pérdidas por corrientes de Eddy y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores, u otras partes de hierro.

#### **c. Efectos en interruptores (circuit breakers)**

Los fusibles e interruptores termomagnéticos operan por el calentamiento producido por el valor rms de la corriente, por lo que protegen de manera efectiva a los conductores de fase y al equipo contra sobrecargas por corrientes armónicas. Por otro lado, la capacidad interruptiva no se ve afectada por las componentes armónicas en los sistemas eléctricos puesto que durante condiciones de falla, las fuentes que contribuyen a la misma son de frecuencia fundamental.

#### **d. Efecto en las barras de neutros**

Dado que este es el primer punto de unión de los neutros de las cargas monofásicas, en el caso balanceado, las corrientes de secuencia positiva y negativa se cancelan aquí. Estas barras pueden llegar a sobrecargarse por el efecto de cancelación de las

componentes armónicas de secuencia positiva y negativa entre los conductores que sirven diferentes cargas.

En el caso de corrientes armónicas de secuencia cero (armónicas “triplen”), estas no se cancelan en el neutro aun con condiciones balanceadas, por lo que estas barras se pueden sobrecargar por el flujo de estas corrientes. En realidad, las barras de neutros transportan corrientes de secuencia positiva y negativa producidas por el desbalance de cargas más las armónicas “triplen” de secuencia cero generadas por estas. Por esta razón las barras que están dimensionadas para soportar la misma corriente de fase pueden sobrecargarse fácilmente en presencia de cargas no lineales.

En el caso que se estén alimentando cargas no lineales, es recomendable que las barras de neutros tengan una capacidad de corriente igual al doble de las fases.

#### **e. Efecto en los bancos de condensadores (Resonancia)**

El principal problema que se puede tener al instalar un banco de capacitores en circuitos que alimenten cargas no lineales es la resonancia tanto serie como paralelo, Un condensador en paralelo con una bobina forma un circuito resonante, capaz de amplificar las señales de una determinada frecuencia. Cuando en una instalación eléctrica colocamos un banco de condensadores con la instalación que es inductiva. Este circuito resonante puede amplificar ciertas frecuencias armónicas, pudiendo hacer que los efectos de éstas sean todavía más perjudiciales, llegan en ciertos casos a quemar los bancos de condensadores.

“Antes de instalar un banco de condensadores hay que medir, cuantificar los armónicos y, en caso de que puedan ser perjudiciales, proceder a eliminarlos a través de un filtro pasivo, o si se puede de un compensador activo”

#### **f. Efecto en los motores de inducción.**

Fundamentalmente, las armónicas producen los siguientes efectos en las máquinas de corriente alterna; un aumento en sus pérdidas y la disminución en el torque generado. Este es un tema importante en la industria y a continuación se mostrará un estudio simplificado de estos efectos.

- Pérdidas por efecto Joule ( $I^2R$ ) en el estator: Según la IEEE, las pérdidas en el estator son determinadas utilizando la resistencia a corriente directa de la máquina, corregida a la temperatura especificada. Al operar la máquina de inducción con voltajes con contenido armónico no solo aumentan estas pérdidas por el efecto piel que incrementa el valor de la resistencia efectiva, sino que también aumenta el valor de la corriente de magnetización, incrementándose aún más las pérdidas por efecto Joule.

- Pérdidas por efecto Joule ( $I^2R$ ) en el rotor: Estas pérdidas aumentan de manera más significativa que las anteriores, por el diseño de la jaula en los motores de inducción que

se basa en el aprovechamiento del efecto piel para el arranque. Esta resistencia aumenta en forma proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia y por ende las pérdidas.

- Pérdidas en el núcleo: Estas pérdidas son función de la densidad de flujo en la máquina. Estas aumentan con excitación de voltaje no senoidal puesto que se tienen densidades de flujo pico más elevadas, sin embargo su aumento es aún menor que el de las pérdidas mencionadas anteriormente e incluso son más difíciles de cuantificar.

## 2.2 Selección y desclasificación de transformadores

Esta sección desarrolla los siguientes ítems:

- Transformadores con cargas no lineales
- Pérdidas en un transformador
- Desclasificación de transformadores

### 2.2.1 Transformadores con cargas no lineales

Se debe tener presente que los transformadores que alimentan cargas no lineales, tienen como principal consecuencia el aumento de las pérdidas, principalmente por las corrientes armónicas que circulan en los arrollamientos. El aumento de pérdidas hace que se genere más calor en el transformador, de modo que la temperatura de funcionamiento aumenta, lo que provoca el deterioro del aislamiento y una eventual reducción de la vida útil del transformador.

El creciente uso de cargas eléctricas no lineales conlleva a la aplicación de cargas armónicas a los transformadores de distribución de pequeña y mediana potencia.

La norma IEEE Std C57.110-1998 Recommended Practice for Establishing Transformer Capability, (Práctica Recomendada para el establecimiento de capacidad del transformador al suministrar corrientes de carga no sinusoidales)

Esta norma es aplicable a transformadores normales de tipos seco o inmerso en aceite existentes, con una cierta carga no lineal incluyendo los de devanado impregnado y encapsulado en resina.

### 2.2.2 Pérdidas en un transformador

Recordemos que las pérdidas en un transformador están compuestas por las pérdidas en vacío o de núcleo y las pérdidas con carga, estas a su vez se las subdivide en pérdidas Joule ( $I^2R$ ), pérdidas por corrientes parásitas y pérdidas adicionales por dispersión.

$$P_T = P_{fe} + P_{cu} \quad (2.1)$$

donde:

- $P_T$  = Pérdidas totales
- $P_{fe}$  = Pérdidas en vacío o de núcleo
- $P_{cu}$  = Pérdidas con carga

### a. Pérdidas en vacío o de núcleo.

Son producidas por el voltaje de excitación en el núcleo. La forma de onda de voltaje en el primario es considerada senoidal independientemente de la corriente de carga, por lo que no se considera que aumentan para corrientes de carga no senoidales. Aunque la corriente de magnetización consiste de armónicas, éstas son muy pequeñas comparadas con las de la corriente de carga, por lo que sus efectos en las pérdidas totales son mínimos.

### b. Pérdidas en el cobre

$$P_{cu} = I^2 R + P_{EC} + P_{SL} \quad (2.2)$$

Donde:

- $I^2 R$  = Pérdidas debidas a la corrientes de carga en los arrollamientos
- $P_{EC}$  = Pérdidas por corrientes parásitas en los arrollamientos
- $P_{SL}$  = Pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc.

#### b.1. Pérdidas Joule ( $I^2 R$ )

Las pérdidas  $I^2 R$  las genera la corriente que pasa por las resistencias de los arrollamientos, se conoce como pérdida óhmica. La pérdida óhmica es proporcional al cuadrado de la magnitud de la corriente de carga, incluyendo las componentes armónicas.

#### b.2. Pérdidas por corrientes parásitas ( $P_{EC}$ )

Las pérdidas por corrientes parásitas a frecuencia fundamental son proporcionales al cuadrado de la corriente eficaz y al cuadrado de la frecuencia (orden de armónico  $h$ ), razón por la cual se puede tener un aumento excesivo de éstas en los devanados que conducen corrientes de carga no senoidal, es decir:

$$P_{EC} = P_{EC,R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \quad (2.3)$$

Donde:

- $h$  = orden del armónico, 1, 3, 5, 7, etc.
- $h_{max}$  = el mayor orden de armónico a considerar.
- $I_h$  = corriente en el armónico de orden  $h$ , en amperios.
- $I_R$  = corriente nominal, en amperios..
- $P_{EC,R}$  = pérdidas por corriente parásitas a corriente y frecuencia nominal.

#### b.3. Pérdidas por dispersión ( $P_{SL}$ )

Dada por la fórmula (2.4):

$$P_{SL} = P_{SL,R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 h \quad (2.4)$$

Donde:  $P_{SL,R}$  = pérdidas por dispersión a corriente y frecuencia nominal.

Que indica que el resto de pérdidas adicionales por dispersión, en el núcleo, las partes estructurales; también se incrementa con el cuadrado de la corriente pero no con el cuadrado de la frecuencia como en los devanados:

### 2.2.3 Desclasificación de transformadores

En el caso de los transformadores conectados en delta - estrella (comúnmente en el sistema de distribución) que alimentan cargas no lineales monofásicas, las armónicas "triplen" (múltiplos de 3) circularán por las fases y el neutro del lado de la conexión en estrella, pero no aparecerán en el lado de la conexión en delta, ya que se quedan atrapadas en ésta produciendo sobrecalentamiento de los devanados.

Por todo esto en países como EEUU, Canadá y la Comunidad Europea, se pensó en cuantificar el calentamiento producido en los transformadores cuando se presentan armónicos. En esta situación el transformador no debe funcionar a su potencia nominal y debe disminuirse la carga o en peor de los casos cambiarse por otro de mayor potencia. El transformador se "desclasifica" asociándole una potencia equivalente.

La potencia equivalente de un transformador es la correspondiente a la senoidal que provoque las mismas pérdidas que las producidas con la corriente no senoidal aplicada; esta potencia equivalente es igual a la potencia basada en el valor eficaz de la corriente no senoidal multiplicada por el factor "K".

#### a. Método "K - factor".

Existen varios procedimientos para seleccionar un transformador teniendo en cuenta las pérdidas adicionales.

El primero, en los Estados Unidos los fabricantes de transformadores en acuerdo con los Laboratorios Underwriter's (UL), establecieron un método que consiste de calcular un factor, que representa los posibles efectos de calentamiento de una carga no lineal sobre el transformador, este factor permite diseñar el transformador de forma que se ajuste al incremento de las pérdidas.

Este factor de incremento es el que se conoce como el "K-factor", se calcula mediante la ecuación (2.5).

$$K = \sum_{h=2}^{h=h_{\max}} h^2 I_h^2 \quad (2.5)$$

Donde:

- h = orden del armónico.
- $I_h$  = fracción de la corriente eficaz total de correspondiente al h-ésimo armónico

Muchos dispositivos y equipos de medida de la calidad de energía miden directamente el K-factor de la corriente de la carga. Una vez determinado el factor

podemos seleccionar un transformador que tenga una clasificación de K-factor inmediata superior, de los siguientes valores normalizados: 4, 9, 13, 20, 30, 40 y 50, siendo los más usados 4, 13 y 20.

### b. Método "factor K"

Este segundo método, es utilizado en Europa, consiste en estimar cuánto debe desclasificarse un transformador de potencia estándar de modo que las pérdidas totales en la carga armónica no superen las pérdidas a la frecuencia fundamental para la cual se ha diseñado el transformador. Para ello se emplea la siguiente ecuación.

$$K = \left[ 1 + \frac{e}{1+e} \left( \frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{h=2}^{h_{\max}} \left( h^q \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

Donde:

- e = cociente de las pérdidas por corrientes parásitas divididas por las pérdidas óhmicas, ambas a la temperatura de referencia
- h = orden del armónico
- I = valor eficaz de la corriente sinusoidal conteniendo todos los armónicos
- $I_h$  = valor de la corriente del h-ésimo armónico
- $I_1$  = valor de la corriente fundamental
- q = constante exponencial que depende del tipo de arrollamiento y la frecuencia, los valores típicos son 1.70 para transformadores con conductores de sección circular o rectangular y 1.5 para transformadores con arrollamientos de conductores de lámina en baja tensión.

### c. Tipo de "factor K"

En teoría, un transformador puede ser diseñado para otras evaluaciones del K-factor de entre estos valores y para valores superiores. Las clasificaciones en lo general se hacen referencia, de conformidad con la norma IEEE Std C57.110-1998. Según la tabla:

**Tabla 2.1** Clasificación de factor K

<b>K-1:</b>	Esta es la evaluación de cualquier transformador convencional que está diseñado para soportar los efectos del calentamiento de las pérdidas adicionales por corrientes parásitas resultantes a la frecuencia nominal de 60Hz, con el transformador cargado con corriente senoidal. Esta unidad puede o no estar diseñada para soportar el calentamiento adicional de los armónicos en su corriente de carga.
<b>K-4</b>	Un transformador con esta evaluación fue diseñado para suministrar kVA nominal, sin sobrecalentar, a un carga consistente en 100% de la frecuencia nominal de 60Hz, corriente senoidal en la fundamental, además de: 16 % de la fundamental con la 3 <sup>ra</sup> corriente armónica. 10% de los fundamentales, como 5 <sup>ta</sup> . 7% de los fundamentales, como 7 <sup>ma</sup> .

	5.5% de los fundamentales, como el 9 <sup>na</sup> y porcentajes menores a través de la 25 <sup>va</sup> armónica. El "4" indica su capacidad para soportar cuatro veces las pérdidas de las corrientes parásitas de un transformador de K-1.
<b>K-9</b>	Un transformador K-9 puede soportar 163% de la carga armónica de un transformador clasificado de K-4.
<b>K-13</b>	Un transformador de K-13 puede acomodar 200% de la carga nominal armónica de un transformador clasificado de K-4.
<b>K-20, K-30, K-40</b>	El número más alto de cada una de estas clasificaciones del factor K indica la capacidad de trabajar con cantidades sucesivamente mayores de niveles de armónicos de la carga sin riesgo de sobrecalentar.

En el siguiente cuadro, se presenta una tabla con factores K típicos de las cargas no lineales más comunes que inyectan armónicos al sistema.

**Tabla 2.2** Factores K típicos de las cargas no lineales más comunes

TIPO DE CARGA	Factor K
Iluminación con lámparas de descarga	K-4
UPS con filtro opcional a la entrada.	K-4
Máquinas de soldar.	K-4
Equipos de calefacción por inducción	K-4
PLCs y controles de estado sólido (variadores de velocidad)	K-4
Equipos de telecomunicación (ejemplo PBX)	K-13
UPS sin filtro a la entrada.	K-13
Circuitos con receptáculo de varios cables en áreas de cuidado general de unidades de salud, salones de clase de escuelas, etc.	K-13
Circuitos con receptáculo de varios cables alimentando equipo de inspección o pruebas en una línea de ensamble o producción.	K-13
Las cargas de los servidores (mainframe)	K-20
Drives de estado sólido para motores (variadores de velocidad)	K-20
Alimentación del circuito con receptáculos en las áreas clave de seguridad, cuarto de cirugías/operación en hospitales.	K-20

### Calculo del "K-factor"

Usando los datos tomados de las mediciones recopiladas durante varios días y cada 5 minutos de hasta 63 armónicos. Para el cálculo se utilizan solo las nueve primeras más significativas; en este caso se tuvo que usar los datos del día 03/13/212 a las 13:55 horas, ya que nos dan el mayor valor de corrientes.

Siguiendo la fórmula:

$$K = \sum_{h=2}^{h=h_{\max}} h^2 I_h^2 \quad (2.7)$$

Tabulando los datos en la Tabla 2.3

**Tabla 2.3** Tabulación de datos

h	$I_h$	$h^2$	$(I_h/I)$	$(I_h/I)^2$	$(I_h/I)^2 h^2$
1	1008,879	1	0,998	0,9968	0,997
5	56,092	25	0,056	0,0031	0,077
7	10,255	49	0,010	0,0001	0,005
11	1,864	121	0,002	0,0000	0,000
13	1,398	169	0,001	0,0000	0,000
17	0,932	289	0,001	0,0000	0,000
19	0,9322	361	0,0009	0,0000	0,000
23	2,175	529	0,0022	0,0000	0,002
25	4,039	625	0,0040	0,0000	0,010
I	1010,50			k-factor	1,093

Se tiene:

- $I_{rms}=1010.50$  A
- $K\text{-factor}_{rms}=1.093$

Por tanto siguiendo este método de desclasificación se tiene que usar un K-factor igual a 4.

#### **d. Consideraciones para el diseño de un transformador.**

El método de sobredimensionar los transformadores tiene como principal inconveniente que no se puede cambiar la placa de características, por lo tanto la próxima (personal de mantenimiento), que lo revise ignora que este transformador ha sido desclasificado y puede considerar que está trabajando muy por debajo de los valores nominales.

Los conductores en los arrollamientos deben tener una menor sección en la dirección del flujo de dispersión, ya que una mayor área incrementará unas mayores corrientes circulantes y por ende pérdidas mayores.

Se deben realizar transposiciones de los conductores para evitar desbalances de tensiones en conductores paralelos de una misma espira.

Se debe trabajar con una menor inducción magnética del núcleo, para evitar que las corrientes parásitas que son función de la frecuencia no se sature.

Se debe usar planchas antimagnéticas para corrientes altas ya que poseen menores perdidas que las planchas de hierro LAC o LAF en W/m, empleados en los tanques.

## **CAPÍTULO III**

### **ANÁLISIS DE ARMÓNICOS Y CÁLCULO DEL FACTOR K**

Este capítulo desarrolla, para dos casos de estudio, los siguientes ítems: Alcance, marco normativo, esquema de medición, metodología de medición y equipo analizador utilizado, resultados, comentarios, recomendaciones, conclusiones

#### **3.1 Primer caso de estudio**

La empresa DYNACOR EXPLORACIONES DEL PERÚ S.A. cuenta con unidad minera y una micro central hidroeléctrica, que se encuentra bajo la gerencia de HIDROPESAC; ha tenido problemas en su sistema eléctrico ya que la micro central a salido fuera de servicio intempestivamente en varias ocasiones.

En objetivo del presente caso de estudio es evaluar las perturbaciones eléctricas en la Unidad Minera y la Micro Central Hidroeléctrica de Pasto Bueno. Cabe mencionar que las perturbaciones eléctricas están referidas a eventos transitorios e indicadores de calidad de energía. Si hay presencia significativa de armónicos, se hará el cálculo del factor K.

##### **3.1.1 Alcance**

Los alcances que ayudaran al logro del objetivo son los siguientes:

- Realizar mediciones de perturbaciones eléctricas en el nivel de 460V en Mina y en el nivel de 400V en la Micro Central Hidroeléctrica Pasto Bueno.
- Recopilación de la siguiente información técnica:
  - o Planos del Sistema eléctrico de la Unidad Minera.
  - o Estudios de coordinación de protección.
  - o Archivos de los eventos de la Micro Central.
  - o Facturas de energía de los meses anteriores (Enero, Febrero)
- Procesamiento de los indicadores de calidad medidos.
- Evaluación de los indicadores según Norma Técnica de Calidad de servicios Eléctricos (NTCSE).
- Evaluación de las armónicas de corriente según el estándar internacional. IEEE 519.
- Análisis de los niveles de distorsión total "THD" existente.

##### **3.1.2 Marco normativo**

Consta de dos partes: Control de la Calidad según la NTCSE y Control de la Calidad según el STD IEEE 519.

### a. Control de la Calidad según la NTCSE

Según la NTCSE el control de la calidad de los servicios eléctricos aplicables a las empresas involucradas directa o indirectamente en la prestación y uso de este servicio se realiza considerando la calidad de producto la cual fija requisitos mínimos a la amplitud y forma de la onda de tensión a través de los indicadores de tensión y perturbaciones.

La NTCSE solo contempla indicadores de calidad para el control del flicker y tensiones armónicas.

- Flicker.- El valor Pst. o perceptibilidad a corto plazo indica cuando una persona normal percibirá un cambio de luminosidad en los focos de 60 vatios a 120V ó 230V. El valor límite según la NTCSE para Pst es 1, esto significa que para valores mayores de 1 el fenómeno de flicker sería percibido por el ojo humano.

- Armónicas de Tensión.- La forma de evaluar una tensión o una corriente distorsionada es a través del parámetro denominado distorsión armónica total THD. Las tolerancias establecidas para las tensiones armónicas individuales según la NTCSE son las que se muestran en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Límite de distorsión individual de tensión

Alta y Muy Tensión							
Armónico	%	Armónico	%	Armónico	%	Armónico	%
2	1.5	12	0.2	22	0.2	32	0.2
3	1.5	13	1.5	23	0.7	33	0.2
4	1.0	14	0.2	24	0.2	34	0.2
5	2.0	15	0.3	25	0.7	35	0.171
6	0.5	16	0.2	26	0.2	36	0.2
7	2.0	17	1.0	27	0.2	37	0.168
8	0.2	18	0.2	28	0.2	38	0.2
9	1.0	19	1.0	29	0.186	39	0.2
10	0.2	20	0.2	30	0.2	40	0.2
11	1.5	21	0.2	31	0.181		
Límite máximo de THD de tensión = 3 %							

Para tensiones menores o iguales a 30 kV el sistema debe cumplir un máximo de dispersión de tensión THD de 8%, los límites de tensiones armónicas individuales están dados en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2** Límite de distorsión individual de tensión

<b>Baja y Media Tensión hasta 35kV</b>							
<b>Armónico</b>	<b>%</b>	<b>Armónico</b>	<b>%</b>	<b>Armónico</b>	<b>%</b>	<b>Armónico</b>	<b>%</b>
2	2.0	12	0.2	22	0.2	32	0.2
3	5.0	13	3.0	23	1.5	33	0.2
4	1.0	14	0.2	24	0.2	34	0.2
5	6.0	15	0.3	25	1.5	35	0.557
6	0.5	16	0.2	26	0.2	36	0.2
7	5.0	17	2.0	27	0.2	37	0.538
8	0.5	18	0.2	28	0.2	38	0.2
9	1.5	19	1.5	29	0.631	39	0.2
10	0.5	20	0.2	30	0.2	40	0.2
11	3.5	21	0.2	31	0.603		
Límite máximo de THD de tensión = 8 %							

La NTCSE especifica tolerancias en cuanto a las variaciones de los niveles de tensión medidos. El periodo de medición es de siete días calendarios continuos promediados por intervalos de 15 minutos.

El indicador de calidad de tensión se refiere a la variación de la tensión la cual no debe ser mayor al  $\pm 5\%$  de la tensión nominal.

#### **b. Control de la Calidad según el STD IEEE 519.**

El Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) mediante el grupo de trabajo "IEEE-PES Power System Harmonics" y en base a estudios de armónicos ha recopilado en el documento IEEE-519 (Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems) el cual establece límites para el control de los problemas ocasionados por los armónicos.

Los límites recomendables se refieren a las condiciones más desfavorables en régimen permanente de funcionamiento; por tanto, durante transitorios estos límites pueden, ser sobrepasados.

Es importante mencionar que el estándar define solo recomendaciones prácticas y no es una actual norma legal.

La filosofía del estándar es recomendar límites de armónicos para las empresas

concesionarias y los clientes finales.

Para el caso de las empresas concesionarias éstas deben mantener un THD de tensión dentro de las tolerancias mientras los clientes finales deben mantener dentro del límite establecido su inyección de corriente armónica. Asimismo la empresa concesionaria debe asegurar que en su sistema eléctrico no existan frecuencias de resonancia que coincidan con las frecuencias de las corrientes armónicas de las cargas de los clientes finales.

Para establecer los límites de armónicos de corriente, éste estándar, considera los niveles de corto circuito de la red, ya que dicho parámetro está relacionado con la frecuencia de resonancia del sistema y con el THD de tensión.

A diferencia de la NTCSE, éste estándar contempla la evaluación de armónicos de corriente debido a que los armónicos de tensión en el sistema eléctrico son determinados en función a la corriente armónica inyectada y a la impedancia de la red del sistema a cada frecuencia.

El cálculo de los límites de las armónicas de corriente está en función de la magnitud de la carga, es decir para cargas grandes tendrían menores límites dado que estos representarían en mayor proporción el aporte de armónicos en la red.

### **b.1 Límites de Tensión Armónica**

En esta recomendación no se diferencia entre las tasas de los distintos armónicos y se especifican valores máximos para el índice THD y armónicos individuales en función de la tensión a la frecuencia fundamental. Los límites específicos se muestran en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3** Límite de distorsión individual de tensión

<b>Tensión en el PAC</b>	<b>Distorsión de Tensión Individual (%)</b>	<b>Distorsión de la Tensión Total THD</b>
Hasta 69kV	3.0	5.0
69.001kV a 161kV	1.5	2.5
Más de 161kV	1.0	1.5

### **b.2 Límites de corrientes armónicas**

Los límites establecidos a los clientes individuales conectados al mismo punto de acoplamiento común se calculan en proporción a sus respectivas potencias instaladas.

Los límites de corriente recomendados en los cuadros deben ser interpretados como "caso más desfavorable" en condiciones normales de funcionamiento de duración superior a una hora. Para periodos más breves, los valores de los cuadros pueden ser incrementados en un 50%, como indica la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Limite de Corrientes de distorsión (Ih) en % de IL

<b>Límites de la corriente de distorsión para sistemas de distribución (120 - 69kV)</b>						
$I_{sc} / I_L h$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1 000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
<b>Límites de Armónicas de Corriente para cargas no lineales en el PAC con otras cargas (69kV - 161kV)</b>						
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.50	7.5
>1 000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.70	10.0
<b>Límites de la Corriente de Distorsión para Sistemas de Alta Tensión (&gt;161kV) con Generación y cogeneración Dispersas</b>						
<50	2.0	1.0	0.75	0.30	0.15	2.50
>50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Los armónicos pares se limitan al 25% del limite de los armónicos impares. Las distorsiones de corriente que resulten de una corriente directa, tales como las de los convertidores de media onda, no son permitidas.

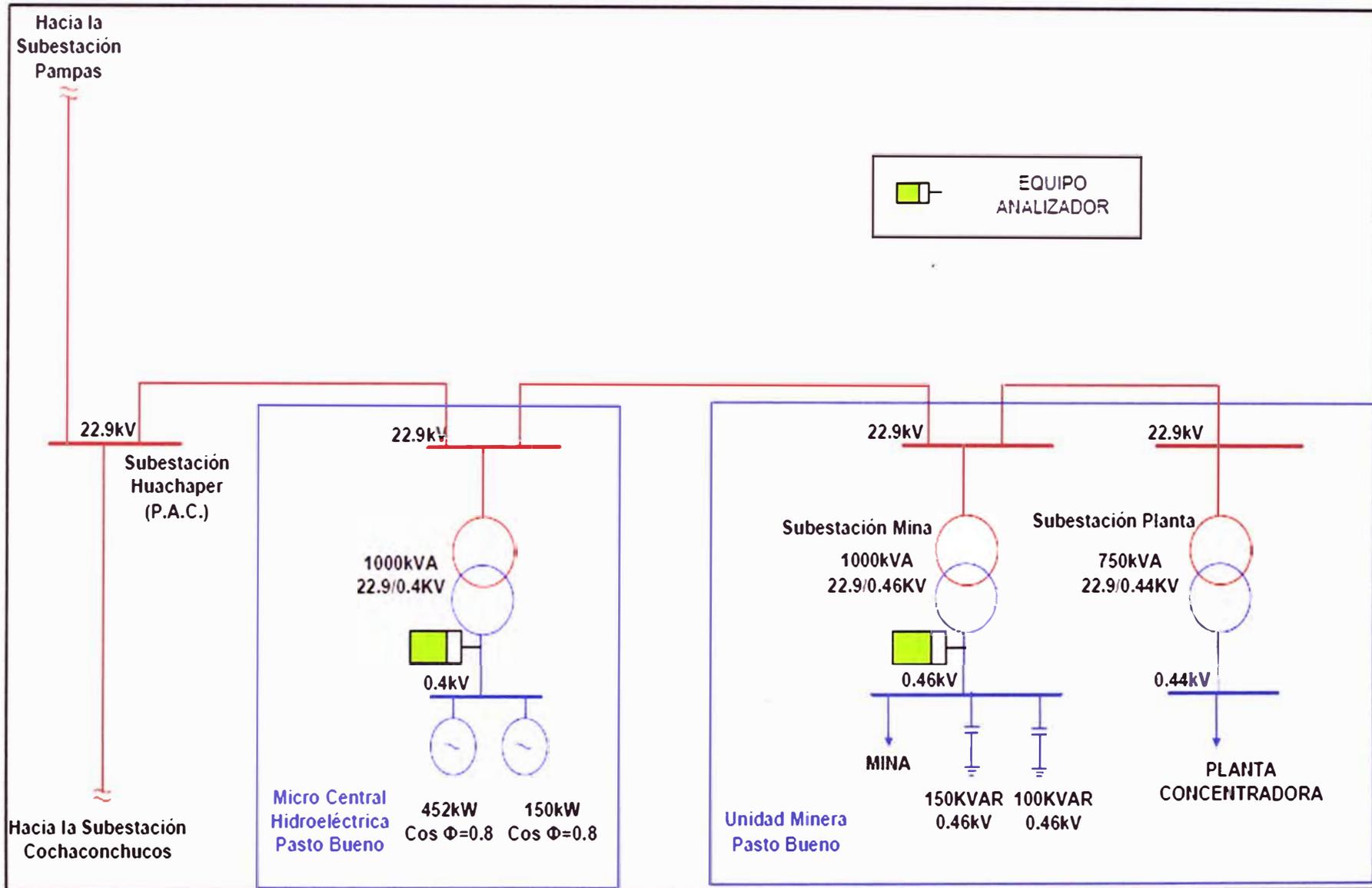
\*Todos los equipos de generación de potencia se deben limitar a estos valores de distorsión de corriente, independiente de su  $I_{sc}/I_L$ .

Donde:

- $I_{sc}$  = Máxima corriente de cortocircuito en el PAC
- $I_L$  = Máxima corriente de carga (componente fundamental) en el PAC.

### 3.1.3 Esquema de medición

La topología del sistema Eléctrico y los puntos de medición evaluados se muestran en el esquema de la Figura 3.1.



**Figura 3.1** Ubicación del analizador de red para realizar la medición en el lado de baja tensión de los transformadores de 1000kVA

La unidad minera tiene dos sistemas eléctricos independientes, uno para la planta concentradora y otro para la operación de la mina la cual cuenta con un condensador de 250kVAR.

Los puntos eléctricos indicados fueron acordados con la gerencia de Hidropesac con la finalidad de verificar la causa por la cual la micro central tiene salidas de servicio intempestivas. Las mediciones fueron realizadas en los siguientes puntos eléctricos, Tabla 3.5.

**Tabla 3.5** Puntos de medición y nivel de tensión

Ítem	Puntos de medición	Nivel de Tensión
1	Mina	460 V
2	Micro Central	400 V

Los registros fueron obtenidos a través de equipos analizadores de potencia los cuales fueron programados para que registren variables eléctricas, por un periodo de 7 días acorde con la Normatividad vigente.

El periodo de medición estuvo comprendido entre el 5 al 12 de abril del presente año.

#### **3.1.4 Metodología de medición y equipo Utilizado.**

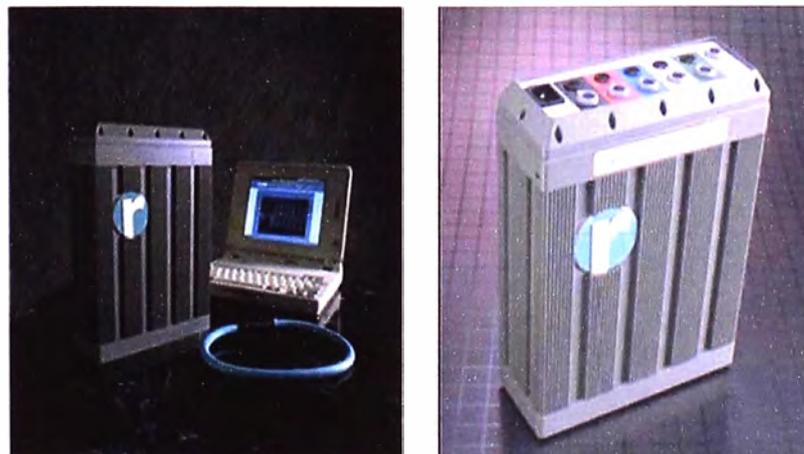
Las mediciones fueron programadas en coordinación con las empresas Hidropesac y Dynacor Exploraciones del Perú S.A.

El periodo de mediciones fue de siete días continuos cumpliendo con lo establecido por la NTCSE.

Los parámetros fueron registrados a intervalos de 5 minutos, para la tensión, y a 10 minutos para las perturbaciones (armónicos y flicker).

Para realizar la evaluación de las armónicas de corriente, también se programó medir armónicas de corriente individuales por fase del orden 2 al 40.

El equipo utilizado fue el analizador POWER RECORDER (RELIABLE POWER METERS) modelo 1650. (Figura 3.2)



**Figura. 3.2** Equipo RPM Modelo 1650

El tipo de conexión realizada para la instalación fue de tipo delta. (Figura 3.3)

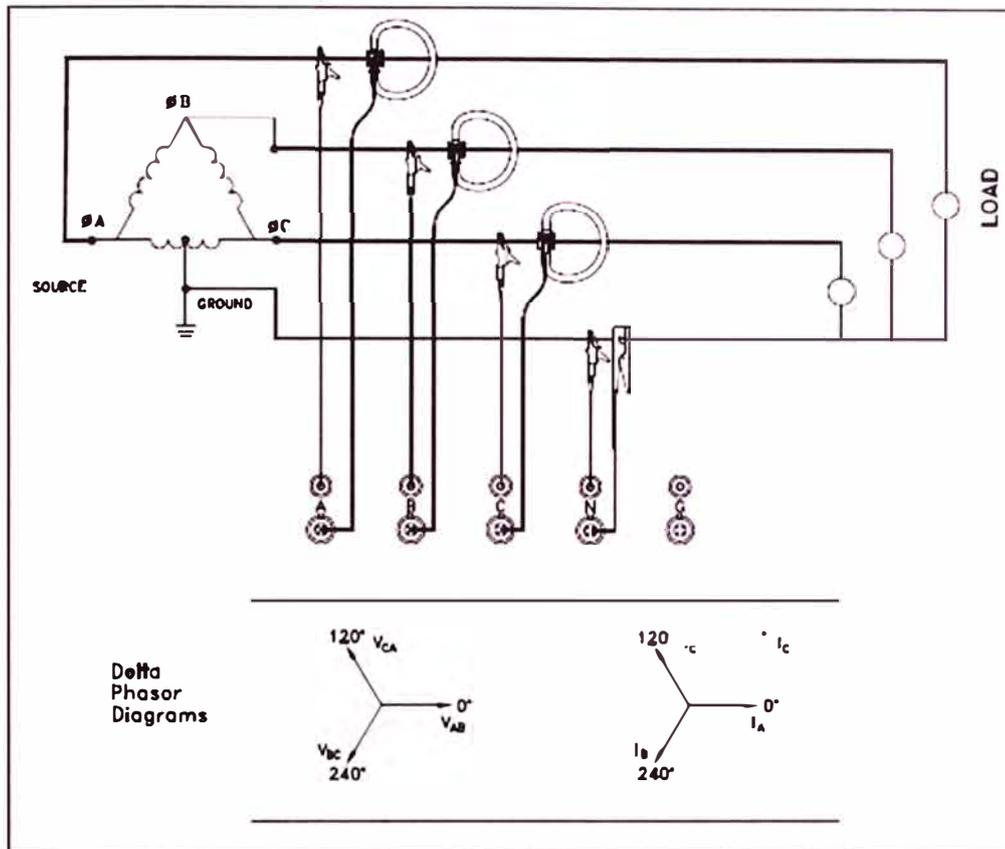


Figura. 3.3 Esquema de conexión

### 3.1.5 Resultados

En esta sección se muestra los resultados de la evaluación de los indicadores de calidad según la NTCSE. Las variables medidas fueron las que figuran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Variables medidas

Ítem	Variable	Unidad
1	Tensión	Voltios
2	Armónicas de Tensión	Voltios
3	Flicker	Pst
4	Potencia	MW

Las mismas que se encuentran expresadas en las unidades internacionales utilizadas por los equipos de medición; es necesario llevar a cabo, un proceso para determinar los indicadores de calidad de producto según la NTCSE.

Para el caso de las armónicas de tensión (del orden 2 al 40), éstas tienen que ser representadas en porcentaje respecto a la tensión nominal. Asimismo, para el caso del flicker, se debe determinar la diferencia de los registros respecto a 1Pst.

Por otro lado, para la cuantificación de compensación económica por mala calidad, los perfiles de potencia deben ser representados en energía.

Una vez determinados los indicadores, se utiliza el procedimiento de la NTCSE, para el cálculo de las compensaciones.

Las compensaciones son determinadas siempre y cuando, el 3% de los intervalos de la muestra excedan alguna tolerancia establecida por la NTCSE respecto a la calidad de tensión y 5% para perturbaciones.

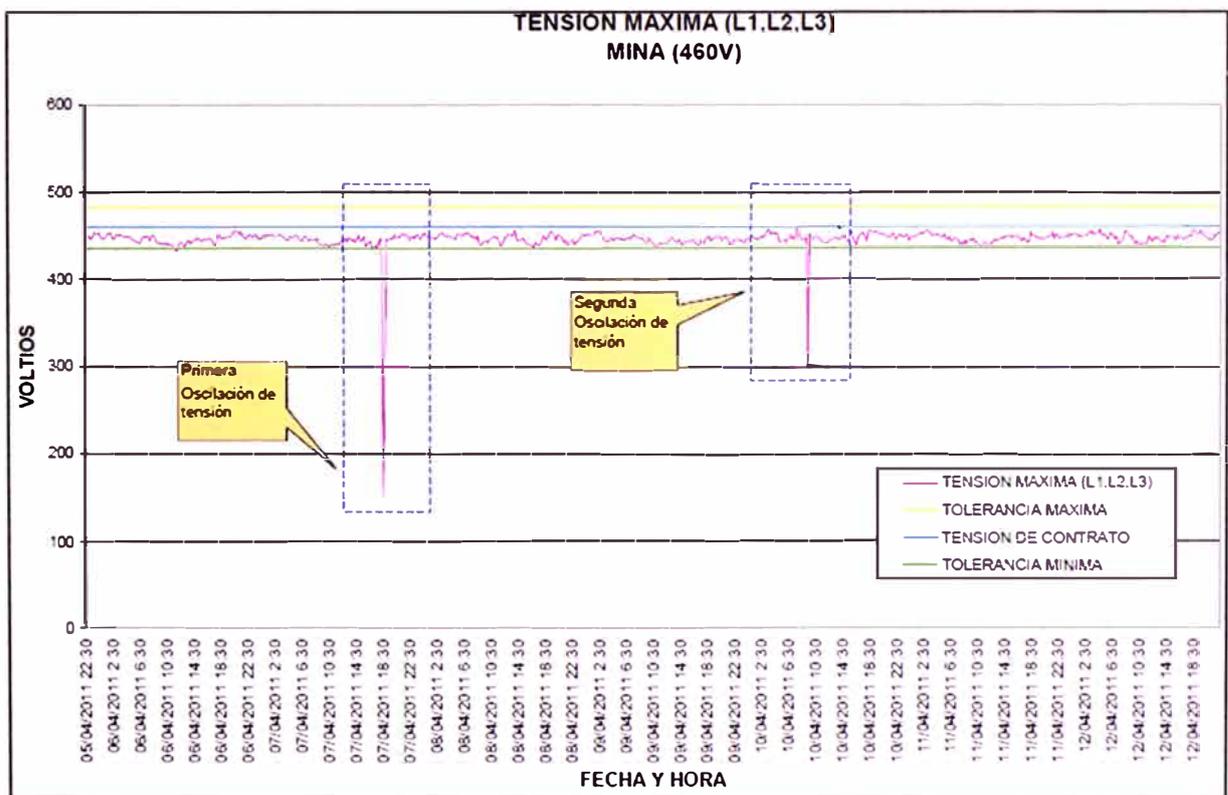
Aplicando estos criterios en los siguientes numerales se presentan los resultados de la evaluación de la calidad de producto, según la NTCSE. Se desarrollan los siguientes ítems: Punto de medición - mina, punto de medición-micro central (medición de tensión, de perturbación flicker y de perturbación de tensiones armónicas), análisis de las armónicas de orden 5 Y 7, análisis de distorsión de tensión, espectros armónicos de tensión, espectros armónicos de corriente, y Cálculo de factor K.

#### a. Punto de medición - mina (460V6)

Se muestra lo siguiente: medición de tensión, perturbación (flicker) y perturbación (tensiones armónicas)

##### a.1 Medición de tensión

La Figura 3.4 corresponde a la tensión más desfavorable (mayor desviación de las tres fases) obtenidas de cada intervalo de medición.



**Figura 3.4** Tensión más desfavorable

En el gráfico anterior se muestran dos caídas de tensión pronunciadas (día 7 y 10 de

abril) durante el periodo de medición. Los valores registrados fueron de 151V (0.32 p.u) para el primer evento; y 299V (0.65 p.u.) para el segundo evento. Estas caídas de tensión se deben a que el sistema eléctrico Mina salió fuera de servicio.

La Tabla 3.7 muestra el reporte de la evaluación de los intervalos registrados.

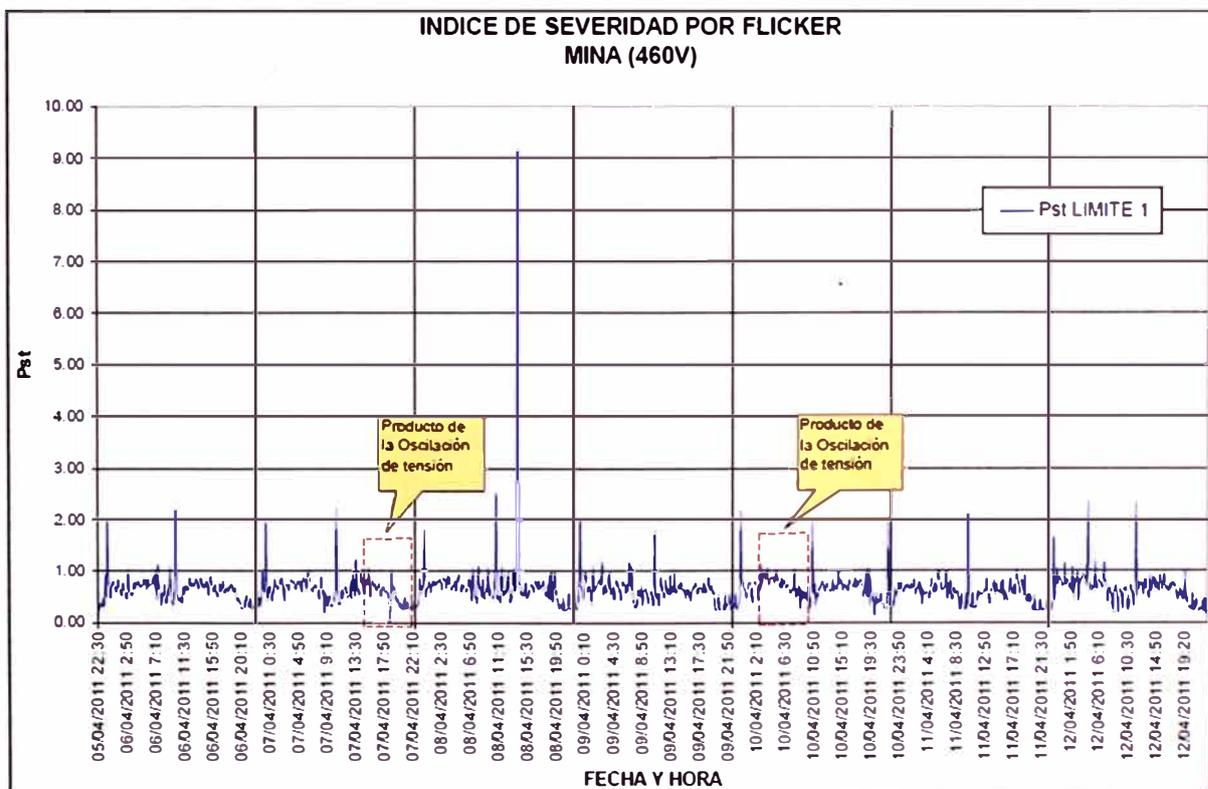
**Tabla 3.7** Evaluación de mediciones de tensión

SUBESTACIÓN	MINA
Tensión de operación (V)	460
Nº de intervalos registrados	672
Nº de intervalos en falta	8
% de intervalos en falta	1.19

Se observa Se observa que existen intervalos de tensión que superan la tolerancia permitida (1.19%); sin embargo, al ser menor al 5% del total de intervalos, no existe transgresión a las tolerancias estipuladas por la NTCSE.

### a.2 Perturbación (flicker)

En la Figura 3.5 se muestran los niveles de flicker registrados durante el periodo de medición analizado.



**Figura 3.5** Índice de Severidad por Flicker

Del gráfico anterior se puede observar las dos salidas de servicio del sistema eléctrico de la Mina. También se puede observar que el día 8 de abril a las 14:00 horas, el nivel de

flicker se eleva de manera considerable, llegando a alcanzar un valor igual a 9.14 Pst.

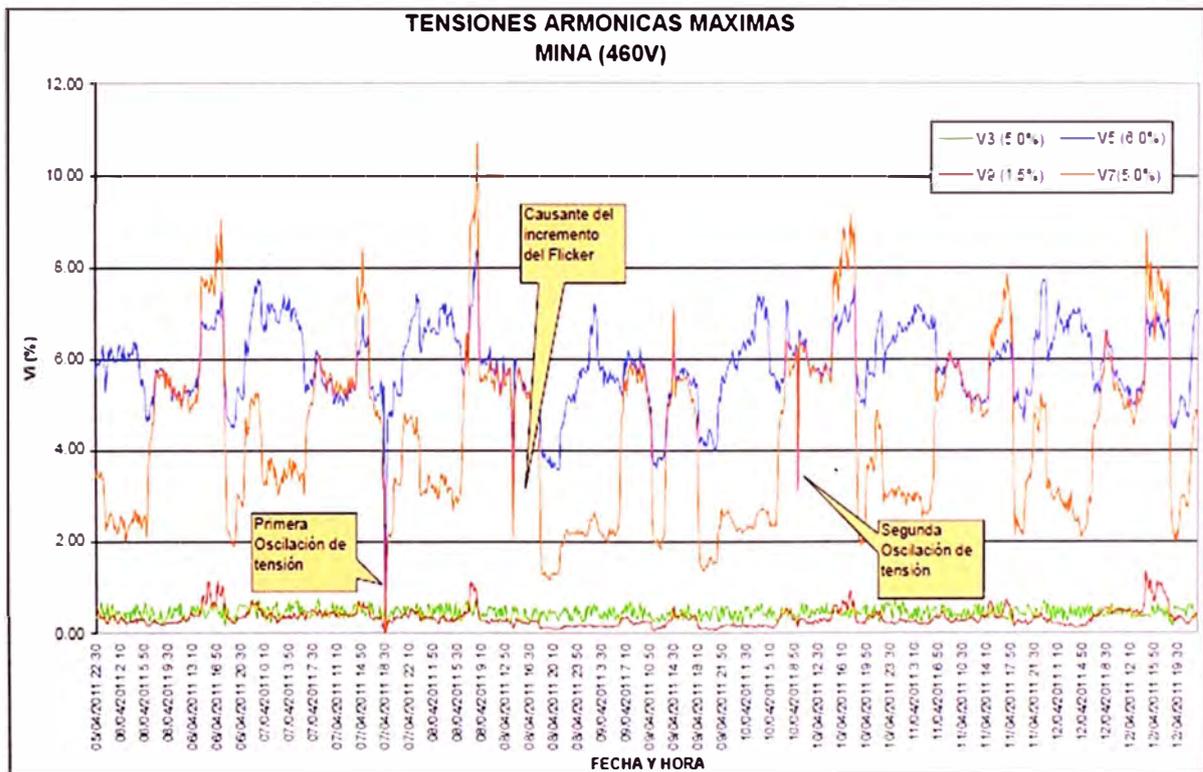
En la Tabla 3.8 se muestra el reporte de la evaluación de los intervalos registrados, en donde se observa que existen 56 intervalos en falta (intervalos con valor mayor a 1Pst.

**Tabla 3.8** Evaluación de mediciones de flicker

SUBESTACIÓN	MINA
Tensión de operación (V)	460
Nº de intervalos registrados	1008
Nº de intervalos en falta	56
% de intervalos en falta	5.57

### a.3 Perturbación (tensiones armónicas)

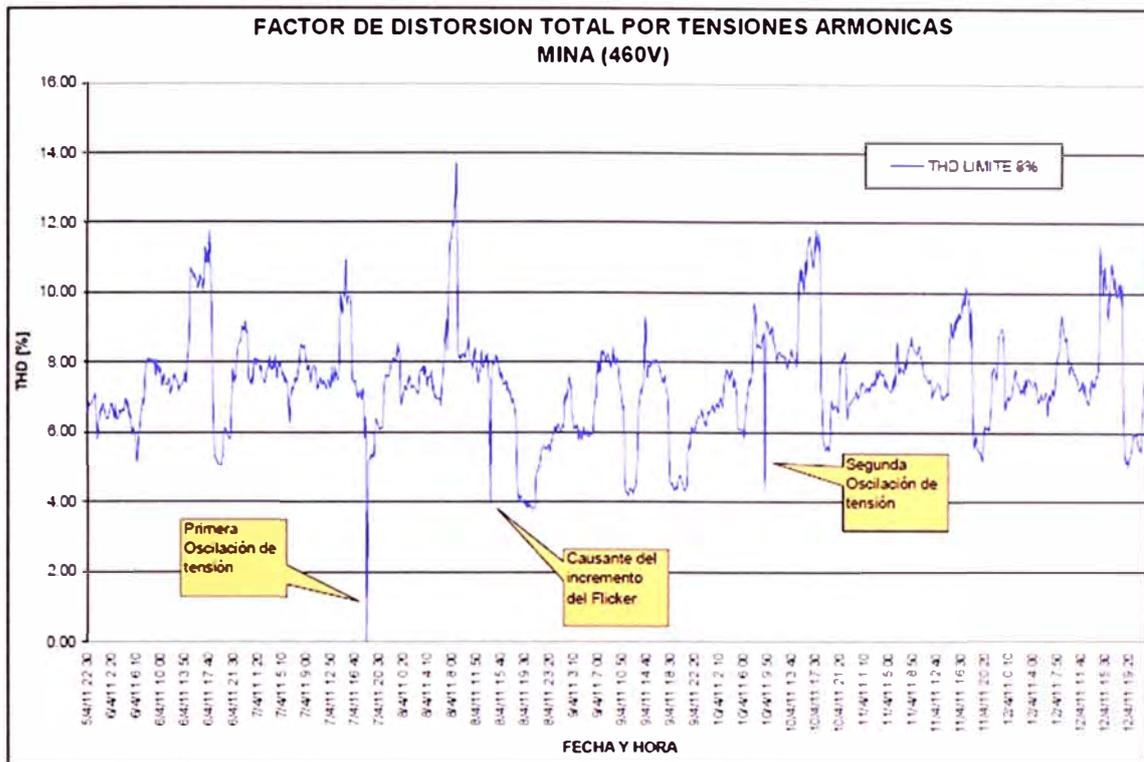
En la Figura 3.6 se muestran los niveles de las tensiones armónicas más representativas expresadas en porcentaje con respecto a la tensión nominal (460V) y el THD de tensión según la NTCSE.



**Figura 3.6** Tensiones Armónicas

En la Figura 3.7 se muestra los niveles de distorsión armónica (THD), se observa que existen niveles que se encuentran fuera de la tolerancia permitida por la NTCSE. ( $THD_V < 8\%$ ). De estas figuras se puede observar que las armónicas individuales de tensión y el  $THD_V$  están por encima del 8%, valor muy alto para el nivel de 460V lo cual si da alerta a posibles fallas en la operación de la MINA.

En la Tabla 3.9 se muestra el reporte de la evaluación de los intervalos registrados.



**Figura 3.7** Factor de Distorsión Total por Tensiones Armónicas

**Tabla 3.9** Evaluación de mediciones de tensión de armónicas

SUBESTACIÓN	MINA
Tensión de operación (V)	460
Nº de intervalos registrados	1008
Nº de intervalos en falta	683
% de intervalos en falta	67.76

La Tabla 3.10 muestra que existen intervalos en falta por armónicas de tensión (5ta y 7ma armónica) y por distorsión armónica de tensión THD.

**Tabla 3.10** Intervalos en falta

Armónica	Nº de intervalos en falta	% de intervalos en falta	calificación
2	0	0.00 %	Ok
3	0	0.00 %	Ok
4	0	0.00 %	Ok
5	431	42.80 %	En falta
6	1	0.10 %	Ok
7	414	41.1 %	En falta
8	1	0.10 %	Ok

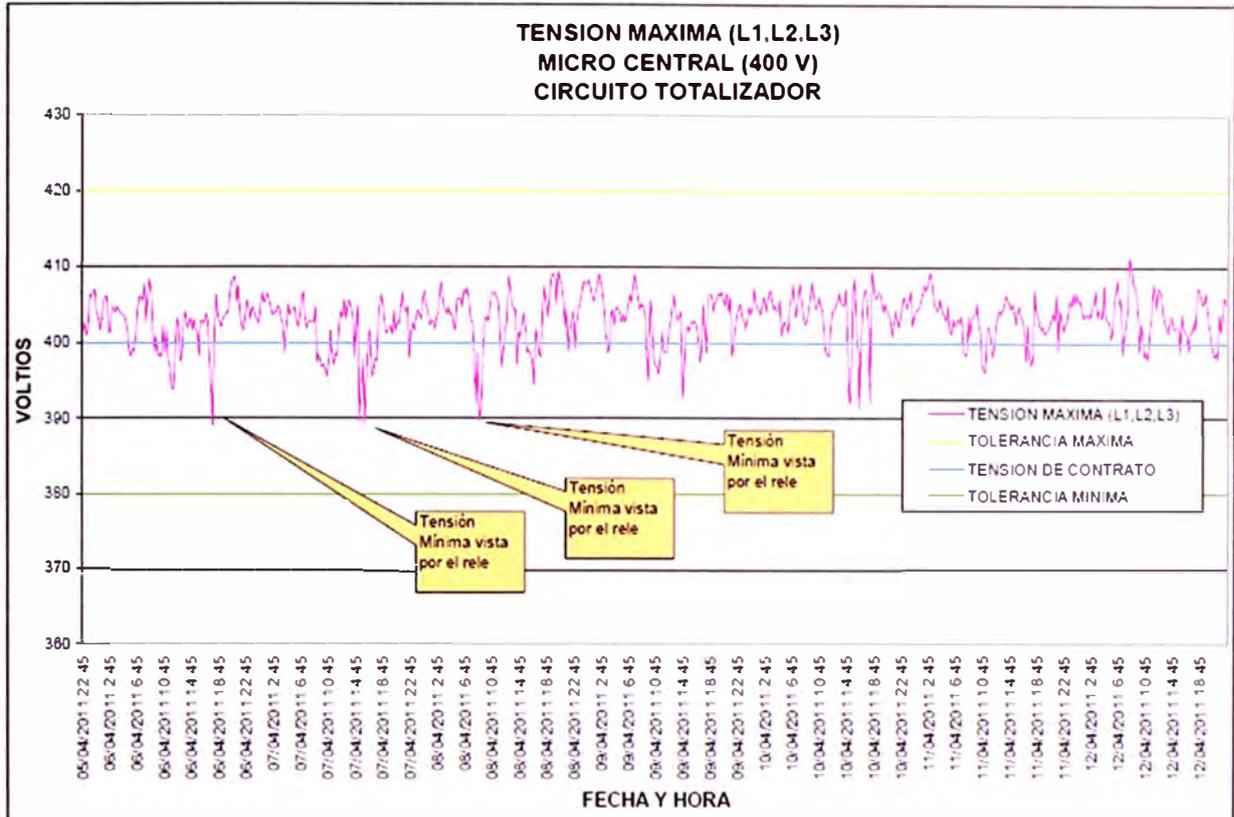
9	0	0.00 %	Ok
10	0	0.00 %	Ok
11	0	0.00 %	Ok
12	0	0.00 %	Ok
13	0	0.00 %	Ok
14	0	0.00 %	Ok
15	0	0.00 %	Ok
16	0	0.00 %	Ok
17	0	0.00 %	Ok
18	0	0.00 %	Ok
19	0	0.00 %	Ok
20	0	0.00 %	Ok
21	0	0.00 %	Ok
22	0	0.00 %	Ok
23	0	0.00 %	Ok
24	0	0.00 %	Ok
25	0	0.00 %	Ok
26	0	0.00 %	Ok
27	0	0.00 %	Ok
28	0	0.00 %	Ok
29	0	0.00 %	Ok
30	0	0.00 %	Ok
31	0	0.00 %	Ok
32	0	0.00 %	Ok
33	0	0.00 %	Ok
34	0	0.00 %	Ok
35	0	0.00 %	Ok
36	0	0.00 %	Ok
37	0	0.00 %	Ok
38	0	0.00 %	Ok
39	0	0.00 %	Ok
40	0	0.00 %	Ok
THD	282	28.00 %	En falta

**b. Punto de medición -micro central (400V)**

Se muestra lo siguiente: medición de tensión, perturbación (flicker) y perturbación (tensiones armónicas).

### b.1 Medición de tensión

El siguiente gráfico (Figura 3.8), corresponde a la tensión más desfavorable (mayor desviación de las tres fases) obtenidas de cada intervalo de medición.



**Figura 3.8** Tensión más desfavorable

Del gráfico anterior se observa que el total de intervalos se encuentra dentro del rango  $\pm 5\%$  de la tensión nominal.

La Tabla 3.11 muestra el reporte de la evaluación de los intervalos registrados.

**Tabla 3.11** Evaluación de mediciones de tensión

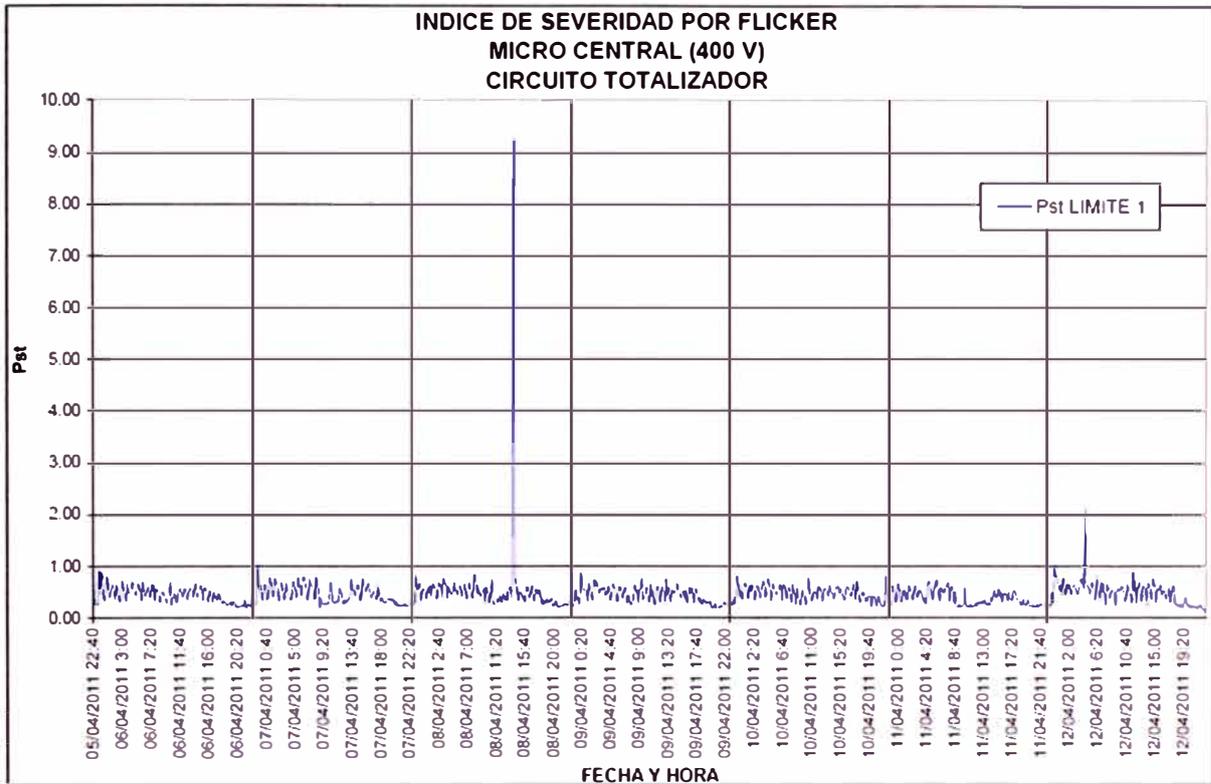
SUBESTACIÓN	MICRO CENTRAL
Tensión de operación (V)	400
Nº de intervalos registrados	672
Nº de intervalos en falta	0
% de intervalos en falta	0.00

### b.2 Perturbación (flicker)

En el siguiente gráfico (Figura 3.9) se muestra los niveles de flicker registrados durante el periodo de medición analizado. Se puede observar que el día 8 de abril a las 14:00 horas, el nivel de flicker se eleva de manera considerable, llegando a alcanzar un valor igual a 9.14 Pst.

En la Tabla 3.12 se muestra el reporte de la evaluación de los intervalos registrados,

se observa que existen 5 intervalos en falta (intervalos con valor mayor a 1Pst) sin embargo, la operación está dentro de los límites establecidos por la NTCSE, al no superar el 5% de intervalos en falta.



**Figura 3.9** Índice de Severidad por Flicker

**Tabla 3.12** Evaluación de mediciones de flicker

SUBESTACIÓN	MICRO CENTRAL
Tensión de operación (V)	400
Nº de intervalos registrados	1008
Nº de intervalos en falta	5
% de intervalos en falta	0.50

### b.3 Perturbación (tensiones armónicas)

En la Figura 3.10 se muestra los niveles de las tensiones armónicas más representativas expresadas en porcentaje con respecto a la tensión nominal (400V) y el THD de tensión según la NTCSE.

En la Figura 3.11 se muestra los niveles de distorsión armónica (THD), se observa que existen niveles que se encuentran fuera de la tolerancia permitida por la NTCSE.

En la tabla 3.13 se muestra el reporte de la evaluación de los intervalos registrados.

La tabla 3.14 muestra que existen intervalos en falta por armónicas de tensión (5ta y 7ma armónica) y por distorsión armónica de tensión THD.

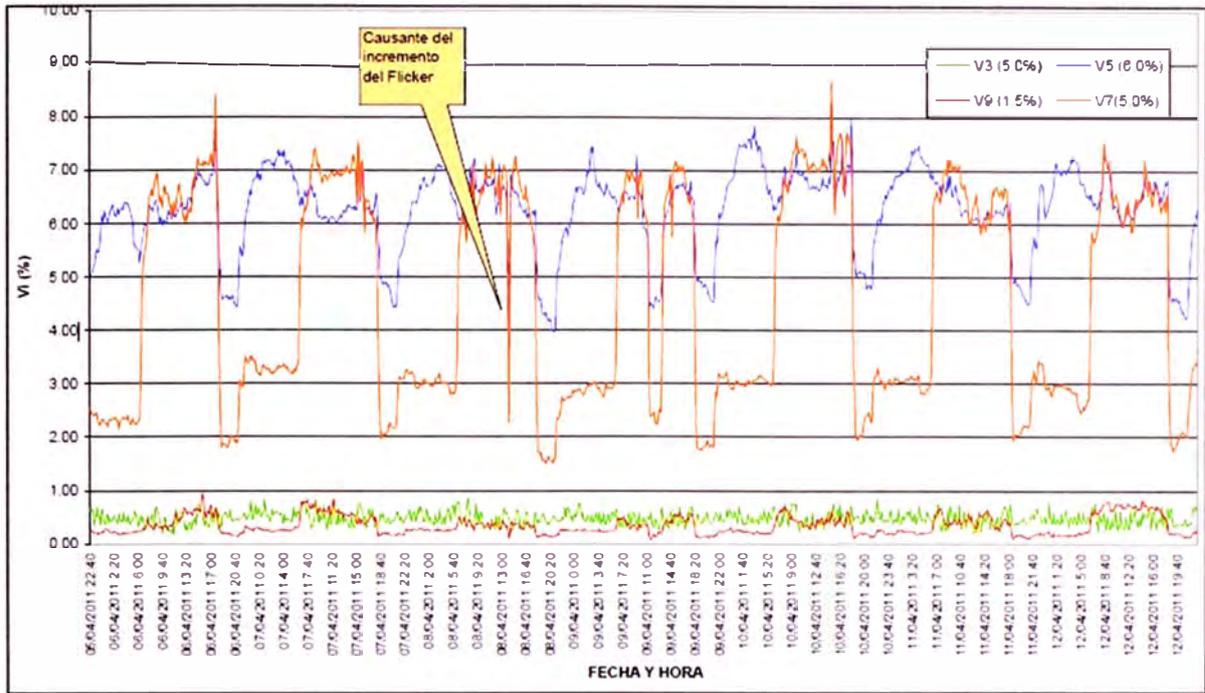


Figura 3.10 Tensiones Armónicas máximas, circuito totalizador

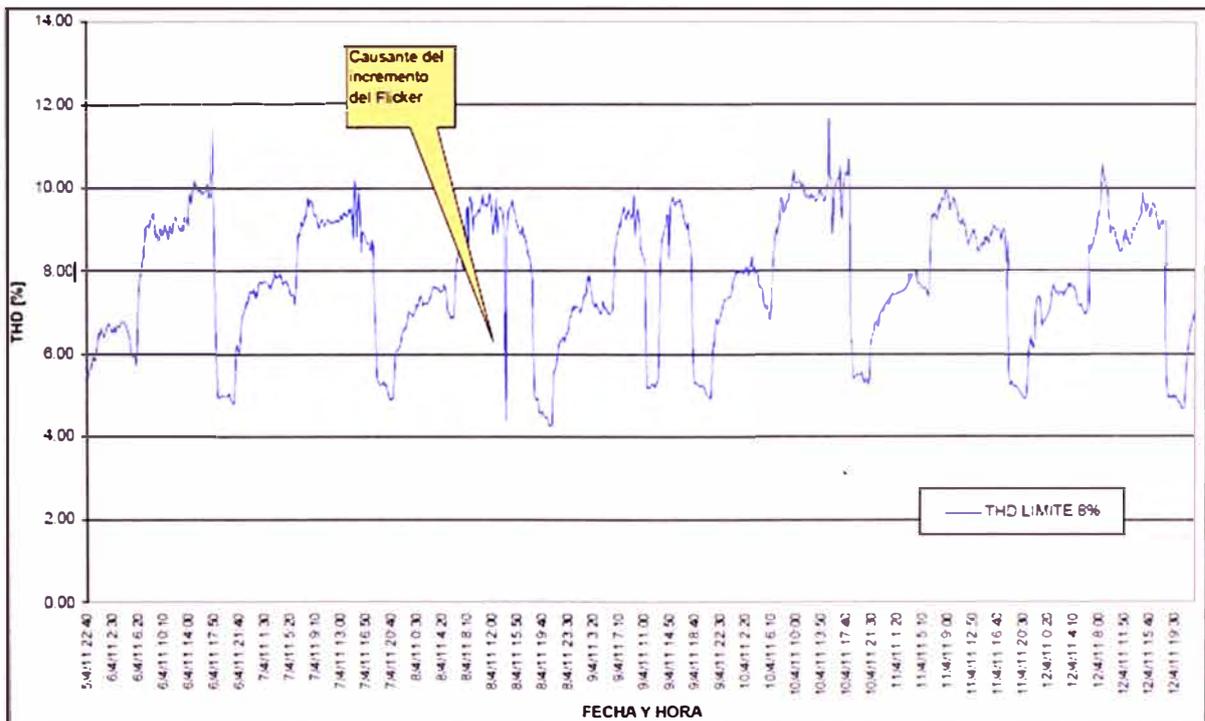


Figura 3.11 Factor de Distorsión Total por Tensiones Armónicas

Tabla 3.13 Evaluación de mediciones de tensiones armónicas

SUBESTACIÓN	MICRO CENTRAL
Tensión de operación (V)	400
Nº de intervalos registrados	1008
Nº de intervalos en falta	801
% de intervalos en falta	79.46

Tabla 3.14 Intervalos en falta

Armónica	Nº de intervalos en falta	% de intervalos en falta	Calificación
2	0	0.00 %	Ok
3	0	0.00 %	Ok
4	0	0.00 %	Ok
5	781	77.48 %	<b>En falta</b>
6	0	0.00 %	Ok
7	478	47.42 %	<b>En falta</b>
8	0	0.00 %	Ok
9	0	0.00 %	Ok
10	0	0.00 %	Ok
11	0	0.00 %	Ok
12	0	0.00 %	Ok
13	0	0.00 %	Ok
14	0	0.00 %	Ok
15	0	0.00 %	Ok
16	0	0.00 %	Ok
17	0	0.00 %	Ok
18	0	0.00 %	Ok
19	0	0.00 %	Ok
20	0	0.00 %	Ok
21	0	0.00 %	Ok
22	0	0.00 %	Ok
23	0	0.00 %	Ok
24	0	0.00 %	Ok
25	0	0.00 %	Ok
26	0	0.00 %	Ok
27	0	0.00 %	Ok
28	0	0.00 %	Ok
29	0	0.00 %	Ok
30	0	0.00 %	Ok
31	0	0.00 %	Ok
32	0	0.00 %	Ok
33	0	0.00 %	Ok
34	0	0.00 %	Ok
35	0	0.00 %	Ok
36	0	0.00 %	Ok

37	0	0.00 %	Ok
38	0	0.00 %	Ok
39	0	0.00 %	Ok
40	0	0.00 %	Ok
THD	482	47.82 %	<b>En falta</b>

### c. Análisis de las armónicas de orden 5 Y 7

Se realiza tanto para la mina (460V) y la Micro Central (400V)

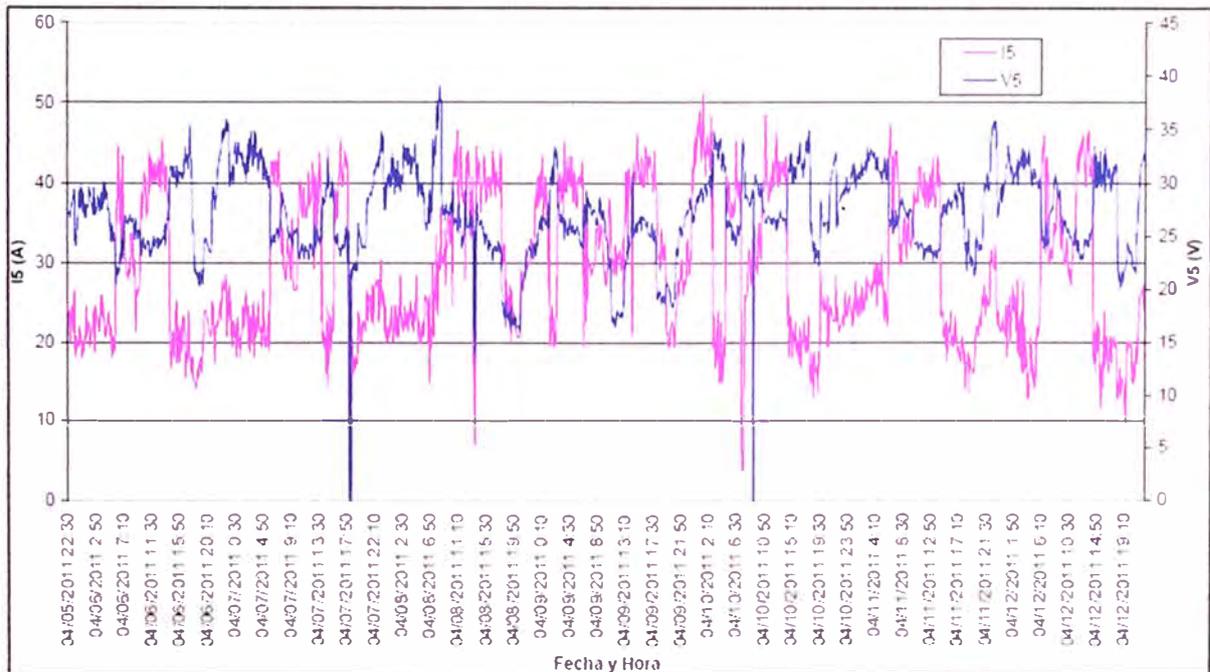
#### c.1 Mina (460V)

En la Tabla 3.15 se muestra las corrientes armónicas de orden 5 y 7 registradas (Amperios) las cuales son:

**Tabla 3.15** Corrientes Armónicas I5 e I7 (A)

Valor	Corrientes Armónicas (A)	
	I5	I7
Máximo	51	80
Promedio	29	19
Mínimo	0	0

En la Figura 3.12 se muestra el comportamiento de las armónicas de orden 5 y 7.

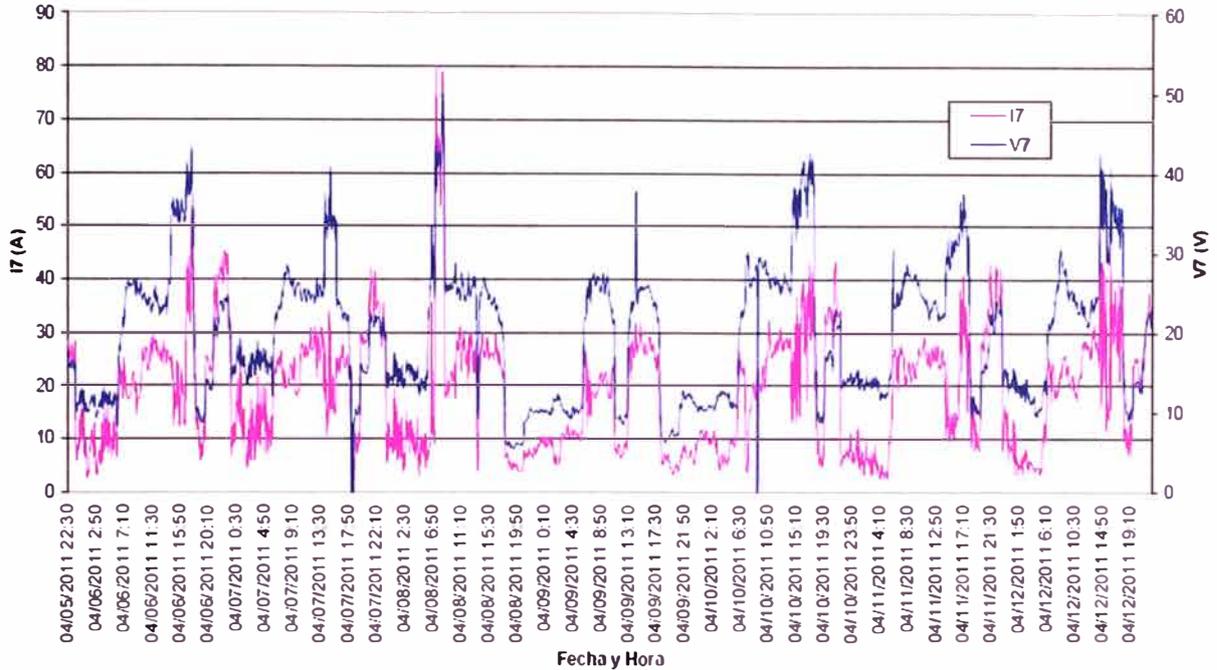


**Figura 3.12** Comportamiento de la armónica de orden 5

Se observa que, sólo en algunos períodos, los máximos niveles de tensión armónica coinciden con los máximos niveles de corriente armónica, lo cual indica que la 5ta armónica de tensión es originada, en parte, por las cargas de la Mina y por las cargas

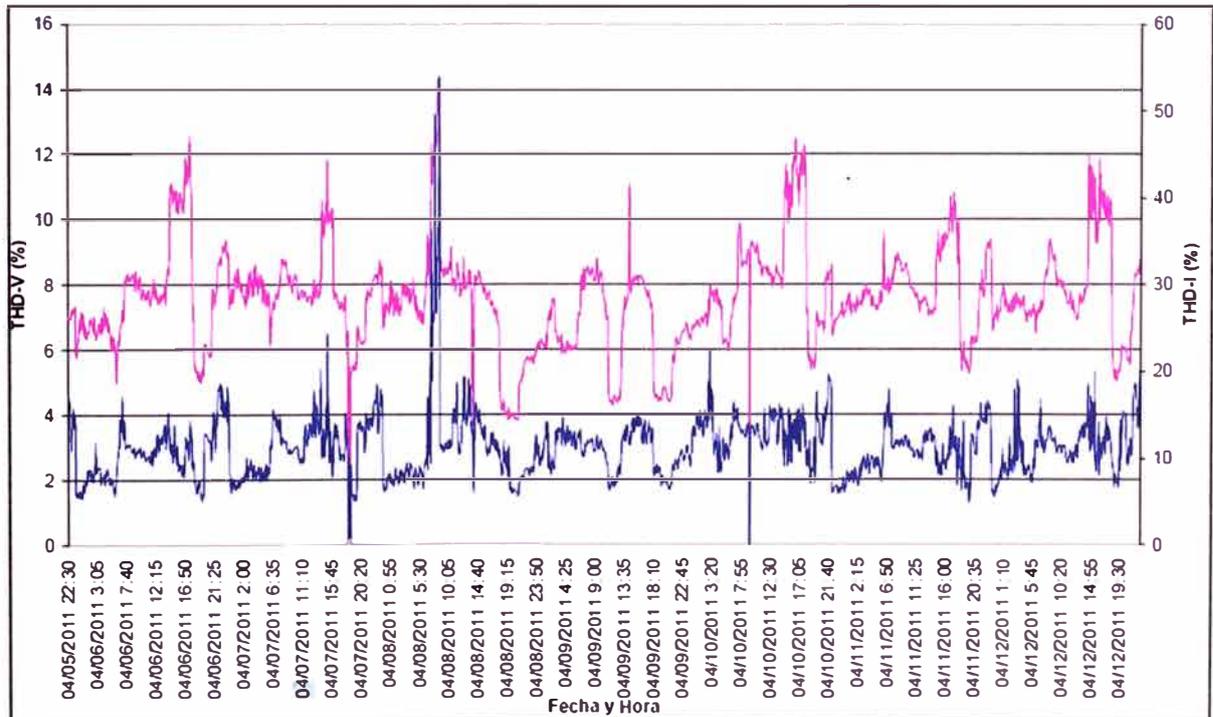
vecinas del propio sistema eléctrico.

Tomando en cuenta el criterio anterior, se observa, que la armónica de tensión de orden 7, es originada por la carga, dado que los máximos niveles de tensión coinciden (en todo el período) con los máximos niveles de corriente, ver Figura 3.13:



**Figura 3.13** Comportamiento de la armónica de orden 7

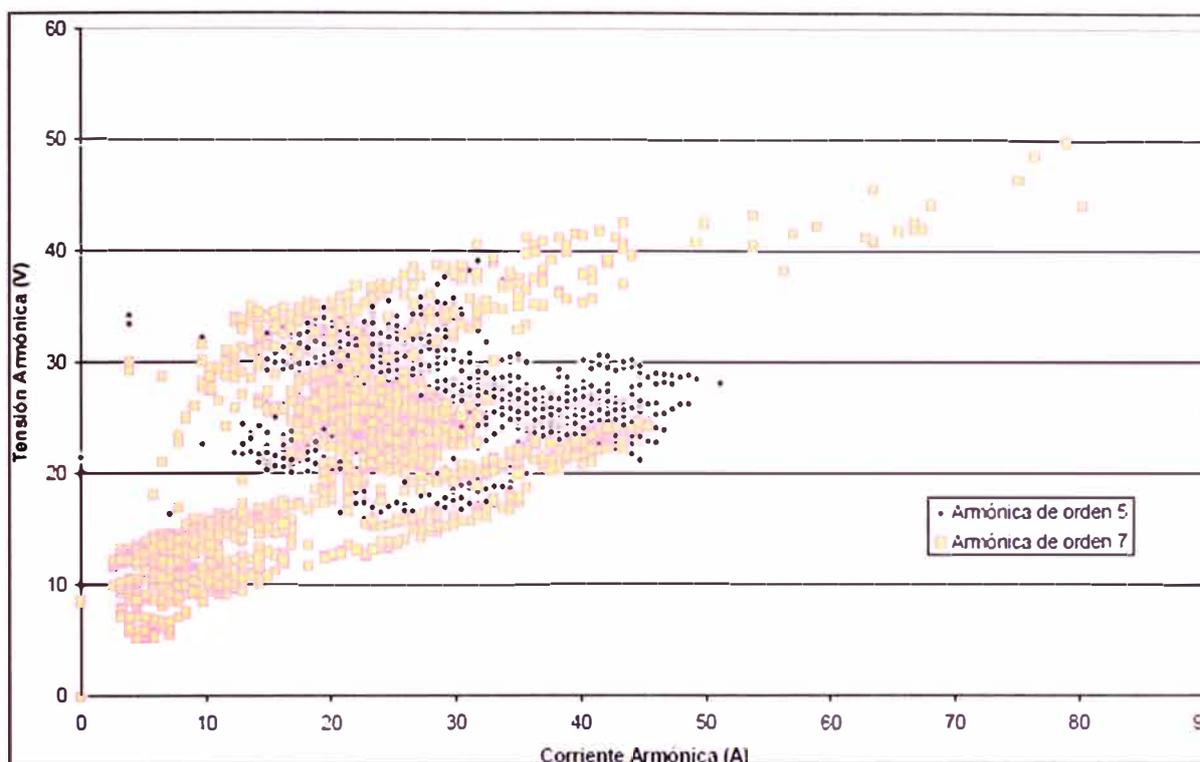
En el siguiente gráfico se observa que en la distorsión de tensión y de corriente coinciden sus máximas amplitudes en el mismo intervalo de medición, ver Figura 3.14.



**Figura 3.14** Distorsión armónica

En el siguiente gráfico se muestra la dispersión de la 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónica en el punto

eléctrico de la MINA 460V, ver gráfico (Figura 3.15).



**Figura 3.15** Distorsión armónica de orden 5 y 7

Del gráfico anterior se puede observar que la armónica de orden 7 presenta una tendencia lineal, es decir, tiene una fuente o impedancia que genera dicha corriente, mientras que, para el caso de la 5ta armónica, la tendencia es más dispersa; por tal, se podría afirmar que la corriente armónica es generada, en parte, por la carga (tendencia lineal) y de las cargas vecinas del sistema (tendencia dispersa).

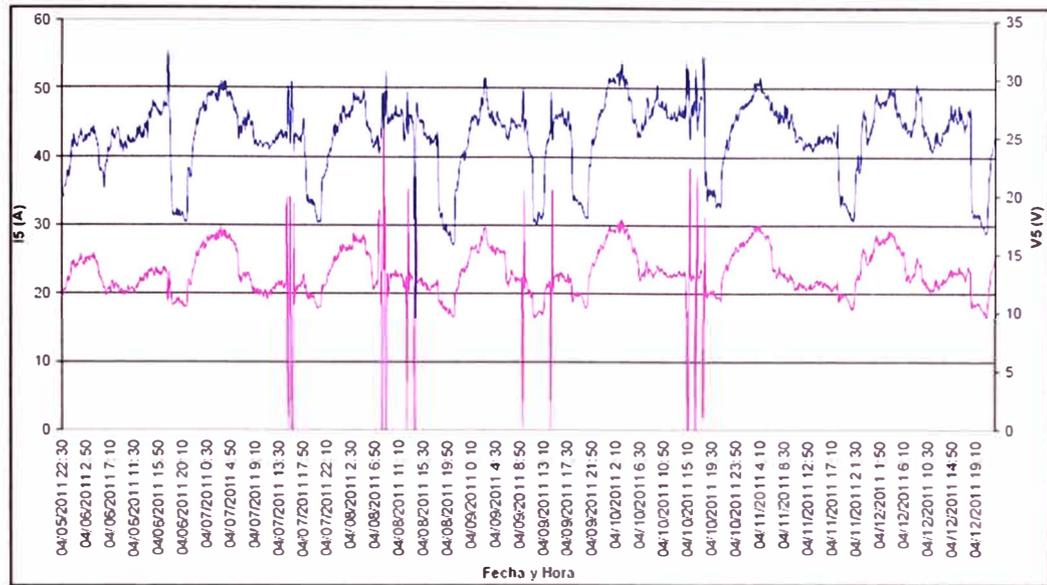
### c.2 Micro Central (400V)

En la Tabla 3.16 se muestra las corrientes armónicas de orden 5 y 7 registradas (Amperios) las cuales son:

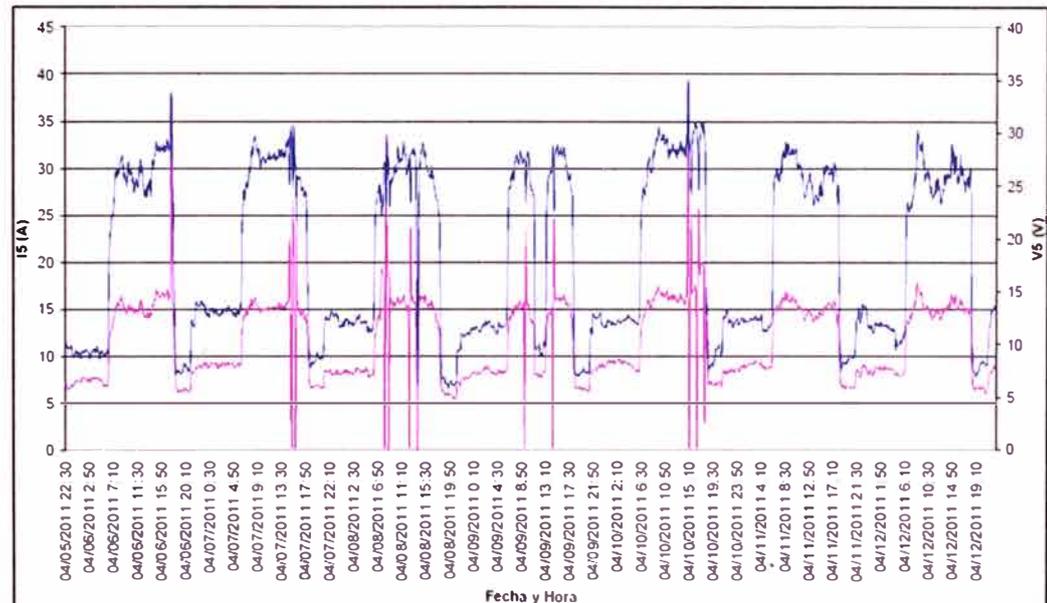
**Tabla 3.16** Corrientes Armónicas I5 e I7 (A)

Valor	Corrientes Armónicas (A)	
	I5	I7
Máximo	48	40
Promedio	23	12
Mínimo	0	0

En los siguientes gráficos (Figuras 3.16 y 3.17) se muestra el comportamiento de las armónicas de orden 5 y 7 respectivamente. Las cuales muestran una presencia significativa en la Micro Central.



**Figura 3.16** Armónica de 5to orden



**Figura 3.17** Armónica de 7mo orden

Los gráficos anteriores, demuestran que existe correspondencia entre la tensión y la corriente armónica.

En el gráfico de la Figura 3.18 se observa el comportamiento de la distorsión de tensión y de corriente, en cual demuestra que al igual que en la Mina existe una correspondencia entre ambas.

En el gráfico de la Figura 3.19 se muestra la dispersión de la 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónica en el punto eléctrico de la Micro Central 400V. Se puede observar que las dos armónicas, la 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> individuales presentan una tendencia lineal, lo cual demuestra que existe una fuente de generación de armónicos.

Teóricamente una central no genera armónicas de corriente, sin embargo, las mediciones indican que existen armónicas de corriente con tendencias lineales.

Estas tendencias corresponden a un flujo de corriente armónica que estarán viniendo del sistema de 22.9kV a 400V cada vez que la central produce energía.

Por otro lado, el nivel de corriente armónica en la micro central, no sobrepasa las tolerancias del IEEE debido a que en dicho nodo (400V) se tiene mayor nivel de corriente de cortocircuito.

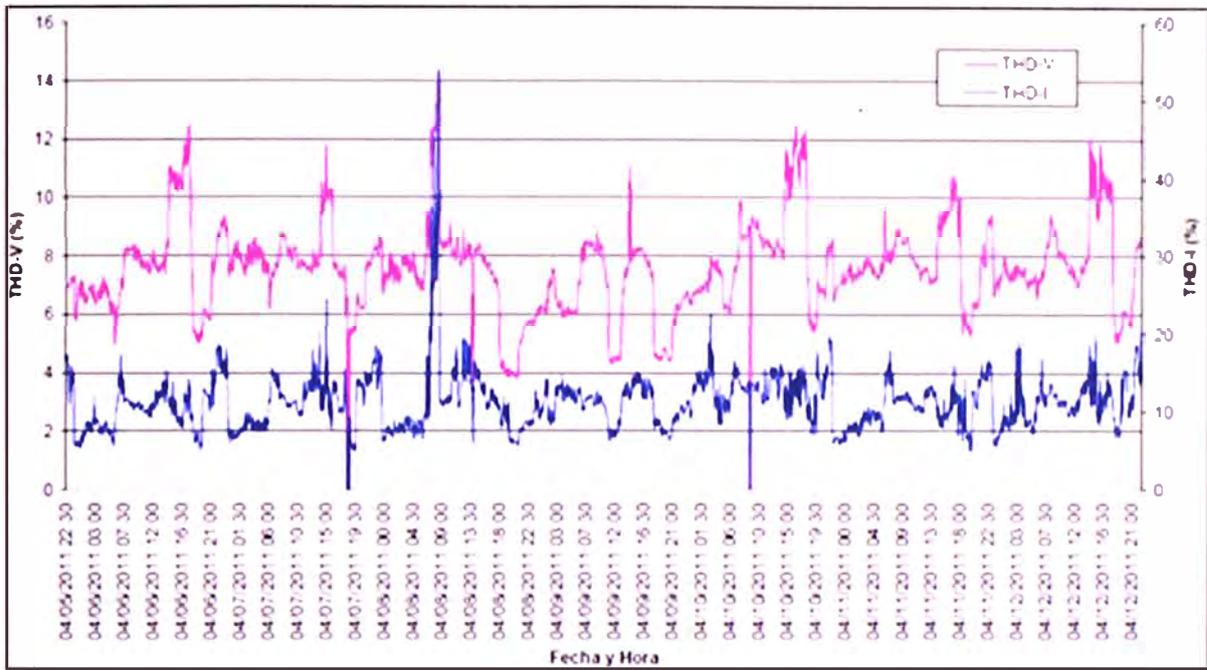


Figura 3.18 Distorsión armónica

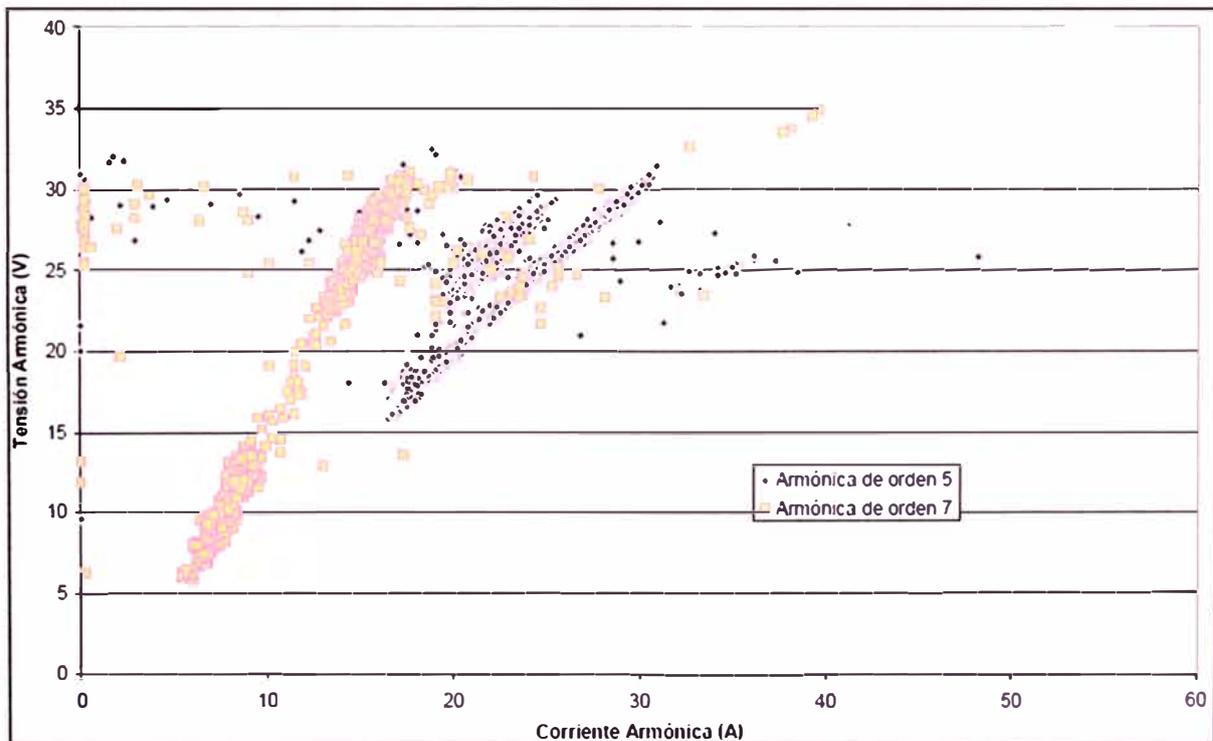


Figura 3.19 Distorsión armónica de orden 5 y 7

#### d. Análisis de distorsión de tensión.

Los niveles de distorsión registrados fueron los indicados en la Tabla 3.17.

**Tabla 3.17** Niveles de distorsión registrados

	THD-V (Máximo)	THD-V (Promedio)	THD-V (Mínimo)	THD-V Límite (NTCSE)	THD-V Límite (IEEE 519)
Micro Central	12%	8%	3%	8%	5%
Mina	14%	8%	0%	8%	5%

Se observa que los niveles de distorsión, en promedio, superan la tolerancia del IEEE 519 y los valores máximos, las tolerancias de la NTCSE.

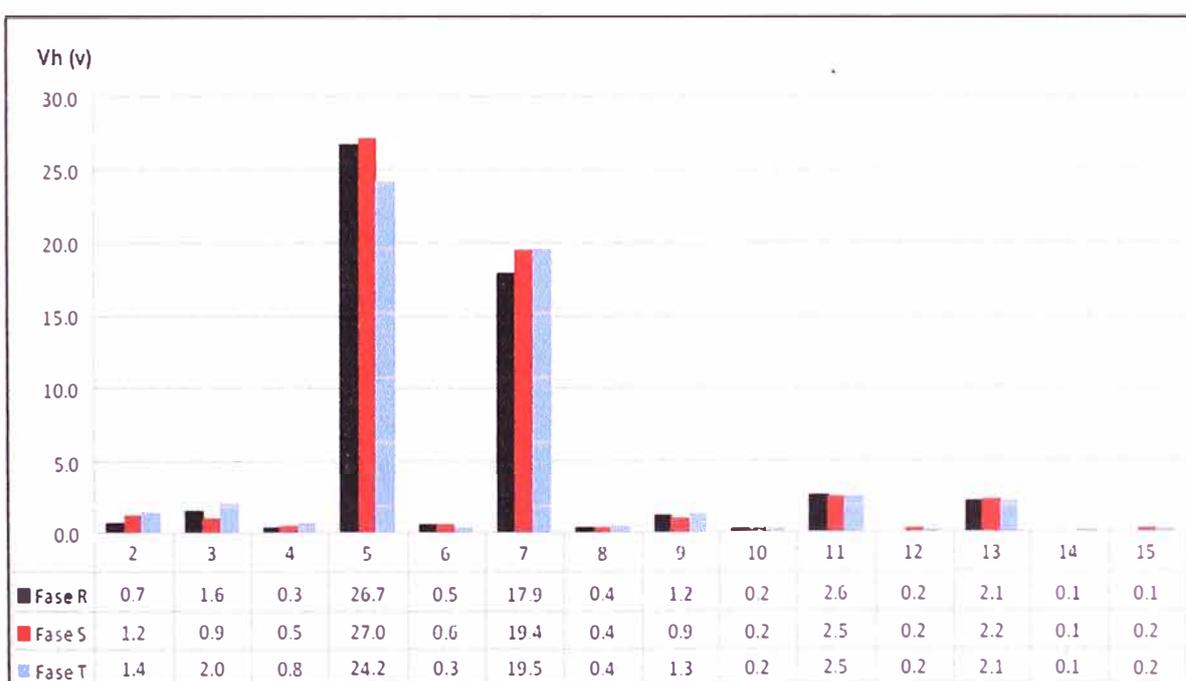
Esta condición indica que los equipos se encuentran operando con altos niveles de distorsión lo cual ocasiona que mayor riesgo de fallas eléctricas.

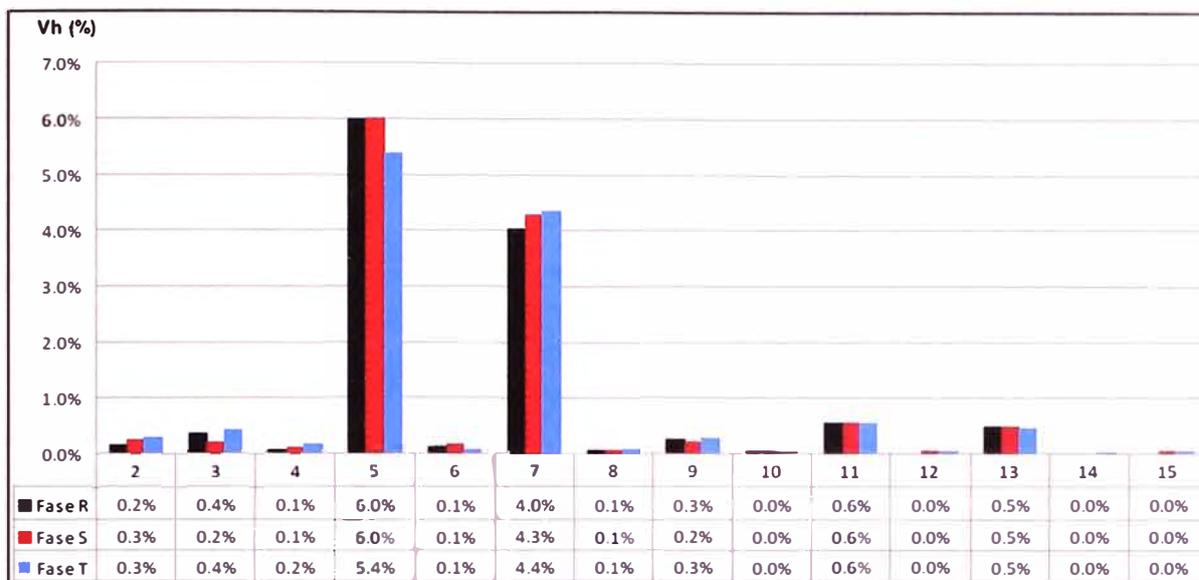
Tener niveles de distorsión altos (mayores a 5%) se debe a que el sistema tiene un bajo nivel de corriente de cortocircuito o al exceso de generación de corriente armónica.

El condensador, por tener una impedancia no lineal, amplifica las armónicas de corriente existentes afectando el nivel de distorsión en las barras.

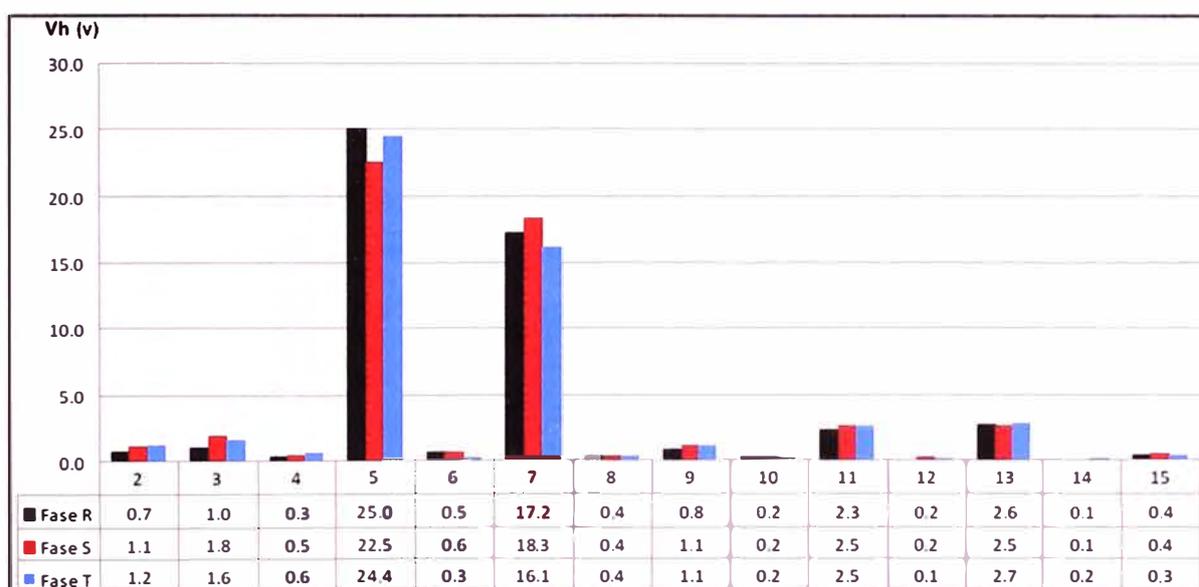
#### e. Espectros armónicos de tensión

Se presentan en las siguientes figuras tanto para la mina (460V) como para la Micro Central (400V). En los gráficos de las Figuras 3.20 y 3.21, se muestra el espectro de las armónicas de tensión de las tres fases; en valores RMS y porcentuales respectivamente para la Mina. En los gráficos de las Figuras 3.22 y 3.23, se muestra el espectro de las armónicas de tensión de las tres fases; en valores RMS y porcentuales respectivamente para la Micro Central.

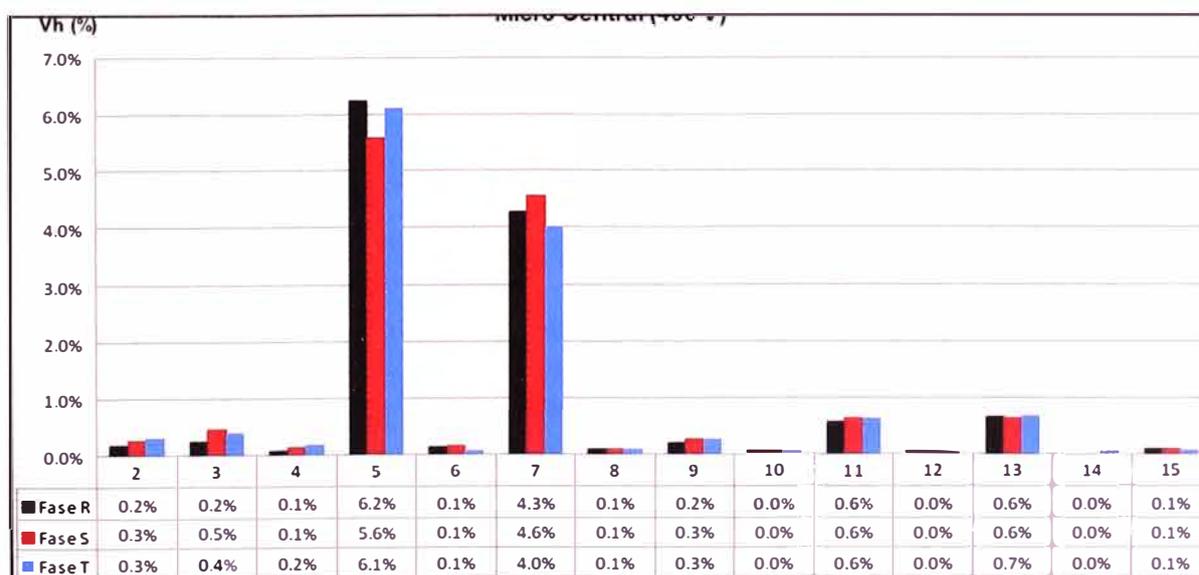
**Figura 3.20** Espectro de armónicas de tensión Mina (460 V) en RMS



**Figura 3.21** Espectro de armónicas de tensión Mina (460 V) en porcentaje



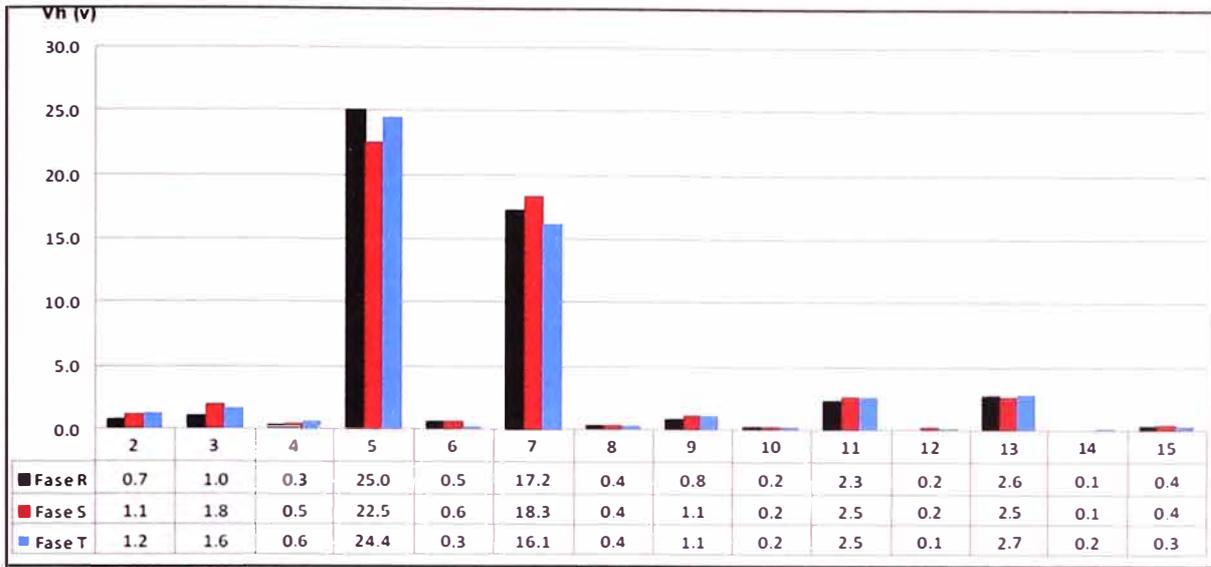
**Figura 3.22** Espectro de armónicas de tensión Micro Central (400 V) en RMS



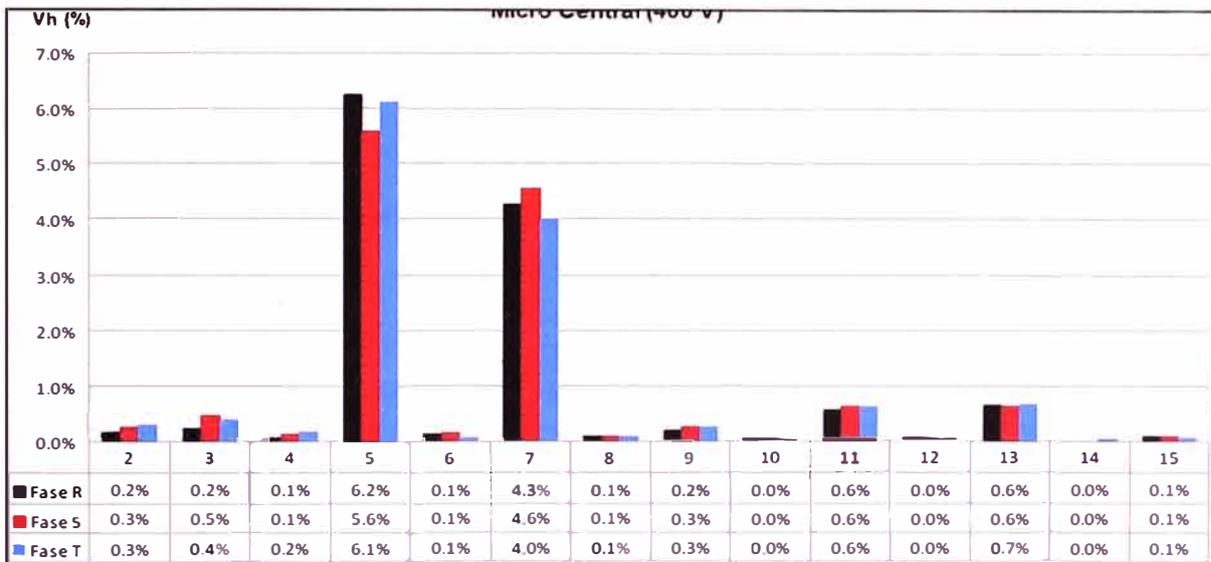
**Figura 3.23** Espectro de armónicas de tensión Micro Central (400 V) en porcentaje

**f. Espectros armónicos de corriente**

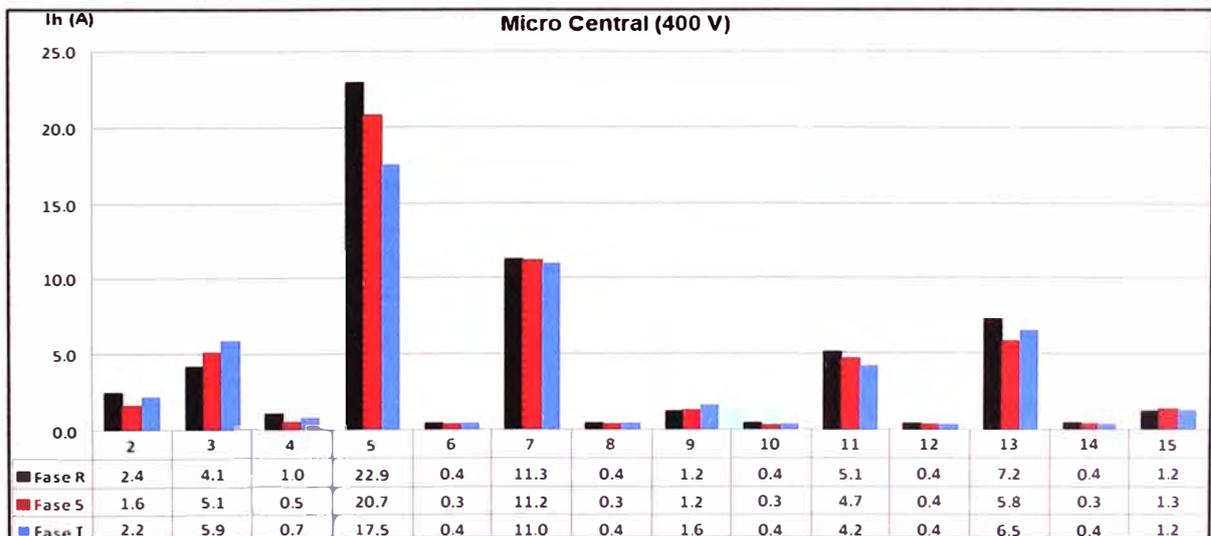
Son mostrados en valores RMS y porcentuales para la Mina y la Micro Central.



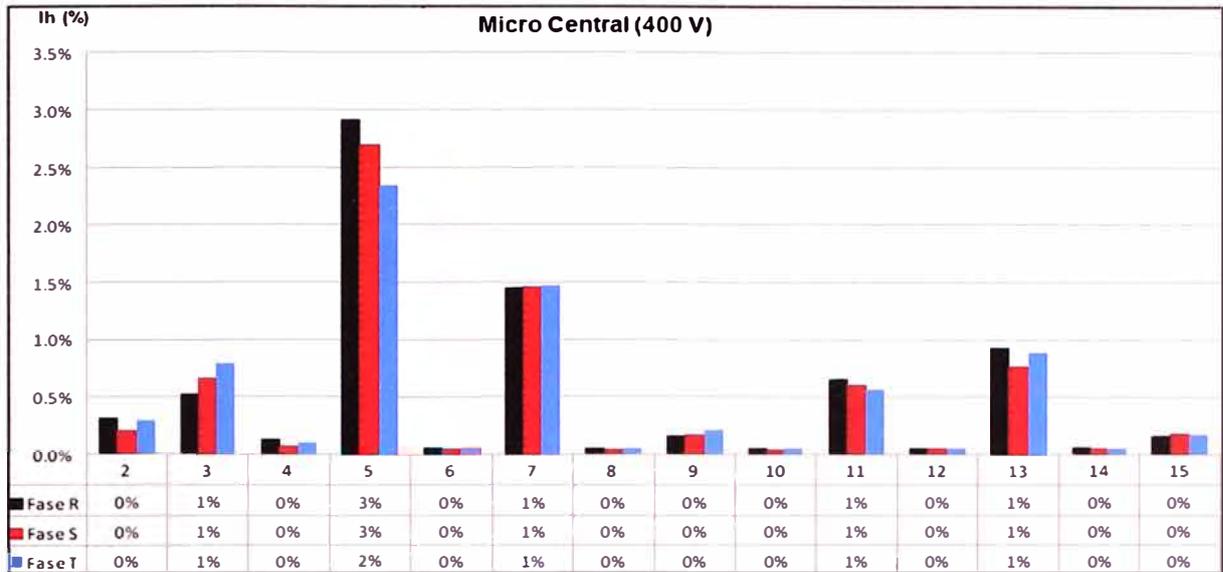
**Figura 3.24** Espectro de armónicas de corriente Mina (460 V) en RMS



**Figura 3.25** Espectro de armónicas de corriente Mina (460 V) en porcentaje



**Figura 3.26** Espectro de armónicas de corriente Micro Central (400 V) en RMS



**Figura 3.27** Espectro de armónicas de corriente Micro Central (400 V) en porcentaje

### g. Cálculo de factor K

Se realiza tanto para las Mina (460V) como para la Micro Central ¿400V?

#### g.1 Mina (460V)

Con los datos de las corrientes armónicas y aplicando la siguiente fórmula, tenemos el valor del k-factor para el transformador de 1000kVA de la Subestación de la Mina.

$$K = \sum_{h=2}^{h=h_{\max}} h^2 I_h^2 \quad (3.1)$$

**Tabla 3.18** k-factor para el transformador de 1000kVA de la Subestación de la Mina.

h	$I_h$	$h^2$	$(I_h/I)$	$(I_h/I)^2$	$(I_h/I)^2 h^2$
1	356,399	1	0,989	0,9779	0,978
3	5,647	9	0,016	0,0002	0,002
5	28,72	25	0,080	0,0064	0,159
7	18.516	49	0,051	0,0026	0,129
11	3.967	121	0,011	0,0001	0,015
13	3.183	169	0,009	0,0001	0,013
I	360,41			K	1,296

#### g.2 Micro Central (400V)

Con los datos de las corrientes armónicas y aplicando la misma fórmula, tenemos el valor del k-factor para el transformador de 1000kVA de la SE de la Micro central.

**Tabla 3.19** k-factor para el transformador de 1000kVA de la SE de la micro central

h	$I_h$	$h^2$	$(I_h/I)$	$(I_h/I)^2$	$(I_h/I)^2 h^2$
1	785,93	1	0,999	0,9984	0,998
3	6,04	9	0,008	0,0001	0,001
5	22,88	25	0,029	0,0008	0,021
7	11,48	49	0,015	0,0002	0,010
11	5,88	121	0,007	0,0001	0,007
13	7,52	169	0,010	0,0001	0,015
15	1,47	225	0,002	0,0000	0,001
17	2,29	289	0,003	0,0000	0,002
19	1,22	361	0,0016	0,0000	0,001
23	0,75	529	0,0010	0,0000	0,000
25	0,5	625	0,0006	0,0000	0,000
I	786,55			K	1,058

### 3.1.6 Conclusiones

Se presentan para los siguientes ítems: Evaluación según la NTCSE, evaluación según el IEEE 519, análisis de armónicos y distorsión, evaluación de la tensión, evaluación del flicker, desbalance de tensión, K-Factor

#### a. Evaluación según la NTCSE

- Los niveles de armónicos individuales de tensión de orden 5 y 7 se encuentran fuera del límite establecido por la NTCSE en los dos puntos eléctricos analizados.
- El nivel de distorsión de tensión en los dos puntos eléctricos analizados se encuentra fuera de la tolerancia establecida por la NTCSE (THD-V <8%).
- Los niveles de flicker en la Mina 460V sobrepasan la tolerancia estipulada por la NTCSE.
- Los niveles de tensión RMS se encuentran dentro del rango del  $\pm 5\%$  de la tensión nominal. Cabe mencionar que la medición exigida por la NTCSE es en intervalos de 15 minutos.

#### b. Evaluación según el IEEE 519

- La 5ta y 7ma armónica de corriente, en el punto eléctrico Mina 460V, supera la tolerancia estipulada por el estándar IEEE 519.
- El análisis de correlación armónica, indica que en Mina existen fuentes de 5ta y 7ma armónica las mismas que fluyen de la mina hacia la Micro Central.
- El factor de distorsión de demanda (TDD) en Mina 460V, está fuera de las tolerancias estipuladas según el estándar IEEE 519 debido al aporte de la 5ta y 7ma armónica de corriente.
- La influencia del nivel de corriente de cortocircuito en un nodo eléctrico es de amortiguar la distorsión de tensión, es decir, a mayor nivel de corriente de cortocircuito, el sistema

será capaz de amortiguar la distorsión de tensión. Por tal, mientras que la relación de corriente de cortocircuito y la carga sean mayores, las tolerancias de corriente armónica también serán mayores. Por otro lado, se debe tener en cuenta que el nivel de corriente de cortocircuito depende del sistema interconectado, el cual será mayor conforme entren nuevos proyectos de generación y transmisión.

### **c. Análisis de Armónicos y Distorsión**

- El nivel de distorsión de la tensión se encuentra por encima del 5%, lo cual origina que la confiabilidad del sistema eléctrico sea cada vez menor.
- Los niveles de distorsión de corriente existente son amplificados por el Condensador.
- Las cargas vecinas del sistema eléctrico contribuyen en la distorsión de tensión.
- Las armónicas de mayor representación son las de orden 5 y 7. Se debe tener en cuenta que la armónica de orden 5, es de secuencia negativa, por tal, ésta generará (en los motores) un torque contrario al de la fundamental, provocándole un frenado que podría ocasionar calentamientos.
- El nivel de distorsión tiene relación con el consumo de potencia reactiva de la Mina, dado que la operación del condensador amplificar la distorsión existente.

### **d. Evaluación de la Tensión**

- La tensión presenta caídas menores al 80% cuando existe una variación en la potencia reactiva de la carga la cual podría ser originada por la conexión del condensador. No se debe descartar que está variación también puede ser ocasionada por la disminución del consumo de energía de la Mina.
- En ambos puntos de medición, no existe desbalance mayor al 1%.

### **e. Evaluación del Flicker**

- En la barra de conexión en baja tensión de la Micro Central no existen niveles de flicker que superen el 1pst. Sin embargo, en la barra de 460V de la Mina, existen algunos intervalos con amplitudes mayores a 1pst. Al no tener fuentes generadoras de flicker dentro de la Mina, se considera que estos picos son ocasionados por el arranque de motores.
- Los niveles de flicker no afectan la operación de la Mina ni de la Micro Central.

### **f. Desbalance de Tensión**

- El desbalance de tensión, registrado cada 5 minutos está por debajo del 7%.
- Existe mayor desbalance de corriente en las cargas de la Mina los cuales superan (en algunos intervalos) el 10%.

### **g. K-Factor**

- El transformador de 1000kVA que se encuentra en la subestación de la Mina. tiene un K-factor =1.296. por lo que no es necesario ser desclasificado, en caso de no poder

eliminar los armónicos puede ser reemplazado por un transformador con un Factor  $K=4$ .

- El transformador de 1000kVA que se encuentra en la subestación de la Micro Central tiene un  $K=1.058$ . por lo que no es necesario ser desclasificado.

### **3.1.7 Recomendaciones**

Se recomienda

- Instalar un filtro de armónicas de 5to orden. Para ellos se debe aprovechar el condensador existente e insertarle un reactor que sintonice a una frecuencia entre 270Hz y 330Hz. Con el filtro de logrará disminuir el nivel de distorsión de 5ta armónica; por tal, el THD de tensión también disminuirá.

- Monitorear las componentes de secuencia positiva, negativa y homopolar por períodos de 1 segundo con la finalidad de determinar la magnitud de cada una de ellas y si está afecta los dispositivos de protección.

- Desconectar el condensador, dado que su operación origina que la distorsión de tensión sea mayor al 5%. Se recomienda verificar que carga en la Mina origina mayor desbalance. Este trabajo debe ser realizado tomando medidas de corriente hora a hora por un período de un día. Este mismo procedimiento debe ser aplicado para medir el desbalance de corriente en las cargas de la planta concentradora.

## **3.2 Segundo caso de estudio**

El objetivo es realizar el análisis de armónicos y el cálculo del factor K, en el sistema eléctrico de baja tensión del almacén Alfa, de acuerdo a los estándares aplicados en la industria y teniendo como marco las normas técnicas vigentes.

### **3.2.1 Alcance**

Para lograr el objetivo propuesto se realizó lo siguiente:

- Elaboración de un cronograma de medición.
- Ejecución del cronograma de medición en el nivel de 220V.
- Procesamiento de la información registrada en campo con la finalidad de analizar los niveles de armónicos en el punto eléctrico medido.

### **3.2.2 Marco normativo**

Los indicadores de calidad de energía fueron evaluados según norma técnica de calidad de servicios eléctricos (NTCSE), la cual establece como uno de sus requisitos, estándares para las variables eléctricas de tensión, flicker y armónicos.

- Tensión.- La NTCSE especifica tolerancias en cuanto a las variaciones de los niveles de tensión medidos. El periodo de medición es de siete días calendarios continuos promediados por intervalos de 5 minutos. La tolerancia del nivel de tensión es del  $\pm 5\%$  de la tensión nominal.

- Flicker.- La NTCSE especifica que limite del índice de severidad por Flicker es menor a

1 ( $P_{st} < 1$ ).

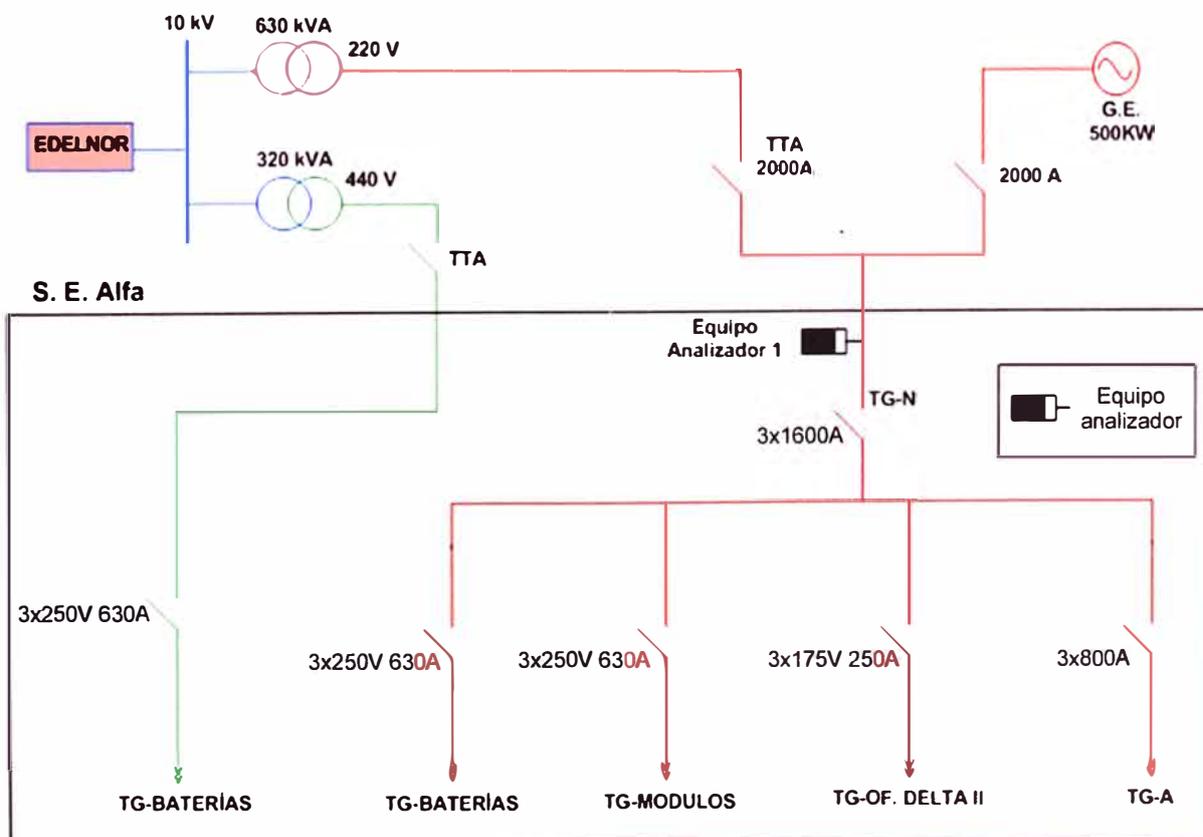
- Armónicos.- La forma de evaluar la distorsión es a través del parámetro denominado distorsión armónica total THD y para el caso de las armónicas individuales sus tolerancias por nivel de tensión son mostradas en la Tabla 3.20.

**Tabla 3.20** Límite de distorsión individual de tensión

Baja y Media Tensión hasta 35kV							
Armónico	%	Armónico	%	Armónico	%	Armónico	%
2	2.0	12	0.2	22	0.2	32	0.2
3	5.0	13	3.0	23	1.5	33	0.2
4	1.0	14	0.2	24	0.2	34	0.2
5	6.0	15	0.3	25	1.5	35	0.557
6	0.5	16	0.2	26	0.2	36	0.2
7	5.0	17	2.0	27	0.2	37	0.538
8	0.5	18	0.2	28	0.2	38	0.2
9	1.5	19	1.5	29	0.631	39	0.2
10	0.5	20	0.2	30	0.2	40	0.2
11	3.5	21	0.2	31	0.603		
Límite máximo de THD de tensión = 8 %							

### 3.2.3 Esquema de medición

La Figura 3.1 muestra un esquema que presenta la ubicación de la medición realizada en el lado de 220V, del transformador de 630kVA.



**Figura 3.28** ubicación de medición realizada en el lado de 220V

### 3.2.4 Metodología de medición y equipo analizador utilizado

Las mediciones fueron programadas en coordinación con el área de mantenimiento eléctrico de RANSA.

En la Tabla 3.21 se muestra el cronograma y periodo de medición.

**Tabla 3.21** Cronograma y periodo de medición

Punto de Medición	Nivel de Tensión (V)	Fechas Programadas	Periodo (días)	Intervalo de medición (minutos)
TG-N Interruptor Principal	220	24/05/2013 – 31/05/2013	7	5

Los parámetros eléctricos que fueron registrados son:

- Tensión
- Corriente
- Perturbaciones (armónicas y flicker)
- Potencia (activa y reactiva)

Para realizar la evaluación de las armónicas de corriente, se programó medir armónicas por fase desde el orden 1 al 25.

El equipo utilizado fue el analizador POWER RECORDER (RELIABLE POWER METERS) modelo 1650. El mismo del primer caso de estudio

El tipo de conexión que se realizó para estas instalaciones fue de tipo Delta.

### 3.2.5 Resultados

Se desarrollan los siguientes ítems:

- Niveles de Tensión RMS.
- Niveles de Corriente RMS.
- Medición de Armónicos de Tensión.
- Medición de Distorsión Armónicos de Tensión y Corrientes.

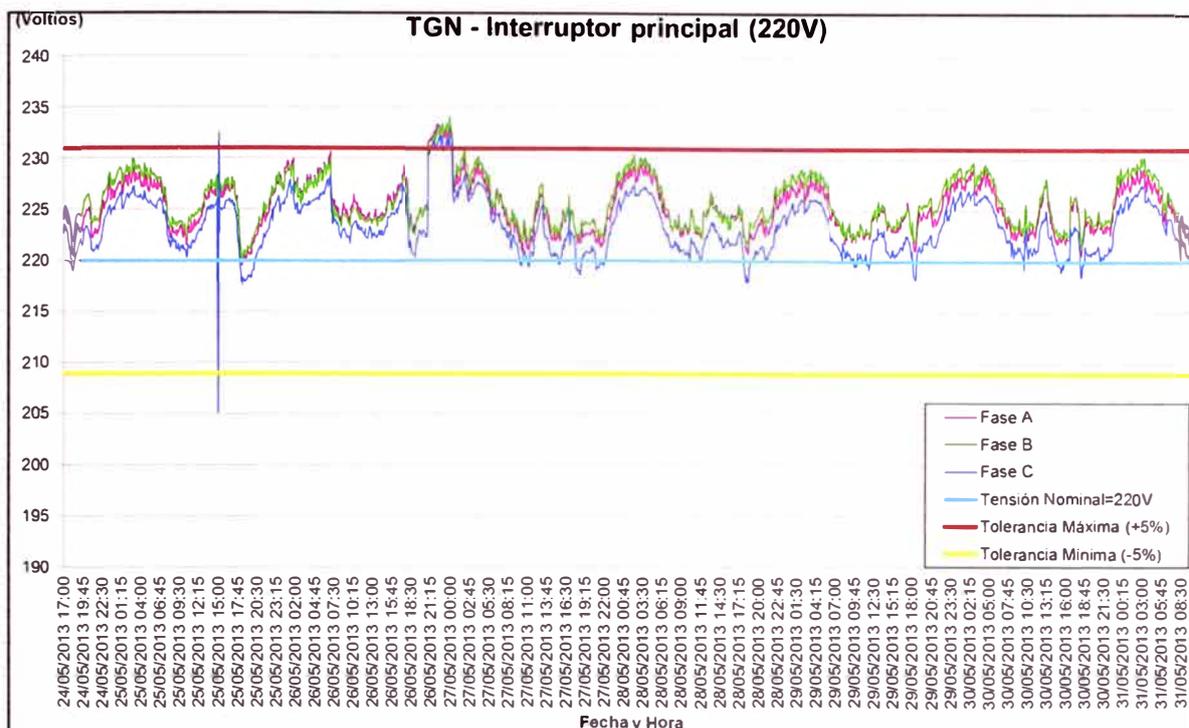
#### a. Niveles de Tensión RMS.

En la Tabla 3.22 se muestra el nivel de tensión RMS.

**Tabla 3.22** nivel de tensión RMS.

Punto de Medición	Nivel de Tensión (V)	Tensión RMS (V)			Tensión (p.u.)		
		Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom	Mín
TG-N Interruptor Principal	220	234.2	226.0	220.1	1.06	1.03	1.00

Se observa que la tensión RMS máxima encontrada es igual al valor límite de la NTCSE (1.05 p.u.). Ver Figura 3.29



**Figura 3.29** Perfil de tensión RANSA

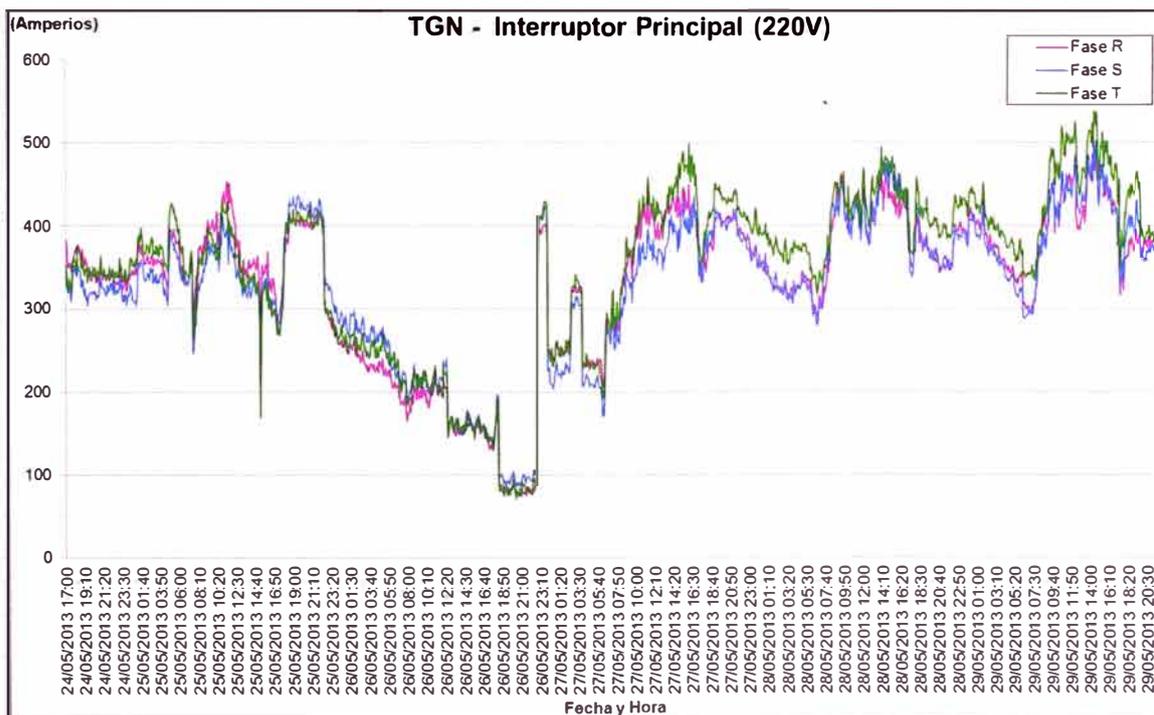
## b. Niveles de Corriente RMS

En el siguiente cuadro se muestra el nivel de corriente obtenido.

**Tabla 3.23** Nivel de corriente obtenido

Ítem	Puntos de medición	Corriente (A)			Corriente Nominal (A)
		Máx.	Prom.	Mín.	
1	TG-N Interruptor Principal	538	357	72	1,600

De la tabla anterior, se observa que no hay sobrecarga en los puntos de medición.



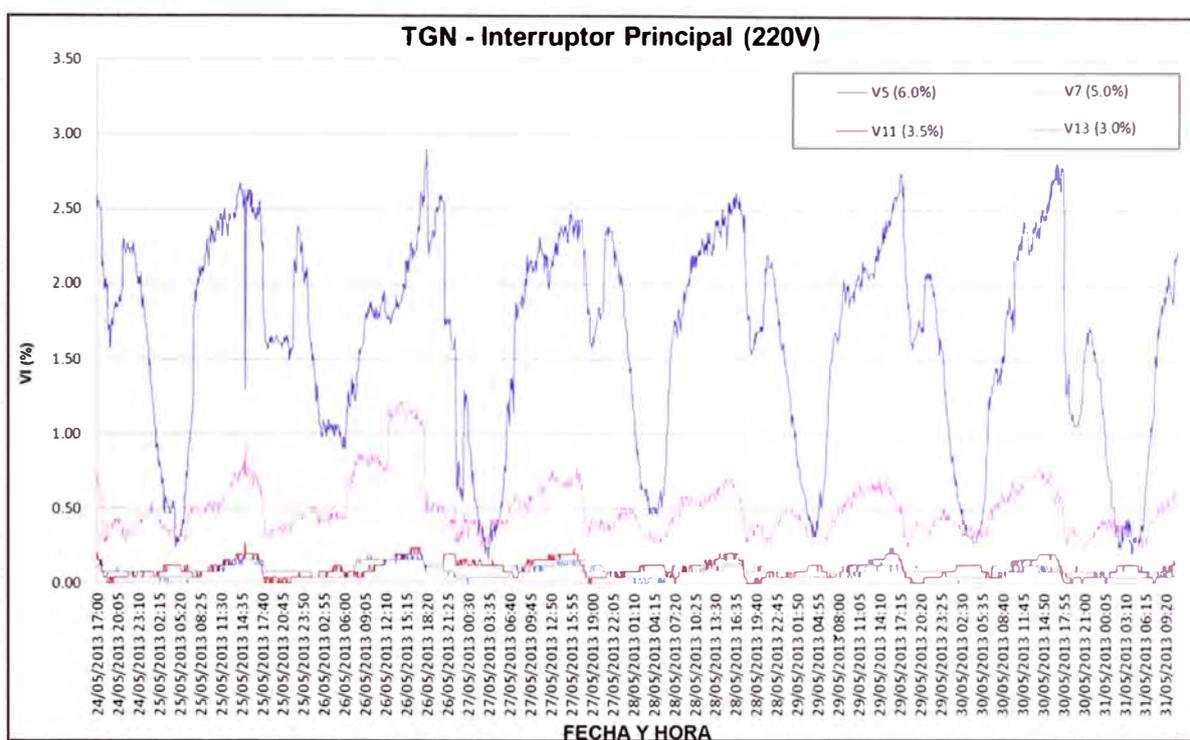
**Figura 3.30** Diagrama de corrientes RANSA

### c. Medición de armónicos de tensión

En la Tabla 3.24 se muestra el reporte de tensiones armónicas individuales más representativas según las tolerancias establecidas por la NTCSE.

**Tabla 3.24** reporte de tensiones armónicas individuales

Orden Armónico	Cantidad de Intervalos		% de Intervalos en falta	Tensiones Armónicas (%)			Tolerancia NTCSE
	Evaluados	En falta		Máx.	Prom.	Min.	
5	1 942	0	0%	2.90	1.63	0.16	6.00%
7	1 942	0	0%	1.22	0.50	0.24	5.00%
11	1 942	0	0%	0.27	0.10	0.00	3.50%
13	1 942	0	0%	0.20	0.08	0.00	3.00%



**Figura 3.31** Tensiones armónicas máximas RANSA

### d. Medición de distorsión de armónicos de tensión y corrientes

Los valores de THD de tensión se detallan en la siguiente tabla:

**Tabla 3.25** Valores de THD de tensión

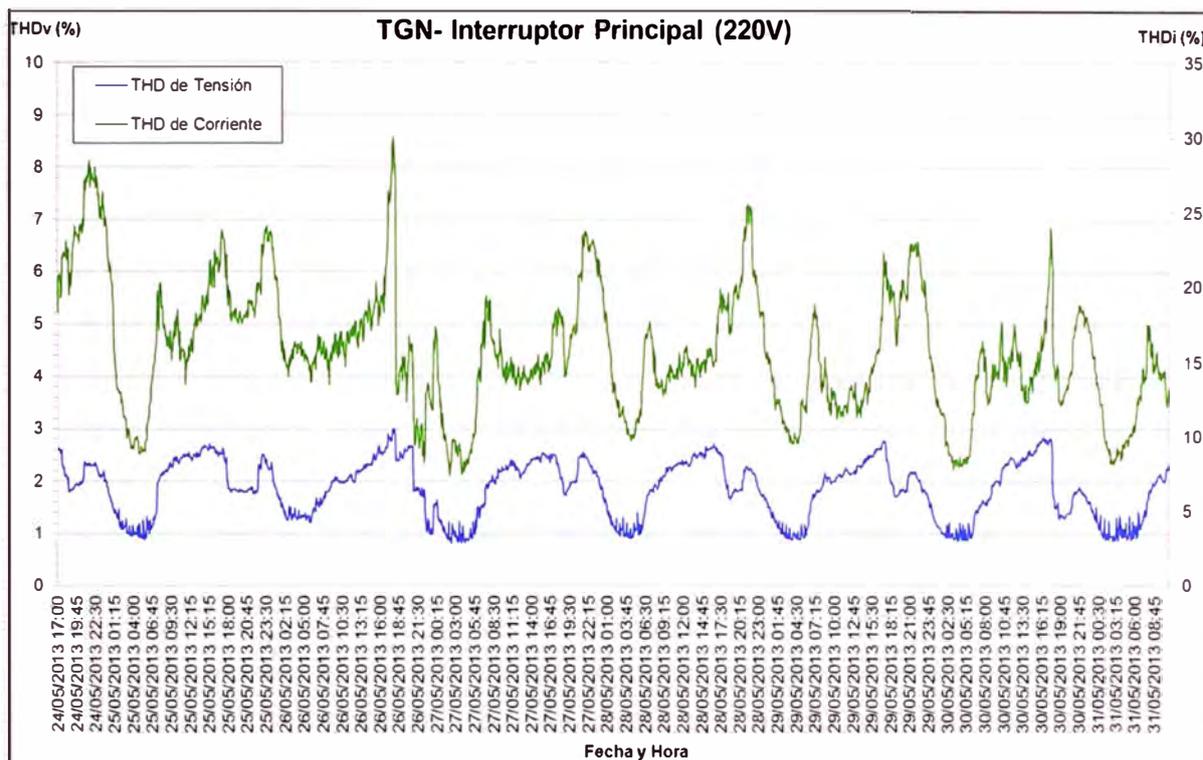
Puntos de medición	Tensión Nominal (V)	THD-V (%)			Tolerancia IEC Clase 3 (%)	Tolerancia NTCSE (%)
		Máx.	Prom.	Min.		
TG-N Interruptor Principal	220	3.01	1.86	0.81	10.00	8.00

De la tabla anterior se muestra que el nivel de distorsión de tensión se encuentra dentro de la tolerancia estipulada por la NTCSE ( $THD_V < 8\%$ ). De igual forma se indica el

THD de corriente del punto evaluado en la Tabla 3.26

**Tabla 3.26** THD de corriente del punto evaluado

Ítem	Puntos de medición	THD I (%)		
		Máx.	Prom.	Mín.
1	TG-N Interruptor Principal	30.03	15.71	7.43



**Figura 3.32** Distorsión total de armónicos

### 3.2.6 Comentarios

Los niveles de tensión en promedio se encuentra por debajo del límite máximo (1.05 p.u.), según la NTCSE.

Las tensiones armónicas se encuentran dentro de los límites establecidos por la NTCSE.

Se recomienda realizar una revisión de conexión y calibración del medidor de energía de la Subestación Alfa, ya que los valores que se visualiza son erróneos.

Como lo datos tomados en campo nos permitieron calcular el k-factor.

Siguiendo la fórmula:

$$K = \sum_{h=2}^{h=h_{\max}} h^2 I_h^2 \quad (3.2)$$

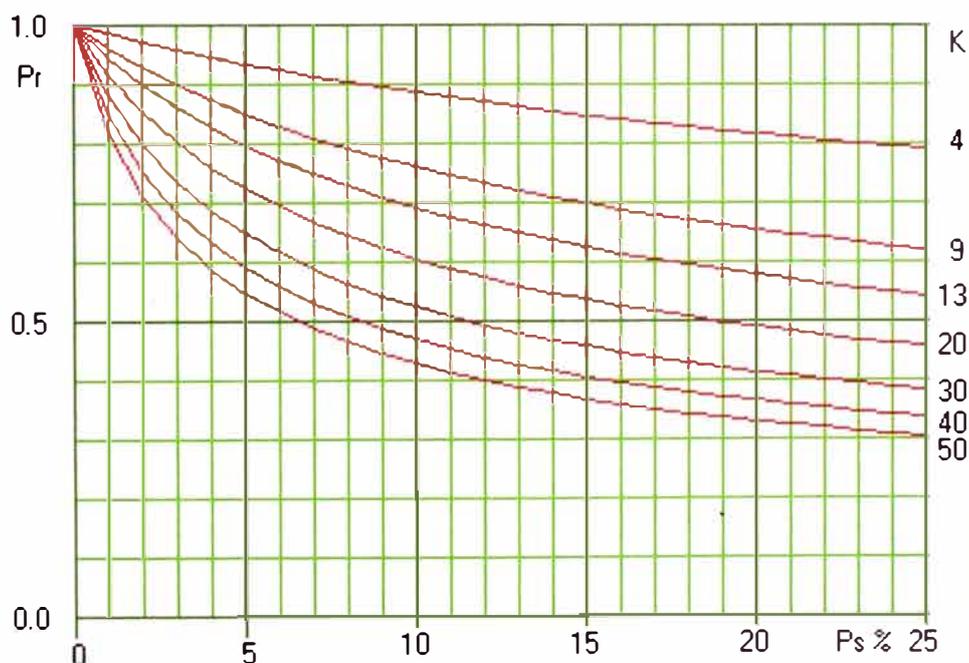
Y tabulando los datos en la Tabla 3.27, se tiene que para este transformador de 630kVA, el k-factor es de K=1,405 por lo que no es necesario una desclasificación.

**Tabla 3.27** Tabulación de datos para cálculo de factor K

h	$I_h$	$h^2$	$(I_h/I)$	$(I_h/I)^2$	$(I_h/I)^2 h^2$
1	358,4937	1	0,959	0,9188	0,919
3	17,5832	9	0,047	0,0022	0,020
5	47,5067	25	0,127	0,0161	0,403
7	13,0105	49	0,035	0,0012	0,059
9	0,76308	81	0,002	0,0000	0,000
11	1,70421	121	0,005	0,0000	0,003
13	0,96649	169	0,003	0,0000	0,001
I =	374,00				K-factor = 1,405

### 3.2.7 Conclusiones

La existencia de armónicos conlleva al sobredimensionar el transformador, se considera el K-factor, por ende se incrementa el costo del equipo. Pero es necesario considerar una desclasificación para que la vida del transformador no se afecte, trabajando a una potencia menor a la nominal.

**Figura 3.33** Reducción de potencia por contenido de armónicos

Para nuevas instalaciones, siempre que sea posible, se deben escoger transformadores especialmente construidos (clasificación K), en otro caso se deberá aplicar la desclasificación correspondiente.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. Se logró cumplir con los objetivos del informe:
  - Análisis de las perturbaciones armónicas en los casos de estudio.
  - Se determinó el factor K del transformador afectado por las corrientes armónicas.
2. Durante el análisis de las mediciones hechas en el primer caso de estudio se pudo comprobar que los niveles de las perturbaciones armónicas individuales de 5to y 7mo orden se encuentran fuera de los límites establecidos; calculándose el factor K del transformador asociado a esta, donde se determinó que verifica que las magnitudes de estas corrientes armónicas no afectan demasiado al transformador. (MINA  $K=1.296$ ) (MICRO CENTRAL  $K=1.058$ )
3. Durante el análisis de las mediciones hechas en el segundo caso se pudo comprobar que los niveles de las perturbaciones armónicas individuales de 5to orden se encuentran fuera de los límites establecidos; calculándose el factor K del transformador de 630kVA esta, donde se determinó que verifica que las magnitudes de estas corrientes armónicas no afectan demasiado al transformador. (ALMACENES ALFA  $K=1.405$ )
4. No es necesario desclasificar los transformadores para los casos de estudio, debido a que estos pueden soportar el contenido de armónicos en su corriente de carga manteniéndose dentro de los límites de la temperatura de funcionamiento.

### Recomendaciones

1. Considerando los resultados obtenidos en los análisis, y teniendo como prioridad mejorar de la calidad de energía en los sistemas eléctricos analizados (casos de estudio), es recomendable instalar un filtro de armónicas de 5to orden; con esto se logrará disminuir el nivel de distorsión de la 5ta armónica de esa forma el THD-V también disminuirá

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fisher Andrés Arenas Huilca, "Fabricación de un banco automático de condensadores, con reactancias en serie para atenuar el efecto de las armónicas en baja tensión", FIEE, 2012.
- [2] EDELNOR, "Tarifa para la venta de energía eléctrica". 3 de noviembre de 2011  
["http://www.edelnor.com.pe/Edelnor/ContenidoFileServer/Pliegos%20Edelnor%2041111%20para%20la%20venta.WEB\\_20111103065239397.pdf"](http://www.edelnor.com.pe/Edelnor/ContenidoFileServer/Pliegos%20Edelnor%2041111%20para%20la%20venta.WEB_20111103065239397.pdf)
- [3] SICA News, "Distorsión armónica",  
<http://www.paginadigital.com.ar/articulos/2002rest/2002terc/tecnologia/sica90.html>
- [4] Resoluciones 465/96 y 99/97 del ENRE, Argentina  
<http://www.enre.gov.ar/web/bibliotd.nsf/5D4DE5955C4446E00325694A00638422/D8E99DFD8B64CC98625644C005D3A1E?Open>
- [5] AP&C "Distorsión Armónica",  
<http://http://www.waterymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Distorsion%20Armonica.pdf>